

Capítulo 13

Análisis Económico de la Iluminación Eficiente

1. Fundamentos de la matemática financiera.

- 1.1. Tasa de descuento
- 1.2. Vida útil del equipamiento y período de análisis
- 1.3. Flujo de caja
- 1.4. Valor actual

2. Indicadores comparativos

- 2.1. Valor actual neto (VAN)
- 2.2. Período simple de repago (PSR)
- 2.3. Tasa interna de retorno (TIR)
- 2.4. Costo anualizado total (CAT)
- 2.5. Comparación entre los distintos índices

3. Ejemplos de análisis de la rentabilidad de la iluminación eficiente

- 3.1. Sector residencial
- 3.2. Sector comercial y público
- 3.3. Alumbrado público

El objetivo del análisis económico que se desarrolla en este capítulo es el de introducir al lector a los distintos métodos de evaluación que proveen de la información necesaria para decidir la conveniencia, o no, de efectuar una inversión en una tecnología eficiente¹.

El cálculo completo de los distintos indicadores necesita, entre otros datos, conocer las inversiones, impuestos, considerar los costos directos (costo de la energía, costo de la potencia) y los indirectos (mantenimiento y otros), estimar la magnitud del ahorro de energía, la vida útil del proyecto e incorporar un factor que relacione los beneficios a producirse en el futuro (ahorro energético y otros) con la inversión efectuada en el presente. En algunos casos, también pueden requerirse la consideración de algunas externalidades como por ejemplo las ambientales.

Existen numerosos procedimientos distintos para valorar la rentabilidad de los proyectos de inversión y diferentes perspectivas desde donde hacerlo: la de la distribuidora, la de la sociedad, la del usuario, etc. En este capítulo se desarrollará tan sólo la perspectiva del usuario describiéndose aquellos procedimientos de evaluación que dada su simplicidad, comodidad y/o difusión resultan particularmente convenientes para el objetivo de nuestro trabajo: evaluar alternativas de iluminación eficiente; quedando a juicio del analista la elección de el o los indicadores que le resulten más convenientes en función de sus propósitos.

El capítulo se halla organizado en tres partes principales. En la primera se introducen los conceptos básicos de matemática financiera (ver Sec. 1. *Fundamentos de matemática financiera*) que luego serán utilizados en la confección de los indicadores. Quienes manejan estos conceptos: tasa de descuento, valor actual del dinero, etc. pueden dirigirse directamente al punto siguiente (ver Sec. 2. *Indicadores Comparativos*).

En la Sec. 2. *Indicadores Comparativos*, se desarrollan cuatro indicadores: el Valor Actualizado Neto, el Período Simple de Repago, la Tasa Interna de Retorno y el Costo Anualizado Total.

Por último, se expone un conjunto de ejercicios que aplican las expresiones elaboradas en los puntos anteriores para los proyectos de iluminación eficiente.

1. Fundamentos de matemática financiera

La determinación de la conveniencia, o no, de llevar a cabo una inversión en uso eficiente o saber cuál es la mejor alternativa entre un grupo de opciones, podría realizarse simplemente efectuando la sumatoria de los costos y los beneficios en que se incurre en un determinado proyecto, aceptándose si los últimos son mayores que los primeros. Si bien este procedimiento, caracterizado por su simpleza, se aplica frecuentemente, no contempla el hecho de que el dinero tiene distinto valor según se lo invierta (o se lo perciba) hoy o en el futuro.

Para efectuar una comparación entre la inversión actual y los beneficios desplazados en el tiempo se debe considerar un *valor temporal* del dinero. Un peso recibido hoy es más valioso que un peso a ser recibido dentro de, por ejemplo, seis meses o un año, porque el peso que se

¹ Existen situaciones en donde la tecnología eficiente no tiene mayor costo en cuyo caso el análisis se hace innecesario.

tenga hoy puede ser invertido, por ejemplo, en un banco y acumular intereses durante todo ese tiempo. Viceversa, un peso a recibirse en el futuro vale menos que uno en el presente, pues se pierde la oportunidad de invertirlo y obtener intereses.

1.1. Tasa de descuento

Para tener en cuenta el valor temporal del dinero se utiliza la *tasa de descuento*, i , la cual puede interpretarse así:

$$\text{un peso ahora vale } (1 + i) \text{ pesos en un año.} \quad (1)$$

La tasa de descuento tiene la forma de una tasa de interés, expresada en forma de una fracción y no de un porcentaje. P.e.: una tasa de interés del 10% se escribe como $i = 0,1$.

Técnicamente, esta tasa se denomina ‘tasa *real* de descuento’. En algunos casos puede considerarse una tasa que tenga en cuenta los efectos de la inflación, que se denomina ‘tasa *nominal* de descuento’.

En este manual, se considerará solamente la tasa real de descuento a la que se denominará por practicidad simplemente tasa de descuento.

Consideraciones sobre la elección de la tasa de descuento

Teniendo en cuenta que la tasa de descuento es una medida del valor temporal del dinero, se percibe que no es necesariamente la misma para distintos inversores. La tasa de descuento podrá estar influenciada o determinada por una amplia gama de factores que actuarán en forma distinta sobre los diferentes inversores, de provincia a provincia, de sector a sector, de empresa a empresa, etc. No existe una cifra definitiva de la tasa de descuento, la cual deberá determinarse según las circunstancias.

Para el sector privado no hay lineamientos apropiados para la evaluación de la tasa de descuento. Algunos expertos recomiendan para el comercio y la industria una tasa de descuento igual a la del costo de oportunidad del capital. Siendo el costo de oportunidad del capital la tasa de retorno de la mejor alternativa de inversión posible. Si una gran empresa — p.e. una industria siderúrgica— define una tasa de descuento para la evaluación de sus proyectos de inversión, puede utilizar la misma tasa para sus inversiones en el uso eficiente de la energía.

Para un consumidor pequeño, por ejemplo un usuario residencial, se puede considerar las oportunidades alternativas de inversión —plazo fijo en un banco, por ejemplo,— y calcular una tasa de descuento. Para el pequeño inversor, actualmente en la Argentina la tasa de descuento está entre 0 y 0,05. El inversor puede utilizar otra cifra si tiene otras posibilidades de inversión.

Cualquiera sea el caso, para una inversión racional y rentable, el valor de la tasa de descuento, i , tiene que igualar o superar a la tasa de interés o equivalente de una inversión alternativa.

Ejemplo

Se supone ***el caso de un inversor*** que decide invertir en el uso eficiente de la energía. Si no lo invierte en este proyecto podría depositarlo en un banco. En Argentina en el año 2000 la tasa de interés en una cuenta de plazo fijo en pesos fue de alrededor de 6% anual y la inflación

anual despreciable, por lo cual las tasas nominales y reales coinciden. En este caso, la tasa de descuento *real* es 0,06.²

1.2. Vida útil del equipamiento y período de análisis

La vida útil del equipamiento es el tiempo (en años) durante el cual las instalaciones que comprenden la instalación estarían en uso. La determinación de este valor resulta crítica en nuestro análisis, y para su obtención puede recurrirse a la experiencia en otros proyectos, fabricantes de equipos, y fuentes varias. En el caso particular de las lámparas la vida útil se expresa en horas de uso y por lo tanto variará en función de la cantidad de horas de encendido diaria que tengan.

El período de *análisis* es el período de tiempo dentro del cual se realiza la evaluación. Puede o no coincidir con la vida útil del equipamiento y depende de la tasa de descuento. Para valores de esta última de, v.g. 20%, no tiene sentido considerar ingresos y egresos más allá del año 20, dado que su valor actual sería casi nulo (ver Sec. 1.4 *Valor actual*). Para la evaluación de la eficiencia energética, suelen coincidir el período de análisis con la vida útil del equipamiento.

1.3. Flujo de caja

El flujo de caja está constituido por los ingresos y egresos incurridos por el proyecto durante sucesivos *intervalos* a lo largo del período de análisis. Los intervalos de análisis pueden ser mensuales o anuales. Para los análisis a efectuarse en este capítulo resulta inútil realizar grandes esfuerzos para precisar el momento durante cada intervalo en que ocurren estos movimientos de caja. Comúnmente los ingresos y egresos que suceden dentro de un intervalo se agrupan y suman al comienzo, mitad o final del intervalo de análisis.

En este manual se asumirá la práctica más común que es la de considerarlos agrupados al final de cada intervalo. Para la evaluación de rentabilidad de inversiones de eficiencia energética, generalmente se trabaja con intervalos de análisis de un año, por lo cual la actualización de los valores de los movimientos se realizará utilizando tasas de descuento *anuales*.

1.4. Valor actual

Una vez decidida la tasa de descuento se puede comparar una inversión en el presente con beneficios a producirse en el futuro introduciendo el concepto de *valor actual*. El valor actual es la medida del valor al día de hoy (año cero) de los costos y los beneficios a incurrir en el presente y en el futuro. Debido a la importancia de este concepto, se describirá con cierto detalle.

El valor *actual*, P , de un peso que ingresa o sale de caja en el *futuro* puede calcularse multiplicándolo por un factor que dependerá de la tasa de descuento, i , y del año en que se produzca el movimiento.

² En el momento de terminar la edición de este libro (junio de 2002) la situación macroeconómica y financiera argentina es inestable. Hasta que se establezca la situación, se recomienda el uso de dólares equivalentes en todos los cálculos.

$$P = F_n \times \frac{1}{(1+i)^n} \quad (2)$$

donde P : valor actual
 n : años en el futuro
 F_n : movimiento de caja n años en el futuro
 i : tasa anual de descuento

Ejemplo. ¿Cuál es el valor actual de un ingreso a caja de \$1.000 a producirse dentro de un año, si la tasa de descuento es del 10%?

Del enunciado tenemos que $i = 0,1$; $F_1 = \$ 1.000$ y $n = 1$, aplicando (3):

$$P = \$1.000 \times \frac{1}{(1+0,1)^1} = \$1.000 \times 0,909 = \$909$$

Dicho en otras palabras, los \$ 909 representan aproximadamente el valor actual de un futuro ingreso a caja de \$ 1.000. Por el contrario, si invertimos hoy \$ 909 a una tasa de interés del 10% se tendrán dentro de un año \$ 1.000.

Caso con movimientos de caja distintos

Extendiendo estos conceptos, a partir de la expresión básica dada por la fórmula (2), se puede evaluar el valor actual del movimiento de caja a producirse en cualquier período en el futuro. En estos casos el valor actual, P , quedará determinado por la suma de todos los valores actuales de los movimientos de caja, F_n , producidos en cada año, n .

$$P = \sum_n \frac{F_n}{(1+i)^n} \quad (3)$$

Ejemplo. ¿Cuál es el valor actual que corresponde a un ingreso de caja de \$2 dentro de un año y otro de \$1 dentro de cinco años a una tasa de descuento del 5%?

El valor actual quedará determinado de la siguiente forma:

Aplicando (3) con $i = 0,05$; $F_1 = \$ 2$ y $n = 1$, y $F_2 = \$ 1$ y $n = 2$:

$$P_1 = \$2 \times \frac{1}{(1+0,05)^1} = \$2 \times 0,9524 = \$1,9047$$

$$P_2 = \$1 \times \frac{1}{(1+0,05)^5} = \$1 \times 0,7835 = \$0,7835$$

Una vez que los movimientos de caja fueron convertidos al valor actual pueden sumarse, como se muestra en la Tabla 1 para esta tasa de descuento. En la misma tabla se muestran, también, los resultados para una tasa $i = 0,2$.

Tabla 1. Resumen de cálculo del valor actual total para una tasa de descuento del 5 y 20%.					
		$i = 0,05$		$i = 0,20$	
<i>Período</i>	<i>Ingreso</i>	$\frac{1}{(1+i)^n}$	<i>Valor actual</i>	$\frac{1}{(1+i)^n}$	<i>Valor actual</i>
1	\$ 2	0,9524	\$ 1,9047	0,8333	\$1,6666
5	\$ 1	0,7835	\$ 0,7835	0,4019	\$0,4019
Valor actual total		\$ 2,6882		\$ 2,0685	

Observando la Tabla 1 resulta interesante destacar, al comparar los efectos producidos por las distintas tasas de descuento, que una tasa de descuento baja deprecia menos los movimientos de caja en el futuro y que, contrariamente, una alta tiende a desvalorizarlos más fuertemente.

Caso con movimientos de caja iguales

En los ejemplos anteriores para el cálculo del valor actual se hizo necesaria la aplicación de las expresiones (2) y (3).

Ahora bien, como ocurre comúnmente en la práctica y en los ejemplos que daremos más adelante, para el caso en particular en que los valores de los movimientos de caja en los distintos años sean iguales y ocurran en forma regular durante un número N de intervalos (años), el valor actual se calcula con la siguiente expresión:

$$P = F \times \frac{[(1+i)^N - 1]}{i \times (1+i)^N} \quad (4)$$

donde P es el valor presente de un flujo de caja de F anuales durante N años.

En algunas ocasiones como ya se verá, nos interesará realizar el proceso inverso, es decir, distribuir una cantidad de dinero P a lo largo de N años y conocer el valor de F .

Para estas situaciones la expresión a aplicar surge despejando de (4):

$$F = P \times \left[\frac{i \times (1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \right] = P \times FRC \quad (5)$$

donde la expresión $FRC = \left[\frac{i \times (1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \right]$ (6)

se la conoce como *Factor de Recupero del Capital* y representa el valor anual F durante N años, equivalente a una cantidad P en el presente, a una tasa de descuento dada.

Dicho en otras palabras, si P es el capital invertido ahora, su recuperación requiere de un "ingreso" anual de F , dado por la Ec. (5).

Debido a que el factor de recupero de capital depende de i y N , se lo representará como:

$$FRC = FRC(i, N)$$

La Tabla 2 muestra valores de FRC para distintas tasas de descuento (i) y para diferentes vida útil (N) del equipamiento que comprende la inversión.

Tabla 2. Factor de recupero de capital para valores de N de 3 a 15 años y tasas de descuento de 0,03 a 0,15.													
	<i>Vida útil del equipamiento, N, años</i>												
<i>i</i>	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,03	0,354	0,269	0,218	0,185	0,161	0,142	0,128	0,117	0,108	0,100	0,094	0,089	0,084
0,06	0,374	0,289	0,237	0,203	0,179	0,161	0,147	0,136	0,127	0,119	0,113	0,108	0,103
0,09	0,395	0,309	0,257	0,223	0,199	0,181	0,167	0,156	0,147	0,140	0,134	0,128	0,124
0,12	0,416	0,329	0,277	0,243	0,219	0,201	0,188	0,177	0,168	0,161	0,156	0,151	0,147
0,15	0,438	0,350	0,298	0,264	0,240	0,223	0,210	0,199	0,191	0,184	0,179	0,175	0,171

De la Tabla 2, para $i = 0,12$ y $N = 6$ años, tenemos que $FRC(i, N) = 0,243$. Así, una inversión actual de \$1.000 y un pago anual (F) de \$243 durante 6 años tienen el mismo valor actual, para una tasa de descuento de 0,12. En otras palabras, \$243 es el pago anual (en pesos constantes) para un valor de \$1.000 que se reembolsa en 6 años con una tasa de interés anual del 12%. Cálculos de este tipo se utilizan para la evaluación de las cuotas hipotecas y otros préstamos, donde el intervalo de análisis y de pago suele ser mensual.

2. Indicadores comparativos

A partir de los conceptos de tasa de descuento y factor de recupero de capital, se puede definir algunos indicadores útiles para evaluar la rentabilidad de las inversiones en el uso eficiente de energía. Estos indicadores permiten evaluar la conveniencia económica, o no, de utilizar tecnologías eficientes.

La elección del indicador a utilizar para realizar la evaluación dependerá del caso particular bajo estudio, de los datos disponibles, de la profundidad con que quiera procederse, etc. Los distintos indicadores se expresan en diversas unidades, que posibilitan variados enfoques en el análisis. En algunos estudios podrá convenir, incluso, calcular más de un indicador para obtener una apreciación más completa del problema analizado, por ejemplo para comparación con otra alternativa de inversión u otro propósito.

En la Tabla 4 al final de este capítulo se resumen los rasgos más destacados de cada uno de ellos.

Cabe destacar que la determinación de si una opción de eficiencia energética es rentable o cual de dos o más alternativas es la más rentable es independiente del indicador utilizado, siempre que las suposiciones fueran las mismas.

Generalmente las instalaciones de iluminación eficientes requieren una mayor inversión inicial debido a que este tipo de tecnologías son más caras. Sin embargo y a lo largo de la vida útil de la instalación, se verá una reducción en los costos operativos energéticos y posiblemente también del mantenimiento de las instalaciones. La evaluación económica consiste en sopesar si la mayor inversión adicional se justifica en términos de los ahorros futuros de energía y mantenimiento.

Se desarrollarán a continuación las características de los proyectos y la nomenclatura utilizada para realizar los cálculos.

Inversiones

En adelante al costo inicial de la tecnología *convencional* se lo llamará *CC*, mientras que al de la tecnología *eficiente* *CE*. La inversión adicional ΔI se computará de la siguiente forma:

$$\Delta I = CE - CC \quad (7)$$

Las tecnologías eficientes tienen generalmente un costo superior de las que no lo son, por lo cual ΔI es positivo.

Costos de operación y mantenimiento (O&M)

Los costos de operación y mantenimiento (O&M) pueden resumirse en: a) costos de la energía, b) costos de la potencia³ y c) costos de mantenimiento. Los costos de O&M en las instalaciones de iluminación eficiente son siempre inferiores a los de aquellas que no lo son.

Al consumo energético de la instalación convencional se lo denominará *EC* y al de la variante eficiente *EE*. Este consumo se indicará, generalmente, en kWh al año [kWh/año]

El precio de la energía está determinado por el sitio y el tipo de tarifa aplicado a la instalación. A este precio se lo notará como *PE* y en general estará expresado en pesos por kilowatt-hora [\$/kWh].

Existen otros costos que deben ser evaluados cuando corresponda, como ser el costo que se paga por potencia contratada en algunas tarifas. Para ello debemos considerar la potencia demandada por las instalaciones. Esta potencia será generalmente menor en la instalación eficiente que en la que no lo es. A la potencia *demandada* por la instalación *eficiente* se la notará como *DE* y a la *convencional*, *DC* y se expresa en [kW]. Al costo de la *potencia* se lo señalará *PP*, y estará indicado en pesos por kilowatt al año [\$/kW-año]⁴. La evaluación del costo por potencia cobra sentido cuando la modificación afecta una gran porción de la instalación o a un proyecto completo, y puede en consecuencia disminuirse el monto de la potencia contratada.

En ciertos casos, también podrán obtenerse beneficios indirectos como por ejemplo descenso en los niveles de mantenimiento, de requerimiento de aire acondicionado, etc. que, llegado el caso, también pueden ser evaluados.

³ Sólo en aquellas tarifas que incluyen un cargo por este concepto.

⁴ Debe considerarse que el costo se paga mensualmente, por lo que el monto anual se obtendrá multiplicando por 12 (meses).

Sintetizando:

- CE : costo (inversión inicial) de la tecnología eficiente. [\\$]
- CC : costo (inversión inicial) de la tecnología convencional [\\$]
- EE : consumo anual de energía de la tecnología eficiente [kWh/año]
- EC : consumo anual de energía de la tecnología convencional [kWh/año]
- PE : precio de energía [\$/kWh]
- DE : demanda de potencia en la instalación eficiente [kW]
- DC : demanda de potencia en la instalación convencional [kW]
- PP : precio de la potencia [\$/kW-año]
- CMC : costo de mantenimiento de la tecnología convencional [\$/año]
- CME : costo de mantenimiento de la tecnología eficiente [\$/año]

Utilizando esta nomenclatura, se tiene que el ahorro anual —beneficio— obtenido en O&M, $\Delta O \& M$, queda expresado de la siguiente forma:

$$\Delta O \& M = (EC - EE) \times PE + (DC - DE) \times PP + (CMC - CME) \quad (8)$$

2.1. Valor Actual Neto (VAN)

Recordando el concepto de valor actual, el VAN se obtiene sumando los costos y los beneficios producidos en un determinado proyecto a lo largo de su vida útil ajustándolos a su valor actual.

$$VAN = \sum_{n=0}^N \frac{F_n}{(1+i)^n} = F_0 + \frac{F_1}{(1+i)^1} + \frac{F_2}{(1+i)^2} + K + \frac{F_N}{(1+i)^N} \quad (9)$$

A diferencia del concepto de valor actual visto en la Sec. 1.4 *Valor actual* (Ec. (3)) el valor actual neto, para evaluar integralmente el proyecto incorpora a la sumatoria el término correspondiente a la inversión inicial F_0 .

Para el cálculo del VAN en iluminación eficiente, se considerarán los flujos de caja de las inversiones como negativos ($CE - CC$) y los correspondientes a los ahorros ($PE \times (EC - EE)$) como positivos. El VAN queda expresado en pesos [\\$]. Para el caso particular en donde comparemos dos alternativas de iluminación eficiente, la expresión que queda (aplicando (7), (8) y (9)) utilizando la nomenclatura ya vista, es la siguiente:

$$VAN = \Delta I + \sum_{n=1}^N \frac{\Delta O \& M}{(1+i)^n} \quad (10)$$

Aquellas alternativas con VAN positivos mayores resultan convenientes.

Ejemplo

Sea un proyecto eficiente de 5 años, que tiene una inversión adicional mayor que el convencional ΔI de \$10.000. La variante eficiente produce un ahorro anual de O&M de \$4.000 y se considera una tasa de descuento del 10%. El VAN quedará determinado entonces por el desarrollo que se efectúa en la Tabla 3.

Tabla 3. Valor Actual Neto de los movimientos de caja de pesos actuales.

<i>Período</i>	<i>Mov. de caja</i>	$\frac{1}{(1+i)^n}$	<i>Valor actual</i>
<i>n</i>	F_n		
0	\$(10.000)	1	\$(10.000)
1	\$4.000	0,9091	\$3.636
2	\$4.000	0,8264	\$3.306
3	\$4.000	0,7513	\$3.005
4	\$4.000	0,6830	\$2.721
5	\$4.000	0,6209	\$2.484
Valor Actual Neto =			\$5.152

Un VAN positivo como el que resulta del ejemplo, muestra que la inversión considerada resulta económica. Frente a otra alternativa con un VAN mayor debería escogerse la de VAN más alto. Si la inversión hubiese dado un VAN igual a cero, esto significaría que resultaría indiferente para el inversor. Mientras que, una inversión con un VAN negativo hubiera indicado que los ahorros que se percibirán en el futuro tendrán menor valor que la inversión realizada en el año cero resultando por lo tanto inconveniente.

El VAN se recomienda para la evaluación de alternativas que son mutuamente excluyentes, por ejemplo varios alternativos diseños de iluminación para un estadio de fútbol. El diseño cuyo VAN es mayor resulta más conveniente económicamente.

2.2. El periodo simple de repago (PSR)

Una forma muy común de evaluar una inversión es a partir de cuantificar el tiempo que tarda en recuperarse la inversión adicional. Para hacer esto el índice más sencillo es el periodo simple de repago (PSR) del capital. El PSR es la relación entre la inversión inicial y el ahorro en el primer año.

$$PSR = \frac{\Delta I}{\Delta O \& M} \quad (11)$$

El resultado de este indicador está expresado en años o fracción.

Pese a su sencillez y popularidad, éste es el menos deseable de los indicadores, ya que no considera la vida útil de la inversión ni el valor futuro del dinero.

2.3. Tasa interna de retorno (TIR)

La tasa interna de retorno (TIR) de una inversión que tiene una serie de flujos de caja futuros (F_0, F_1, \dots, F_n) es la tasa de descuento i para la cual el Valor Actual Neto es cero.

En nuestro caso, recordando la expresión (9), resulta:

$$VAN = \Delta I + \sum_{n=1}^N \frac{\Delta O \& M}{(1+i)^n} = 0 \quad (12)$$

Para calcular la tasa interna de retorno hay que encontrar la fórmula que anule el VAN dado los valores de CE, CC, PE, EE, EC y N (que intervienen en el cálculo de ΔI y $\Delta O \& M$). Debido a que esta ecuación no tiene una solución analítica explícita, es más fácil resolverla por iteración suponiendo distintos valores para i . Afortunadamente la ecuación (9) se puede resolver con facilidad en una planilla de cálculo, caso que se verá en la sección de ejemplos. Adicionalmente las calculadoras financieras pueden dar el valor del TIR.

Consideraciones sobre la TIR

La ventaja de este índice es que el cálculo no requiere la especificación de una tasa de descuento, y el resultado aparece como una tasa derivada de la inversión. Sin embargo, este método asume implícitamente que el beneficio que se recibe a través de ahorros energéticos se está invirtiendo en un negocio que gana la misma tasa. Esta suposición es cierta cuando un proyecto genera una TIR cercana a la tasa de descuento (una inversión alternativa) pero cuando la TIR es mucho mayor, se sobrestima el rendimiento⁵.

Un inconveniente con el uso del TIR (al igual que el PSR) es que sólo se puede comparar dos alternativas a la vez, por ejemplo, una eficiente versus una convencional.

En proyectos de eficiencia energética, es común analizar varias alternativas, en cuyo caso el análisis se vuelve oneroso. La alternativa con mayor TIR respecto a la opción convencional no es necesariamente la mejor. Se tiene que ordenar las alternativas en orden incremental de inversiones y analizar pares consecutivos para determinar si la inversión incremental es rentable ($TIR > i$).

El siguiente indicador CAT es más conveniente para comparar más de dos alternativas.

2.4. Costo anualizado total (CAT)

Los proyectos de iluminación eficiente requieren, usualmente, de una inversión inicial y de las inversiones necesarias para reponer aquellos elementos con menor vida útil que el resto de la instalación. Generalmente se tiene que considerar la reposición de lámparas y equipos auxiliares durante la vida útil de las luminarias y elementos de fijación (brazos, columnas, etc.) que comprenden la instalación. También suelen haber varias combinaciones de lámparas, balastos, luminarias, etc. para llegar a una instalación completa. La comparación de las alternativas y la evaluación económica de la óptima es fácil utilizando el *costo anualizado total*.

⁵ Para este último tipo de proyectos se utilizan las tasas pseudo interna o ajustada de retorno que no veremos en este texto.

El costo anualizado total (CAT) es la suma del valor anualizado de las inversiones necesarias y de los costos de operación y mantenimiento de la instalación.

Para una comparación simple entre una tecnología convencional y una eficiente, ambas con la misma vida útil (L años) se calcula el CAT *para cada alternativa*.

Para la alternativa convencional, el CAT está dado por:

$$CATC = CC \times FRC(i, L) + PE \times EC + CMC$$

utilizando la misma notación que en Sec. 2.

Para la alternativa eficiente, el CAT está dado por:

$$CATE = CE \times FRC(i, L) + PE \times EE + CME$$

La alternativa eficiente es económicamente rentable, cuando CATE es menor a CATC.

Tal como se señaló, este método puede aplicarse para comparaciones entre más de dos alternativas, cada una compuesta por distintos elementos con distintas vida útil.

Las *inversiones necesarias* corresponderán a cada alternativa analizada (l) y dentro de cada alternativa los distintos elementos, a saber: instalación, lámparas, equipos auxiliares (balastos, etc.), etc. A cada elemento puede identificárselo con el subíndice (j) y tendrá a su vez una vida útil característica N_j . El valor anualizado de las inversiones es la suma de valor anualizado de cada componente:

$$\text{Costo anualizado inversiones (alternativa } l) = \sum_{j=1}^L I_{l,j} \times FRC(i, N_{l,j}) \quad (13)$$

donde,

l : subíndice que señala alternativa l .

j : subíndice aplicado a los distintos elementos que componen la alternativa l : lámparas, luminarias, balastos, etc.

$I_{l,j}$: costo del elemento j correspondiente a la alternativa l

$FRC(i, N_j)$: Factor de recupero de capital, correspondiente a cada elemento j , teniendo en cuenta su vida útil N_j y considerando una tasa de descuento i .

Los *costos de operación y mantenimiento* (O&M) se pueden computar fácilmente en forma anual, por lo que no es necesario anualizarlos, la expresión para calcularlos se muestra en la (14):

$$\text{Costo anual O \& M} = \sum_{k=1}^K O \& M_{l,k} \quad (14)$$

donde:

l : subíndice que señala alternativa l .

k : subíndice aplicado a los distintos elementos que componen el costo de O&M. Energía, potencia, etc.

$O \& M_{l,k}$: costos k de operación y mantenimiento, correspondientes a la alternativa l .

Finalmente sumando (13) y (14) se obtiene la fórmula (15) que permite computar el CAT:

$$CAT_l = \sum_{j=1}^L I_{l,j} \cdot FRC(i, N_{l,j}) + \sum_{k=1}^K O \& M_{l,k} \quad (15)$$

donde:

CAT_l : Costo anualizado total de la alternativa l .

Con los indicadores anteriores el conjunto de alternativas —si éstas eran más que dos— debían ser ordenadas apropiadamente por inversión requerida y energía ahorrada, y comparadas entre pares adyacentes, empezando con las alternativas con menores requerimientos de capital. Este proceso se olvida a menudo con el resultado de seleccionar inversiones no económicas.

En el caso del CAT, a diferencia de los indicadores anteriores, la evaluación se hace por cada alternativa y no comparando sólo entre dos distintas. Esto simplifica el proceso de análisis cuando haya varias alternativas. La alternativa más conveniente quedará determinada por aquella que tenga el CAT menor.

En el caso de este indicador, deberá colocarse especial atención en la obtención de los $I_{l,j}$: costo del elemento j correspondiente a la alternativa l , que **no** resultan de hacer la diferencia entre dos alternativas (ver fórmula (6)) y de los valores $O \& M_{l,k}$: costos k de operación y mantenimiento, correspondientes a la alternativa l , que tampoco surgen como una diferencia (ver fórmula (7))

Este indicador es ideal para establecer un orden entre muchas alternativas, situación muy común en proyectos de iluminación eficiente. El CAT, adicionalmente, proporciona otras ventajas: se puede adaptar la metodología con facilidad para comparar alternativas o sistemas que incluyan componentes de diferente vida útil y b) es posible también comparar la utilidad de reemplazar un aparato todavía con vida por otro más eficiente — el llamado "retiro prematuro" de un aparato en funcionamiento. Si bien es cierto que los otros índices — VAN, TIR— también pueden ser adaptados para estos casos, su cálculo se hace mucho más complicado, fundamentalmente en aquellos casos en donde se tienen muchas opciones para analizar.

2.5. Comparación entre los distintos índices

Debido a que los indicadores a utilizar tienen diversas características, éstas se sintetizan en la Tabla 4 con el objeto de facilitar su selección.

Tabla 4. Características destacadas de los indicadores comparativos.				
Indicador	Se expresa en	Tiene en cuenta		Características generales Sencillez de cálculo (*)
		Vida útil	Valor futuro del dinero	
PSR	años	No	No	Sí
VAN	\$	Sí	Sí	No
TIR	%	Sí	Sí	No
CAT	\$/año	Sí	Sí	Sí

(*) Si el cálculo se realiza con computadora la operatoria será simple en todos los casos, excepto cuando deban compararse alternativas con distinta vida útil.

3. Ejemplos de análisis de la rentabilidad de la iluminación eficiente

En los ejemplos que se darán a continuación, deberán considerarse una serie de elementos importantes a la hora de definir apropiadamente las características de las inversiones.

- Vida útil de la instalación y componentes. Si bien la vida de los componentes es de varios años, extendiéndose en el caso de las lámparas cada vez más, puede ocurrir que la instalación difícilmente se mantenga por un lapso de 20 años como lo indica la vida de alguno de los elementos que la componen. El número de encendidos diarios es también un factor que determina la vida útil en las lámparas de descarga. A mayor número de encendidos, menor vida útil. Por lo tanto si bien una instalación, por ejemplo de pasillos con automático, puede estar encendida un número de horas diarias que haría conveniente el reemplazo de incandescentes por LFCs, no se recomienda la medida —al menos con las tecnologías actuales— debido al deterioro que causa el frecuente encendido y apagado sobre las lámparas.
- Deberá recordarse que los resultados obtenidos en una determinada evaluación dependen fuertemente de los costos de operación y mantenimiento, por lo que deberá evitarse extender las conclusiones obtenidas para una determinada localidad hacia otras. Una medida o proyecto inconveniente en Buenos Aires, por ejemplo, puede resultar provechoso en otra región, en donde los costos por potencia y energía sean mayores, o viceversa. Asimismo, deberá considerarse el tema del momento (año) en que fue realizada la evaluación los costos de operación y mantenimiento como los de la inversión inicial, que en la actualidad varían sensiblemente año tras año.

3.1. Sector Residencial

Este sector es el más sencillo de analizar. La opción tecnológica de iluminación eficiente más común es el reemplazo de una lámpara incandescente por una lámpara fluorescente compacta (LFC) *integral*. Estas lámparas a rosca incorporan el balasto, por lo cual pueden ser colocadas en los mismos portalámparas que alojan a las incandescentes.

Las LFC tienen vida útil declarada por el fabricante de entre las 3.000 y 15.000 horas. Hay modelos que no alcanzan la vida declarada. Las normas requieren una vida declarada de 6.000 horas como mínimo, con otras especificaciones para asegurar la calidad, seguridad y eficiencia de las LFC.

En los ejemplos que siguen, se expresan los precios en pesos convertibles (1 peso argentino igual a 1 dólar EEUU), con los valores vigentes en 1999-2001.

Ejemplo de reemplazo de lámparas incandescentes por LFCs integradas

Se quiere considerar el reemplazo de una lámpara incandescente de 100 W en un ambiente donde se la halla encendida un promedio de 2 h diarias.

El precio de la lámpara incandescente es de \$1, el de la LFC de 20 W (equivalente) de \$15.

La vida útil de la lámpara incandescente es de 1.000 h y el de la LFC, 8.000 h.

Se considera un precio típico de la energía en la zona de Buenos Aires es de \$ 0,1 por kWh con impuestos.

La tasa de descuento utilizada será del 10% ($i = 0,1$)

Cálculo con período simple de repago (PSR)

Utilizando la expresión (11),

$$PSR = \frac{\Delta I}{\Delta O \& M} \quad (11)$$

Se debe considerar que en el cálculo de este índice durante la vida útil de la LFC deberán comprarse 8 incandescentes por lo que:

$$\Delta I = CE - CC$$

$$\Delta O \& M = PE \times (EC - EE)$$

$$CE = \$15; \quad CC = 8 \text{ lámparas} \times \$1 = \$8;$$

$$PE = 0,1 \text{ \$/kWh};$$

$$EC = 0,1 \text{ kW} \times 365 \text{ día/año} \times 2 \text{ h} = 73 \text{ kWh}; \quad EE = 0,02 \text{ kW} \times 365 \text{ día/año} \times 2 \text{ h} = 14,6 \text{ kWh}$$

$$PSR = \frac{(\$15 - \$8)}{0,1 \text{ \$/kWh} \times (73 \text{ kWh} - 14,6 \text{ kWh})} = 1,2 \text{ años}$$

Este valor **no** indica si el reemplazo es rentable. La situación se complica por la distinta vida útil de las dos lámparas.

La vida útil de la LFC (con dos horas de encendido por día) es:

$$N = \frac{8.000[h]}{(2[h/día] \times 365[días/año])} = 10,96 \text{ años}$$

Análogamente, para la lámpara incandescente, la vida útil será de 1,37 años.

Considerando las distintas vida útil, la evaluación económica mediante el uso de los indicadores valor actual neto (VAN) y tasa interna de retorno (TIR) también es difícil. En cada caso, habría que sumar el valor presente de 7 futuras compras de lámparas incandescentes para alcanzar los 11 años que duraría la LFC.

El análisis se vuelve simple con el uso del costo anualizado total (CAT). Para el caso simple de la tarifa residencial, que sólo incluye precio de energía (PE), no de potencia, la ecuación para CAT es:

$$CAT = C * FRC(i, N) + PE * E$$

El factor de recupero de capital (FRC) permite anualizar el valor de una inversión inicial (C) durante la vida útil (n años) utilizando una tasa de descuento d.

El FRC está dado por la ec. (6):

$$FRC = \left[\frac{i \times (1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \right]$$

Para la lámpara incandescente, N = 1,37 años y considerando una tasa de descuento real de 0,1 y

$$FRC (\text{incandescente}) = 0,817$$

$$CAT (\text{incandescente}) = \$ 1 * 0,817 / \text{año} + 0,1 \$/\text{kWh} * 73 \text{ kWh/año} = \$ 8,12$$

Para la lámpara fluorescente compacta, N = 10,96 años; la tasa de descuento es la misma, por lo cual,

$$FRC (\text{LFC}) = 0,154$$

$$CAT (\text{LFC}) = \$ 15 * 0,154 / \text{año} + 0,1 \$/\text{kWh} * 14,6 \text{ kWh/año} = \$ 3,77$$

Es decir, el costo anual de comprar y pagar el consumo energético de la lámpara incandescente es de \$ 8,12, mientras que para la lámpara fluorescente compacta es de \$ 3,77. En este caso, queda claro que (bajo las suposiciones del ejemplo) el uso de la lámpara fluorescente compacta es sumamente rentable.

Parámetros que influyen la rentabilidad

La rentabilidad del reemplazo es función de las *horas de encendido* y las *horas de vida útil* de las incandescentes y de la LFC, el *precio de cada lámpara*, la *tarifa eléctrica* y la *tasa de descuento*. La dependencia de la rentabilidad sobre estos parámetros se ilustra a continuación.

Consideramos el caso de la substitución de una incandescente de 75 W por una LFC de 20 W, una relación de 3,75 a 1.⁶

Para esta ilustración, se supone los siguientes valores:

Vida útil de lámpara incandescente = 1000 horas;

Precio de la lámpara incandescente = \$0,75;

Tasa de descuento *real* = 10%, o sea 0,10 anual.

⁶ Típicamente, los fabricantes de las LFC han reclamado, mediante información en el envase de sus productos que la relación de potencia entre una incandescente y una LFC es de cinco a uno, es decir se puede reemplazar una incandescente de 100 W con una LFC de 20 W, una incandescente de 75 W con una de 15 W, etc. Mediciones en condiciones reales de uso en Argentina han revelado que una substitución con esta relación de potencia, la iluminancia con las LFC es notablemente inferior a aquella de la incandescente, generando rechazo por parte del usuario. Por ello, el Programa ELI en Argentina recomienda una relación de potencia de cuatro a uno. Atento al mismo, la normativa ELI a nivel mundial incluye exigencias respecto a las equivalencias de potencia entre las LFC y las incandescentes.

Caso 1. Tarifa eléctrica de \$0,067/kWh

Consideramos primero una tarifa eléctrica variable de \$0,067 por kWh. Es decir, el usuario paga \$0,067 por cada kWh adicional de consumo, incluyendo todos los impuestos. De esta manera, el cálculo se refiere a la *perspectiva del usuario*.

La rentabilidad de la LFC se aumenta con las horas de encendido diario de la boca de luz en cuestión. Consideramos una con *sólo una hora* de encendido.

En estas circunstancias, una incandescente de \$ 0,75 que dura 1000 horas de encendido duraría 2,74 años. El costo anualizado de compra (considerando la tasa de descuento de 10%) es \$0,33. Es decir el precio inicial de \$0,75 es equivalente a un pago anual de \$0,33 durante la vida útil de la lámpara (2,74 años).

Cada año, esta lámpara consume $75 * 365$ watt horas de electricidad, o sea 27,4 kWh, por un costo de \$1,83.

De esta manera, el costo anualizado de compra y operación de la lámpara está dado por la suma de \$0,33 y \$1,83, es decir \$2,16.

El costo anualizado de compra y operación de cualquier artefacto energético se llama el *costo anualizado total* (CAT) y es una forma de comparar alternativas de distintas eficiencias con distintas vida útil, como en nuestro caso.

La pregunta que hacemos es: ¿Cuál es el precio máximo que el usuario puede pagar para una LFC que provee la misma cantidad de luz que la incandescente de 75 W? A este precio “máximo”, el costo anualizado total de utilizar la incandescente y la LFC son idénticas, en nuestro caso \$2,16.

Hemos decidido que una LFC de 20 W provee la misma cantidad de luz que la incandescente de 75 W. El costo anual de electricidad, suponiendo una hora de encendido, es \$0,49. Para igualar el costo anualizado total de la incandescente, el costo anualizado de la compra de la LFC debe ser $\$2,16 - \$0,49$, es decir \$1,67. ¿Cuál es el precio de la LFC equivalente a este costo anual? Dicho precio depende de la vida útil de la LFC.

Consideramos un modelo con una vida útil de 10.000 horas. Esta LFC duraría 27,4 años y el precio máximo a pagar es \$15,50.

A continuación se grafica el precio máximo a pagar para una LFC en una boca de luz con encendido diario de una hora, según la vida útil de la misma.

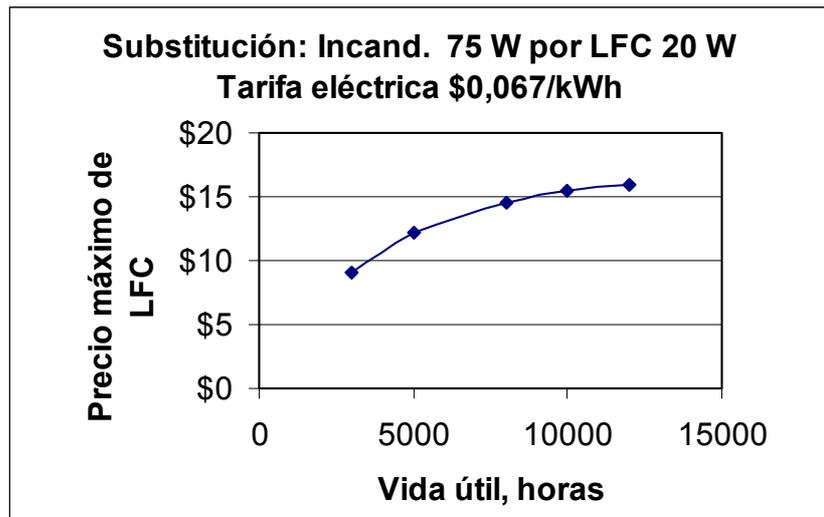


Figura 1. El precio máximo que el usuario puede pagar para una LFC de 20 W que reemplaza una incandescente de 75 W, con una hora de encendido diario, como función de la vida útil de la LFC. Tarifa: \$0,067/kWh.

Al precio máximo calculado y graficado arriba, el usuario es indiferente a la sustitución de lámparas. Se verán ahorros en la medida de que el precio de la LFC es menor que el precio máximo calculado. También se verán ahorros positivos con encendidos mayores a una hora por día.

Por ejemplo, si una LFC de 5.000 horas cuesta \$6, el ahorro neto (valor presente) sería \$6,20. Si otra lámpara fluorescente compacta de 10.000 horas costara \$15, el ahorro neto sería tan sólo \$0,50.

El ahorro neto también aumenta con las horas de encendido diario. Tomando los precios máximos calculados, la gráfica abajo ilustra el costo anualizado total como función de horas de encendido de una incandescente y LFC con distintas vida útil. El ahorro neto anual es cero por una hora de encendido y crece con mayor encendido.

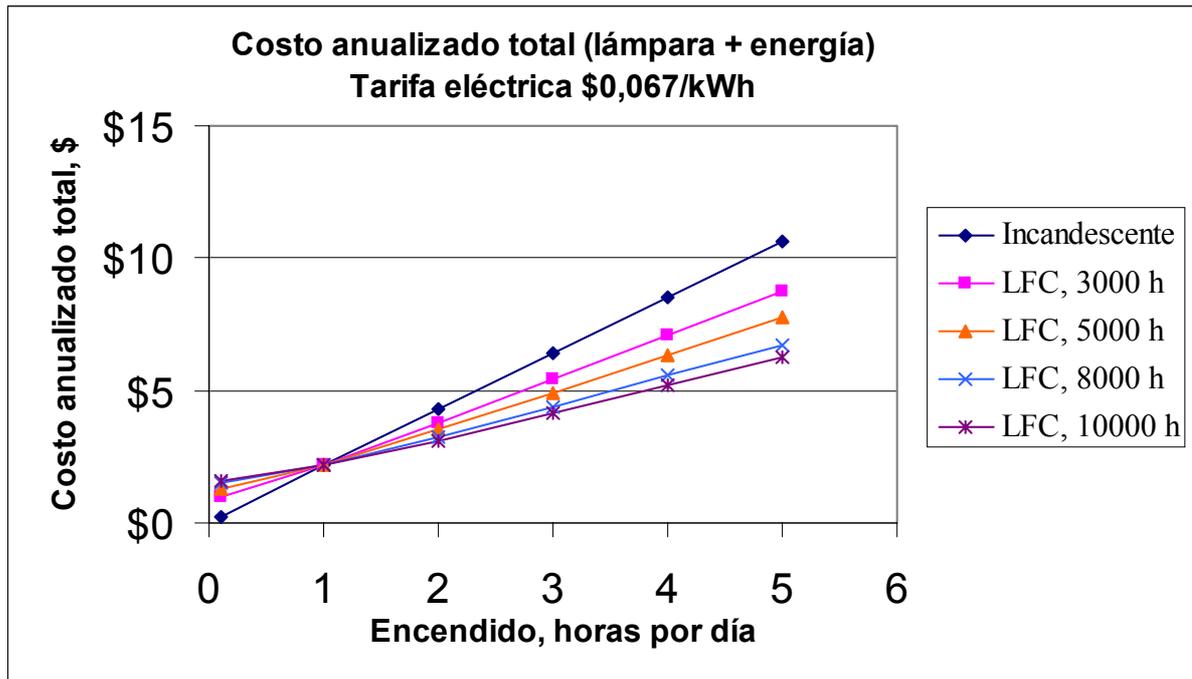


Figura 2. Costo anualizado total para la compra y operación de LFC, según horas de encendido diario. Los precios de LFC corresponden a la gráfica anterior.

Caso 2. Tarifa eléctrica de \$0,11 /kWh

Repetimos los cálculos para una tarifa de \$0,11/kWh. Las tarifas en los dos ejemplos corresponden aproximadamente a las tarifas residenciales T1R2 y T1R1 respectivamente, vigentes en Capital Federal y Gran Buenos Aires. Sin embargo estos valores son típicos para grandes regiones del país. En otras, donde las tarifas residenciales son mayores, las LFC son aún más rentables.

En este ejemplo, se consideran un encendido diario de 0,6 horas por día. Se fija un valor menor por que la LFC es más rentable con una tarifa mayor, como en este segundo ejemplo. Se determinó el valor de 0,6 horas para que igualar el precio máximo a pagar para LFC de 10.000 horas.

Las demás suposiciones se mantienen sin cambios. A continuación se presenta el precio máximo a pagar por una LFC, según la vida útil de las mismas.

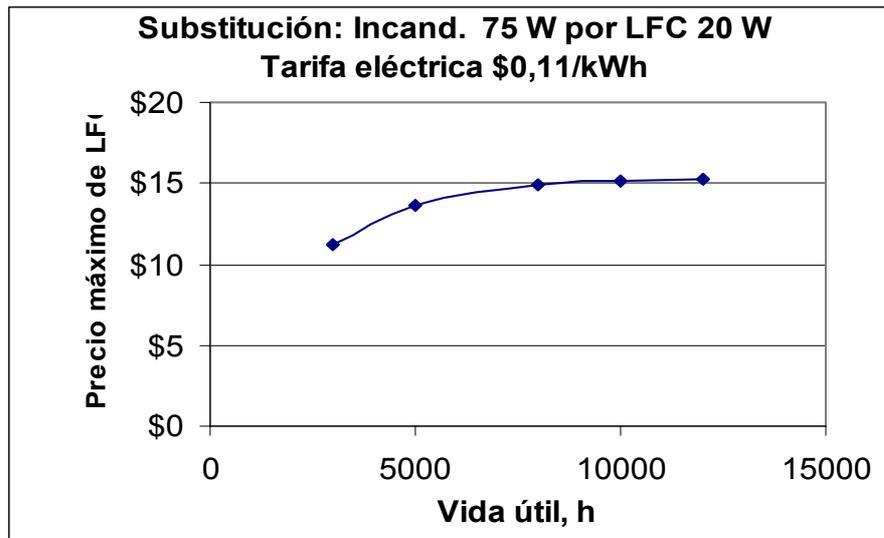


Figura 3. El precio máximo que el usuario puede pagar para una LFC de 20 W que reemplaza una incandescente de 75 W, con 0,6 hora de encendido diario, como función de la vida útil de la LFC. (Tarifa: \$0,11/kWh)

Las figuras 1 y 3 indican precios máximos a pagar para LFC de distintas vida útil correspondientes a dos tarifas eléctricas. Se observa una saturación del precio máximo a pagar para LFC de larga vida. El precio de LFC en el mercado nacional demuestra una variación mayor con respecto a la vida útil. Aquellas de larga vida (10.000 horas o más) superan los \$20 por unidad, mientras que modelos con vida de 6000 horas se comercializan por alrededor de \$12. Para el tiempo de encendido de estos ejemplos, las LFC de larga vida no son rentables, mientras que las de 6000 rinden ahorros netos.

La norma ELI exige una vida útil mínima de 6.000 horas, un valor que parece razonable, desde una perspectiva económica, considerando los costos y beneficios de las LFC como función de la vida útil.

Vida útil

La vida útil de la mayoría de las lámparas fluorescentes compactas depende de la cantidad de encendidos. (Un fabricante de lámparas declara que su línea larga vida de LFC resisten cientos de miles de encendidos.)

Algunas normas definen la vida nominal de lámparas con ciclos de encendido de 3 horas. Sin embargo, mediciones realizadas por la Universidad de Buenos Aires con registradores de luz ("Lighting Loggers") revelan de que la mayoría de las bocas de luz en viviendas en Buenos Aires tiene encendido de menos de 3 horas por encendido. Por ello, la vida útil de las lámparas fluorescentes compactas se reduciría substancialmente respecto al valor nominal.

En los ejemplos de cálculos económicos, se tomaron la vida útil de las LFC igual que su valor nominal, aún considerando una hora o menos de encendido por día. La norma ELI exige que las LFC deben sobrevivir una cantidad de encendidos igual al doble del valor numérico de la vida útil nominal declarada. Por ejemplo, un modelo de LFC con vida útil nominal de 6.000 horas debe resistir 12.000 encendidos.

Por ejemplo, una LFC de vida nominal de 6.000 utilizada una hora por día con un solo encendido (y apagado) por día duraría 6.000 días (según la vida útil) y 12.000 encendidos (o días). En este caso, la vida útil estará determinada por el primer criterio, es decir 6.000 días.

La misma LFC con una hora de encendido por día, pero con *cinco* encendidos por día sufriría 30.000 encendidos en 6.000 horas o 6000 días. En este caso la vida útil se acortará por la cantidad de encendidos, es decir duraría 12.000 encendidos equivalente a 2.400 días.

Tasa de descuento

En los ejemplos anteriores se tomaron un valor del 10% para la tasa de descuento. Este valor es razonable para las personas que comprarían lámparas con efectivo. Sin embargo, si tiene que recurrir al crédito para la realización de la compra, debemos tomar en cuenta que las tasas de interés relevantes en Argentina superan 30% anual. Con estas condiciones la tasa de descuento también es muy alto, y la rentabilidad de las LFC es muy baja. Por ejemplo, en el ejemplo 2 anterior, con una tarifa de \$0,11/kWh, se calcularon los precios máximos a pagar para una CFL como función de la vida útil, considerando *0,6 horas de encendido por día*. Con una tasa de descuento del 40% anual, se obtienen virtualmente los mismos precios, pero para un encendido de *2,4 horas por día*.

Por ello, la financiación para la adquisición de LFC es muy importante para mejorar la rentabilidad y facilitar al acceso a las mismas, sobre todo para familias de menores recursos económicos. La cuestión de financiación se analiza más adelante.

Un criterio simple para determinar la rentabilidad

En síntesis, la rentabilidad depende de varios parámetros. Un análisis económico riguroso no es posible debido a la incidencia de la cantidad de encendidos sobre la vida útil de las lámparas. Considerando una visión pesimista en cuanto a las posibilidades de sustitución, podemos suponer que el reemplazo es rentable para todas incandescentes de 75 W que suma 2,67 horas o más de encendido diario, es decir con un consumo diario de más de 200 watt-horas.

La sustitución es más rentable para lámparas de mayor potencia, ya que el consumo y ahorro energéticos son proporcional a la potencia, pero el precio de la LFC es casi independiente de la misma. Por ello podemos extender el criterio de sustitución a todas incandescentes que suman más de 200 watt horas por día. Es decir, una incandescente con más de 2 horas por día, una de 60 W con más de 3,33 horas por día y una de 40 W con más de 5 horas de encendido.

Este criterio sencillo fue utilizado en el Estudio de Mercado Residencial de ELI. Este estudio, realizado en marzo del 2000, abarcó 800 viviendas en Capital Federal, Gran Buenos Aires, Rosario, Córdoba, Mendoza y Tucumán. Se realizaron un censo de las lámparas según potencia y horas de encendido diario. Considerando las incandescentes con consumo superior a los 200 watt horas diarios, se puede estimar el potencial de ahorro en la sustitución de éstas por LFC. Este potencial es 50%.

3.2. Sector comercial y público

Este sector abarca muchas variedades de edificios con distintas funciones, por lo cual las opciones tecnológicas de iluminación eficiente son múltiples. Sin embargo, el uso de lámparas fluorescentes lineales predomina en muchos edificios. A continuación, se presenta el ejemplo de *reconversión de aulas* de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

(edificio Paseo Colón). El tema fue estudiado por los (ahora) ingenieros Nicolás Sepliarsky y Tomás Rodríguez Rossi, y los resultados que se presentan provienen de su informe.⁷ Ellos analizaron otros aspectos de la iluminación eficiente que no se presentan aquí. Aunque las opciones técnicas siguen válidas, los valores económicos corresponden al año 2000, con el peso convertible. Por tal motivo, el ejemplo es ilustrativo y las conclusiones pueden haber variado luego de la devaluación argentina del 2002.

Situación actual. Las aulas tienen tubos fluorescentes lineales T12 ó T8 comunes (no trifosforos) con balastos electromagnéticos comunes colocado en luminarias sencillas sin ningún tipo de control del flujo luminoso.

Equipos alternativos considerados. Se supone una reconversión de las aulas, con nuevas lámparas, nuevos equipos auxiliares y nuevas luminarias. La idea del análisis económico es comparar las distintas alternativas para determinar la combinación óptima que cumplen con los requerimientos luminotécnicos. Los equipos considerados se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. - Equipos seleccionados considerados para la reconversión de las aulas.

<i>Lámparas</i>	<i>Balastos</i>	<i>Luminarias</i>	<i>Equipo</i>
Tubo trifósforo 36W	Electromagnético	ANFA [1] mod. 1001	Arrancadores c/Reset
Tubo trifósforo 58W	Electromagnético eficiente	ANFA mod. 1011	Capacitores
	Electrónico doble [2]	ANFA mod. 1013	Zócalos
	Electrónico triple [3]		Portarrancadores

Notas.

1. La marca de luminaria elegida en este estudio. Existen otras marcas con modelos equivalentes.
2. Balasto electrónico que opera dos tubos fluorescentes.
3. Balasto electrónico que opera tres tubos fluorescentes.

Lámparas. Basado en un análisis económico previo, se decidieron elegir solamente lámparas T8 trifosforos, por su mejor rendimiento lumínico con costo marginal relativamente menor. Se eligieron potencias de 36 W y 58 W, descartando otras opciones en el estudio anterior.

Balastos. Se consideraron balastos electromagnéticos (que dominan el mercado nacional) y balastos electrónicos que cumplen con normas de calidad y seguridad. También se consideraron la alternativa de balastos electromagnéticos eficientes, aunque esta alternativa no está disponible en el mercado nacional.

Luminarias. Se consideraron varios modelos de un fabricante nacional. La fotometría de los mismos y el software para la diseño de la iluminación están disponibles.

Otros equipos auxiliares. Cuando se utilizan balastos electromagnéticos, se necesitan arrancadores y se debe colocar capacitores para la compensación del factor de desfase entre la tensión y la corriente ($\cos \phi$). Los arrancadores seleccionados tienen "Reset" incorporado para evitar el "parpadeo" del tubo cuando éste se encuentra agotado. Pese a su costo elevado con respecto al arrancador común su empleo se justifica por que se iluminarán aulas de estudio en las que se requiere un máximo confort.

Los precios de los equipos seleccionados se presentan en la tabla 6.

⁷ N. Sepliarsky y T. Rodríguez Rossi, 2000. "Proyecto de iluminación eficiente en el edificio Paseo Colón de la FIUBA", Depto. de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

Tabla 6. Precios unitarios de los equipos seleccionados		
	<i>Ítem</i>	<i>Precio unitario, \$ (incl. IVA)</i>
Luminarias	ANFA 1013 2x36	29,40
	ANFA 1013 2x58	39,40
	ANFA 1001 2x36	34,80
	ANFA 1001 3x36	46,96
	ANFA 1001 2x58	42,47
	ANFA 1011 2x36	64,25
	ANFA 1011 3x36	104,06
Lámparas	Osram Lumilux Plus 58W	2,30
	Osram Lumilux Plus 36W	2,66
Balastos	EM 1x36	1,82
	EM 1x58	2,66
	EME 1x36	3,28
	EME 1x58	4,79
	E 2x36	21,78
	E 2x58	27,83
	E 3x58	41,14
Capacitores	4 μ F	1,57
	6 μ F	1,69
Arrancador	c/reset	2,66

Notes:

EM: Balasto Electromagnético

EME: Balasto Electromagnético Eficiente

E: Balasto Electrónico

Se decidieron la selección de luminarias prearmadas con lámparas y equipos auxiliares. Esto reduce el tiempo y costo de instalación. Los precios prearmados para las distintas combinaciones se presentan en la tabla 7.

Tabla 7. Precio unitario de las luminarias prearmadas con distintas combinación de equipamiento		
<i>Tipo de lámpara</i>	<i>Balasto</i>	<i>Precio unitario con IVA, \$</i>
36W	EM 1x	12,30
	EME 1x	20,00
	E 2x	33,00
	E 3x	58,00
58W	EM 1x	16,00
	EME 1x	26,60
	E 2x	45,00

Se analizaron las dimensiones de todas las aulas del edificio, clasificándolas en 4 categorías para simplificar el análisis. Luego se estableció el diseño de iluminación de las aulas en cada categoría, considerando cada combinación de equipamiento seleccionado. Los resultados se sintetizan en la tabla 8.

Tabla 8. Configuración de iluminación de cada categoría de aula, por tipo de equipamiento								
<i>Luminaria</i>		<i>Balasto</i>	<i>Cantidad de luminarias del aula promedio de la</i>				<i>Cantidad total de luminarias</i>	<i>Potencia instalada, kW</i>
<i>Modelo</i>	<i>Tipo</i>		<i>Categoría 1</i>	<i>Categoría 2</i>	<i>Categoría 3</i>	<i>Categoría 4</i>		
1013	2 x 36	Electromag.	35	19	17	12	737	67,804
		Electromag. Eficiente	35	19	17	12	737	61,908
		Electrónico	36	20	18	12	758	53,060
1001	2 x 36	Electromag.	39	22	20	13	829	76,268
		Electromag. Eficiente	39	22	20	13	829	69,636
		Electrónico	41	23	20	14	868	60,760
	3 x 36	Electromag.	26	14	13	9	553	76,314
		Electromag. Eficiente	26	14	13	9	553	69,678
		Electrónico	27	15	14	9	574	60,270
1011	2 x 36	Electromag.	38	21	19	13	808	74,336
		Electromag. Eficiente	38	21	19	13	808	67,872
		Electrónico	40	22	20	14	858	60,060
	3 x 36	Electromag.	26	14	13	9	553	76,314
		Electromag. Eficiente	26	14	13	9	553	69,678
		Electrónico	27	15	13	9	563	59,115
1013	2 x 58	Electromag.	22	12	11	8	479	69,934
		Electromag. Eficiente	22	12	11	8	479	64,186
		Electrónico	23	13	11	8	489	53,790
1001	2 x 58	Electromag.	25	14	13	9	550	80,300
		Electromag. Eficiente	25	14	13	9	550	73,700
		Electrónico	26	14	13	9	553	60,830

Luego, para cada combinación de tipo de lámpara, balasto y luminaria, se modelan todas las aulas del edificio, ponderando por la cantidad de aulas de cada categoría. Para cada una de las 21 configuraciones, se realiza el análisis económico utilizando el método del costo anualizado total (CAT). Los resultados se presentan en la tabla 9. Dicha tabla incluye la potencia instalada, el consumo anual de energía (que depende de las horas de encendido, determinadas por los autores del estudio), el costo inicial (inversión, incluyendo costo de instalación), el costo anual de energía y potencia para la tarifa eléctrica que corresponde al edificio y el CAT.

Tabla 9. Comparación económica de las alternativas configuraciones.								
<i>Luminaria</i>		<i>Balasto</i>	<i>Potencia instalada [kW]</i>	<i>Consumo anual [kWh]</i>	<i>Costo inicial [\$]</i>	<i>Costo energía anual, \$/año</i>	<i>Costo potencia anual, \$/año</i>	<i>CAT [\$]</i>
<i>Modelo</i>	<i>Tipo</i>							
1013	2x58	Electrónico	53,79	58.541	49.742	2.289	8.656	19.998
1013	2x58	Electromag.	69,93	75.445	42.498	2.950	11.254	22.144
1013	2x36	Electrónico	53,06	58.026	59.883	2.269	8.538	22.275
1013	2x58	Electromag. Eficiente	64,19	69.244	52.652	2.707	10.329	22.490
1001	2x58	Electrónico	60,83	66.011	57.952	2.581	9.789	22.853
1013	2x36	Electromag.	67,80	73.709	52.033	2.882	10.911	24.021
1013	2x36	Electromag. Eficiente	61,91	67.299	63.383	2.631	9.962	24.513
1001	3x36	Electrónico	60,27	65.925	71.094	2.578	9.699	24.795
1001	2x58	Electromag.	80,30	86.963	50.487	3.400	12.922	25.691
1001	3x36	Electromag.	76,31	82.814	56.825	3.238	12.280	25.840
1001	2x58	Electromag. Eficiente	73,70	79.815	62.147	3.121	11.860	26.087
1001	2x36	Electrónico	60,76	66.266	73.257	2.591	9.777	26.199
1001	3x36	Electromag. Eficiente	69,68	75.613	69.599	2.956	11.213	26.395
1001	2x36	Electromag.	76,27	83.520	63.002	3.266	12.273	27.710
1001	2x36	Electromag. Eficiente	69,64	76.258	75.769	2.982	11.206	28.261
1011	3x36	Electrónico	59,11	64.632	101.879	2.527	9.513	29.110
1011	2x36	Electrónico	60,06	65.185	97.682	2.549	9.665	29.650
1011**	2x36	Electromag.	74,34	80.967	85.203	3.166	11.962	30.537
1011	2x36	Electromag. Eficiente	67,87	73.926	97.646	2.891	10.922	31.076
1011	3x36	Electromag. Eficiente	69,68	75.613	101.175	2.956	11.213	31.100
1011	3x36	Electromag.	76,31	82.814	101.175	3.238	12.280	32.450

Obsérvese que la configuración más económica (CAT mínimo = \$ 20.000) este costo es notablemente menor que la configuración similar a la instalación actual (CAT = \$ 30.537, casi el valor máximo).

En términos de metodología, cabe mencionar que este análisis que involucró 21 combinaciones, de lámparas, balastos, luminarias, cada uno con una vida útil distinta sería difícil de realizar utilizando otros índices de rentabilidad. Una vez hecha la selección óptima, se puede computar la tasa interna de retorno (TIR) u otro índice de esta óptima respecto a una configuración de base.

3.3. Alumbrado público

En los sistemas de alumbrado público también se puede comparar distintas configuraciones utilizando los índices de evaluación económica ya mencionados. Sin embargo, suelen realizar la modernización de estos sistemas, abarcando toda una ciudad o grandes secciones de la misma. En este tipo de proyecto, se puede realizar un rediseño del sistema, y evaluar este con la situación actual. Por ello, consideramos como ejemplo, la rentabilidad de la reconversión de alumbrado público en una ciudad argentina.

La ciudad hipotética de nuestro ejemplo cuenta con 100.000 luminarias de alumbrado público. De esas, el 30% son de vapor de sodio de alta presión, el 50% de vapor de mercurio, 10% incandescentes y 10% lámparas mezcladoras. En el centro de Buenos Aires, el encendido de lámparas de alumbrado público es alrededor de 4000 horas al año. La potencia promedio de las lámparas por tipo (incluyendo el consumo de equipos auxiliares) y el consumo anual de energía se sintetizan en el siguiente cuadro.

<i>Tipo de lámpara</i>	<i>Cantidad</i>	<i>W, prom.</i>	<i>MWh</i>
Mercurio A.P.	50000	380	76000
Sodio A.P.	30000	220	26400
Incandescente	10000	350	14000
Mezcladora	10000	250	10000
		Total	126400

En una situación eficiente, se supone que todas las luminarias utilizarían lámparas de sodio de alta presión (SAP). En una posible reconversión para mejorar la eficiencia energética del alumbrado público puede ser los siguiente:

- el reemplazo de cada una de las 50.000 luminarias de mercurio por una de SAP con flujo luminoso equivalente; el flujo luminoso de una luminaria SAP de 220 W es igual que una de mercurio de 380 W.
- Ya que el flujo luminoso de las lámparas incandescentes y mezcladoras es muy inferior a las de sodio, se supone que las 20.000 lámparas en estas categorías se reemplazarían por 10.000 luminarias de SAP, también con potencia promedio de 220 W.

Después de la reconversión, el consumo anual de las 90.000 luminarias de SAP (todas de 220 W) sería 79.200 MWh, una reducción del 37%.

Las tarifas para el alumbrado público en Argentina varían desde 0,07 a 0,20 \$/kWh. Considerando una tarifa de \$0,15/kWh (se esperaría concretar la modernización del alumbrado público en áreas donde la tarifa es mayor que el promedio, donde las inversiones serían más rentables), el costo anual del consumo energético baja desde \$19 millones a \$13 millones.

- Para la compra de lámparas, nuevas luminarias, balasto e ignitor, se supone un valor de \$200 por luminaria; para las 60.000 nuevas luminarias de sodio, esto implica inversiones de \$12 millones.

- Se supone la necesidad de instalar 25.000 nuevas columnas para mejorar la distribución de luz disponible con las luminarias de SAP; a un costo unitario de \$280, incluyendo la instalación, las inversiones adicionales serían \$ 7 millones.

Así, esta reconversión del alumbrado público requeriría \$19 millones.

En términos del período simple de repago, una inversión de \$19 millones resulta en un ahorro anual de \$6 millones, equivalente a un tiempo de recupero para la inversión de unos 3 años.

Sin embargo, a diferencia de inversiones en bienes con una larga vida útil, la situación para el alumbrado público es muy diferente. Las lámparas duran pocos años. Las lámparas de sodio duran más que las de mercurio, que, a su vez, duran bastante más que las mezcladoras. Finalmente, las incandescentes tienen una vida útil de tan solo 1000 horas, comparando con las 24.000 horas de una de sodio.

Además de la lámpara, una instalación incluye equipos auxiliares (un balasto para las de mercurio y sodio, y además un ignitor para la de sodio), la luminaria y la columna. Cada uno de estos elementos tiene una vida útil diferente.

Una manera relativamente fácil de tomar todo esto en cuenta es a través del costo anualizado total de las instalaciones, considerando tanto las inversiones como el consumo energético.

La rentabilidad de cambio en el sistema de alumbrado depende de los siguientes parámetros:

- Características técnicas y costos de los distintos componentes
- Vida útil de los mismos
- Precio de la energía
- Tasa de descuento (costo de capital)

Las características técnicas y costos de los distintos componentes fueron recopilados a partir de información presentado por fabricantes y proveedores de los mismos. Se estimaron la vida útil de algunos elementos, tales como las luminarias y las columnas.

Se realizó una comparación económica de la situación antes y después del cambio, para un rango de valores para la tasa de descuento desde 0,10 (10% anual) hasta 0,20. Se sintetizan los resultados en la tabla 11. La última fila indica el ahorro neto anual entre la situación actual considerando los gastos anuales en equipos y energía. Se observa que dicho ahorro excede los 6 millones de pesos al año a una tasa de descuento del 10%. El ahorro disminuye lentamente con el aumento en la tasa de descuento, alcanzando una cifra de \$5,36 millones para una tasa de descuento del 20% anual.

A pesar de las simplificaciones implícitas en nuestro cálculo, la conclusión parece clara: la modernización descrita es muy rentable y dicha rentabilidad no es muy sensible a la tasa de descuento.

Tabla 11. Análisis económico de la modernización del alumbrado público en una zonal urbana hipotética									
4000 horas por año									
100.000 puntos de luz									
0,15 \$/kWh									
			Tasa de descuento						
			0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	
			Costo Anualizado Total (energía + equipo)						
			<-----Millones de pesos----->						
Antes	Cons. energía anual								
	MWh	Milln. \$							
50000 Mercurio	76000	11,40	12,70	12,83	12,97	13,12	13,27	13,42	
30000 Sodio	26400	3,96	4,83	4,92	5,01	5,11	5,20	5,30	
10000 Incand.	14000	2,10	2,28	2,28	2,29	2,29	2,29	2,30	
10000 Mezcl.	10000	1,50	1,63	1,64	1,65	1,66	1,68	1,69	
	126400	18,96	21,44	21,68	21,92	22,18	22,44	22,71	
Después									
90000 Sodio	79200	11,88	14,50	14,76	15,04	15,32	15,61	15,91	
Considerando la instalación de									
25000 columnas nuevas, a \$280 c/u			15,32	15,70	16,09	16,50	16,92	17,35	
Diferencia (ahorro)			6,12	5,98	5,83	5,68	5,52	5,36	