

PERSPECTIVAS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA ILUMINACIÓN: DESAFÍOS PARA EL DESARROLLO

Leonardo O. Assaf (1) & Fernando O. Ruttkay Pereira (2)

(1) Instituto de Luminotecnia, Luz y Visión “Ing. Herberto Bühler”
Universidad Nacional de Tucumán
Av. Independencia 1800, San Miguel de Tucumán, República Argentina.
e-mail: lassaf@herrera.unt.edu.ar

(2) Universidade Federal de Santa Catarina, CTC – ARQ
Laboratório de Conforto Ambiental
e-mail: feco@arq.ufsc.br

RESUMEN

Se discute la definición del concepto *eficiencia* en iluminación, vinculado a las necesidades de la arquitectura, el confort y la satisfacción del usuario. Los consumos anuales por iluminación en el Brasil (38 TWh) y la Argentina (12 TWh) presentan bajos índices de eficiencia (casi 7W/m² x 100lx) comparados a los europeos (3W/m² x 100lx). Incluyendo el aprovechamiento de la luz natural, el caudal de energía que se puede ahorrar con tecnología de eficiencia en ambos países es enorme, probablemente del 80%. Por último se consideran los diversos factores intervinientes en el aprovechamiento energético de la luz natural y los procedimientos propuestos para predecirlo (HUNT, 1979; ASSAF, 1999; REINHART, 2001; SOUZA y PEREIRA, 2002). Las discrepancias entre los diversos sistemas considerados pueden ser explicados por la inclusión o no de las actitudes de los usuarios en el modelo de aprovechamiento.

ABSTRACT

The concept of *lighting efficiency*, linked to the necessities of architecture, comfort and user's satisfaction is discussed. Lighting installations in Brasil and Argentina account a yearly consumption of about 38 TWh and 12 TWh respectively, with low efficiency index (almost 7 W/m² x 100lx) compared with european's index (3 W/m² x 100lx). If daylight use is included, the energy that could be saved in both countries by efficiency technology is huge, probably of 80% of the current consumption. Diverse factors involved in *daylight use* are considered together with different procedures proposed to predict it (HUNT, 1979; ASSAF, 1999; REINHART, 2001; SOUZA y PEREIRA, 2002). The differences found among the considered systems can be explained by the inclusion or not of users' attitudes and behavior.

1. QUÉ ES EFICIENCIA EN LA ILUMINACIÓN

La iluminación ha ocupado siempre un lugar importante en los más diversos discursos sobre energía. Ello tiene su razón; las instalaciones de alumbrado disipan casi un cuarto de toda la generación eléctrica y —además— constituyen el grupo de consumo con la más alta capacidad de remisión de energía, más del 50%. Aprovechar semejante potencial sin menoscabo de la calidad de una iluminación, precisa la adopción de extensas políticas de eficiencia, objetivo que —por la complejidad del problema— ofrece sus dificultades. La

eficiencia en iluminación es un concepto que todavía no ha sido definido con precisión. Hay cierta dificultad de encuadrar la iluminación en una relación del tipo medios/fines o, si se quiere, costo/beneficio, que fundamente el concepto de eficiencia. Luego, definir cómo es posible la “medición” o caracterización de tal relación.

Para definir la eficiencia de un sistema de alumbrado es necesario saber claramente qué es lo que se espera de una iluminación. Consideraciones insuficientes o simplificadas sobre esto conducirían a conclusiones erróneas e inaplicables, tal como ha ocurrido algunas veces, subordinando la eficiencia al mero ahorro energético. Por otro lado, las especificaciones y objetivos de una iluminación son permanentemente motivo de investigación y aun de controversias (MILLS y BORG, 1998) y sus alcances ofrecen hasta hoy ilimitadas ramificaciones. Vamos a intentar un repaso sobre esta situación.

1.1 La iluminación: entre la percepción visual y las necesidades de la arquitectura

La primera referencia sobre lo que una iluminación debe brindar la constituye aquel que desarrolla sus actividades en el ambiente iluminado, el ser humano. La notable capacidad de adaptación de su sistema visual le permite realizar sus tareas bajo muy distintas condiciones de alumbrado. Esta característica posibilitaría la utilización de una mínima cantidad de energía y así satisfacer *objetivos de ahorro*, aunque con ello no se lograría de ninguna manera *eficiencia*. Existen otras razones que promueven un mayor gasto de energía; se trata de la vinculación perfectamente demostrada entre *condiciones de iluminación* con *productividad* y *bienestar*.

Esta es la aproximación —desde lo que podría denominarse la *Eficiencia Laboral*— aportadas principalmente por Blackwell y Weston, que ha predominado en la ciencia de la iluminación en todo el siglo XX, imponiendo un esquema simplificado pero efectivo acerca de “qué es iluminar”, que perdura hasta el presente: a mayor nivel de iluminación, corresponde una mayor productividad (BLACKWELL, 1946; WESTON, 1927, CIE, 1981). Tal modelo fue enriquecido luego con la incorporación del confort¹, con el concepto *deslumbramiento*, dando paso al modelo de la *ergonomía laboral*. De acuerdo con ese criterio, generalmente aceptado, las “condiciones de iluminación”, objetivo de un alumbrado, pueden ser especificadas mediante los siguientes parámetros (NARISADA, 1999):

- 1- Nivel de iluminancia,
- 2 - límite al deslumbramiento.

1.2 Las necesidades de los espacios

¿Entonces lograr buena visibilidad y confort satisficaría *todos* los objetivos de la iluminación?. No; prueba de ello son las diferentes soluciones aplicables para la iluminación de una oficina o un restaurante, aún que en ambos casos se presente la misma necesidad visual. La iluminación es un importante elemento para crear *atmósfera* o *ambientación interior*. La ambientación se transforma en un elemento más de la expresión arquitectónica y en este sentido *puede tener una elevada significación energética*, superando en algunos casos la demandada por necesidades visuales.

La descripción de esa relación, es decir, de la valoración subjetiva de *atmósfera* o *ambientación* con parámetros de la instalación es objeto de estudio y discusión internacional,

¹ El término *confort* se usará en el presente trabajo como una alternativa del término *bienestar*, referido exclusivamente a situaciones relacionadas con las condiciones de visión.

lo que da idea de la preocupación en la búsqueda de un modelo más complejo de iluminación, aunque sin resultados hasta ahora.

1.3 El nuevo enfoque: la neurofisiología de la luz y la oscuridad

Por su posible impacto en la iluminación y la arquitectura, no puede dejar de mencionarse la creciente atención de la ciencia sobre los efectos de la luz y la oscuridad en la neurofisiología humana, que inciden en el ánimo, la salud y el comportamiento de las personas. Diversas investigaciones, recopiladas en el documento (Draft) de la Comisión Internacional de Alumbrado, CIE, TC 6-11 (CIE, 2003) "Ocular Lighting Effects on Human Physiology, Mood and Behaviour", coinciden sobre las consecuencias de la modificación de los hábitos humanos del trabajo y el descanso por el uso extendido de la iluminación artificial y las alteraciones que ello produce en su sistema endócrino.

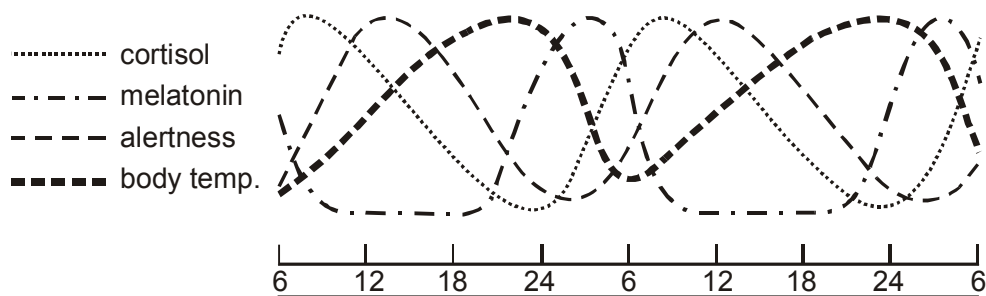


Figura 1: Funciones biológicas humanas con ritmos circadianos

Fuente: CIE. TC 6-11 (CIE, 2003)

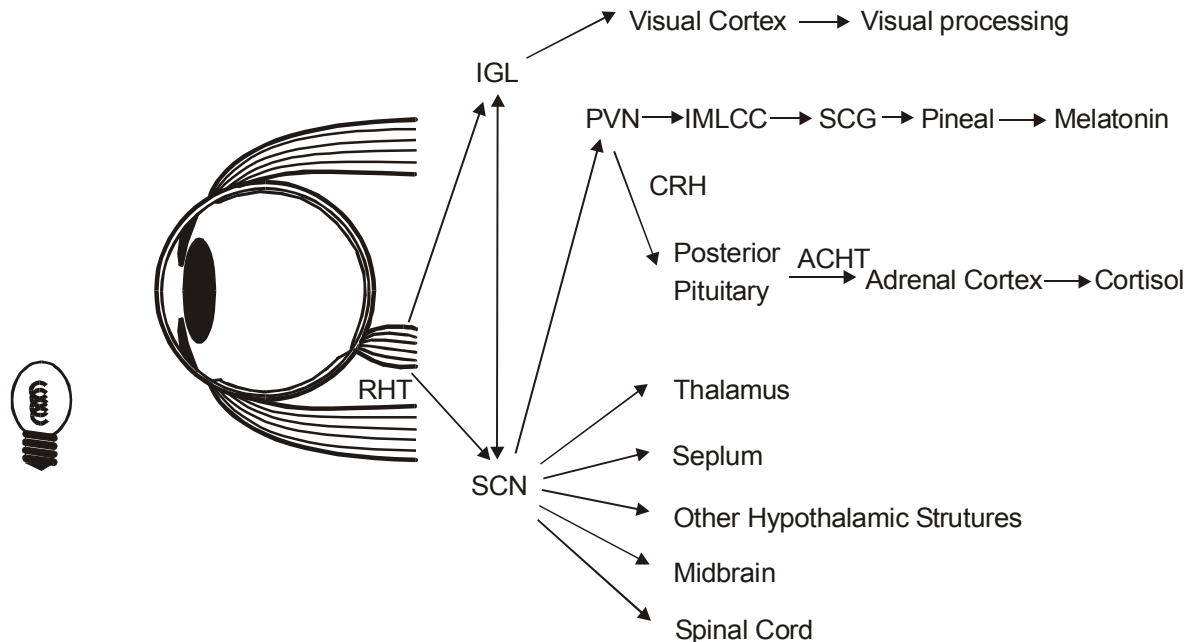


Figura 2 – Diagrama de las diversas vías de la conexión ojo-cerebro. Se observa el camino visual y el camino no visual. Fuente: CIE. TC 6-11 (CIE, 2003)

La figura 1 muestra importantes funciones biológicas que tienen ritmos circadianos, la temperatura corporal y el nivel de alerta, junto con la secreción de *cortisol* y *melatonina*, dos hormonas vinculadas a la regulación del nivel de actividad, motricidad y el descanso humano. La luz que entra por los ojos es el más importante estímulo medioambiental de regulación del

sistema circadiano. El diagrama esquemático de fig. 2 muestra las diversas vías de la conexión ojo-cerebro. La luz recibida por el ojo es convertida en señal neuronal que sigue dos caminos, uno visual y otro no-visual. La técnica de la iluminación, tal como está concebida hasta el presente, se basa únicamente en los efectos *visuales* de la luz procesada en la corteza visual, sin considerar su influencia como reguladora neurobiológica. Lo cierto es que la iluminación eléctrica ha producido profundos cambios en la vida y salud humanas; creando ambientes (días) artificiales cuyos rasgos característicos, relacionados con la exposición de las personas a la luz/sombra, se resume como sigue:

Modificaciones ambientales de la luz artificial

- Ha alargado la duración del día, acortando —consecuentemente— la noche. El medio ambiente en las horas de descanso suele poseer un (relativamente) elevado nivel de radiaciones modificando así la secreción de melatonina; por otro lado,
- La permanencia durante muchas horas en ambientes con niveles de iluminancia —relativamente— bajos, como los provistos por la luz eléctrica, implica para sus ocupantes una dosis de radiación muy inferior a la que recibirían en exteriores a la luz del día con 5, 10 o 100 klx de iluminancia. Ello afecta la secreción de cortisol.

Algunas conclusiones referidas a la relación de la exposición a la luz y la salud humana, que establece el documento de la CIE citado, son las siguientes:

Efectos sobre la salud humana

- La buena salud se relaciona no sólo con una suficiente cantidad de exposición a la luz, sino también con una saludable oscuridad.
- Las alteraciones en el ciclo circadiano están asociados a diferentes tipos de cáncer y afecciones inmunológicas.
- Hay indicios de que la dosis de iluminación recibida por las personas de los países occidentales podría ser *insuficiente* para su salud.

Las repercusiones que tendrán estas investigaciones en la arquitectura y/o en los hábitos de las personas son, por el momento, impredecibles. De hecho ya está teniendo sus efectos. Las propuestas para contrarrestar una dolencia relacionada con la insuficiente exposición a la radiación luminosa, denominada SAD (Seasonal Affective Disorder), es uno de ellos. La denominada “Terapia de iluminación” incluye la venta de productos (aparatos de iluminación para terapia en el hogar, vicerías luminosas y otros), hasta la habilitación de lugares públicos que ofrecen “Lighting therapy”, en sus mesas de café iluminadas con 20.000 lux.

2. ESPECIFICACIONES DE UNA BUENA ILUMINACIÓN. LA NORMA DE ALUMBRADO

Este es, sucintamente, el estado del arte sobre los objetivos de la luz en el ser humano y en los espacios. ¿Cómo se incorpora todo este conocimiento en el diseño de las instalaciones de iluminación? ¿Existen normas o guías que orienten al diseñador sobre estos temas?. Muy pocas.

Las “condiciones de visión y confort” son satisfechas mediante *parámetros fotométricos* de la instalación; las normas de diseño dan una aceptable orientación sobre cómo calcular tales parámetros. A diferencia de estos, la *Ambientación*, es un requerimiento de carácter subjetivo, que apela al juicio de los ocupantes de los espacios; no puede ser expresada con parámetros mensurables o calculables de la instalación, por lo que “crear atmósfera” mediante una determinada iluminación, queda librado al criterio del diseñador del espacio. Esta libertad del diseñador, si bien favorece la expresión y creatividad, puede resultar en un consumo elevado

de energía en las instalaciones. La normalización europea ha buscado un –poco elegante– límite a esto, estableciendo la cantidad de energía máxima que se puede disponer en cada proyecto de alumbrado.

En cuanto a la neurofisiología de la exposición a la luz, el conocimiento que se tiene es aún incipiente para formular recomendaciones o normas sobre el diseño de instalaciones, aunque es necesario considerar la tendencia en la arquitectura de países desarrollados hacia una mayor admisión de la luz natural en los interiores. ¿Son estas tendencias de países nórdicos industrializados recomendables para países como los nuestros?. No, si se toma en consideración latitudes, clima e idiosincrasias muy diferentes. Apropriados hábitos de trabajo y descanso pueden dar mejores resultados que modificaciones en la arquitectura o la iluminación.

Conclusión: desde el punto de vista del diseño, la única especificación objetiva de una instalación corresponde a la derivada de la ergonomía laboral, por lo que el modelo de Blackwell y Weston formulado a principios del siglo pasado –aunque de limitada significación para el medio ambiente visual– aún sigue vigente.

3. EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UN SISTEMA DE ILUMINACIÓN

Establecidos cuáles son sus objetivos y (en menor medida) cómo lograrlos, el alumbrado puede ser considerado como un sistema conversor costo/beneficio en donde la energía, de origen eléctrico, es transformada en “condiciones de visión, confort y atmósfera visual”. (fig.3).

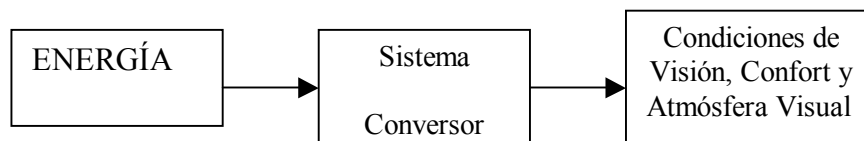


Figura 3 – La iluminación como un sistema conversor de energía

La conversión debe realizarse con la menor cantidad de energía posible², siempre que las *condiciones visuales* estén aseguradas. Esto –y no otra cosa– es la *eficiencia energética máxima*.

Si las Condiciones Visuales y de diseño del espacio de un local están satisfechas, puede evaluarse la eficiencia de su alumbrado, mediante la cantidad de energía E que está disipando:

$$E = P \cdot t \quad [\text{Eq.01}]$$

Siendo P el valor medio de la potencia de la instalación durante el intervalo de tiempo t

La ecuación [01] pone de manifiesto embrionariamente conceptos innovadores; la eficiencia en iluminación puede lograrse o bien *minimizando la potencia* (P) o *minimizando el período de tiempo* (t), dos aspectos fundamentales en el tratamiento de la eficiencia; aquel *intrínseco a la instalación*, relacionada con la potencia (P) y otro, el tiempo de encendido (t) o *uso* que se haga de ella.

² Esto es una simplificación ya que la energía no es el único costo del alumbrado, aunque el más importante, representando un 75% – 85% del total.

4. LA EFICIENCIA DE INSTALACIONES Y LA NECESIDAD DE INDICADORES

La eficiencia máxima de una instalación es la mínima potencia 'P' para lograr los atributos de una buena iluminación. ¿Cómo puede medirse? La evaluación requiere de indicadores adecuados. Los índices de eficiencia son muy usados, pero limitados tal como se verá.

Siendo la instalación un conjunto de elementos, puede concebirse entonces que su eficiencia está conformada por la combinación de las eficiencias de cada uno de ellos:

$$\eta = \varepsilon \cdot \beta \cdot \rho \cdot \delta \quad [\text{Eq. 02}]$$

Donde:

η = Eficiencia total (de la instalación) [lm/W]

ε = Eficiencia de lámpara [lm/W]

β = Eficiencia del equipo auxiliar

ρ = Eficiencia del artefacto de iluminación³

δ = Eficiencia del diseño de la instalación³

Resulta así que η es el principal indicador de eficiencia de una instalación por que involucra todos los componentes del problema, aunque existen otros índices más difundidos. La *densidad de potencia de iluminación* (Pe) o “potencia específica”, definida como la *potencia* disipada por la instalación (W) por unidad de *superficie* del ambiente iluminado (m^2), es un índice que puede ser encontrado en numerosos códigos y manuales de referencia, tales como la norma ASHRAE/IES 90.1 y en la propuesta sello de eficiencia energética en edificaciones PROCEL/ELETRORÁS del Brasil. Los valores típicos de Pe se sitúan entre 10 y 50 W/ m^2 .

Otro índice es la *potencia específica de iluminación*⁴, (Pei) igual a la *densidad de potencia de iluminación* por cada 100 lux, o sea, *la potencia (Watt) necesaria para producir 100 lux de iluminación horizontal por unidad de superficie* (W/100 m^2 lx):

$$Pei = 100 \cdot P / S \cdot Eh \quad (\text{W/ } m^2 \times 100\text{lx}) \quad [\text{Eq. 03}]$$

$$Pei = 100 / \eta \quad (\text{W/ } m^2 \times 100\text{lx}) \quad [\text{Eq. 04}]$$

El Pei , incluido en el código de la CIBSE de la Gran Bretaña de 1993 y su modificación de 1995, es un poco más didáctico, pues facilita la comparación de diferentes tipos de locales, independientemente de su superficie y de su nivel de iluminancia y tiene valores típicos entre los 7 y los 3 W/ m^2 100lx.

5. MATRIZ DE EFICIENCIA NACIONAL

Los índices mencionados pueden ser utilizados para la evaluación energética de una instalación, de un edificio o –en un plano más general– para todas las instalaciones de un país. El conjunto de índices representativos de las instalaciones nacionales (η) y de sus

³ El producto de la eficiencia del artefacto (ρ) y el diseño (δ), suele ser citada como *utilancia*, $u = \rho \cdot \delta$

⁴ El IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España) lo denomina *Índice de Eficiencia Energética*, IEE. (IDAE, 2001).

componentes (ε , β , ρ , δ), conforman, para cada sector de consumo, la *matriz de eficiencia nacional*. Como una fotografía instantánea, esta matriz permitiría evaluar la situación nacional y sustentar políticas de eficiencia.

La importancia de esta información es proporcional a las dificultades que implica la tarea de su recopilación, cuando no se dispone de una política de sistematización y recopilación de datos nacionales, situación que se presenta tanto en la Argentina como en el Brasil. Por ejemplo, la eficacia media de lámparas, ε –el índice que mayor incidencia tiene en el modelo de componentes– puede derivarse en forma precisa de la eficacia de todas las lámparas consumidas anualmente en el país, con lo cual se puede construir la *matriz de consumo y eficiencia de lámparas*, esto es, la cantidad de lámparas usadas anualmente, discriminadas por tipo y potencia (Tablas 2 y 3). Tal información es retaceada por razones comerciales por los fabricantes. Para el caso argentino, la única información que pudo ser obtenida es no oficial y corresponde al año 1994 (Tabla 2), ningún dato posterior fue dado a conocer hasta el presente. En el caso brasilero, las referencias encontradas, al menos se hallan publicadas (TOLMASQUIM et al., 1998; HELLER, 1994) y corresponden también al año 1994.

5.1 Índices Nacionales de eficiencia. El caso de Argentina y Brasil

¿Cómo determinar si una instalación es o no eficiente? No existe todavía ningún patrón internacionalmente aceptado sobre este tema, en consecuencia, debe recurrirse a la comparación con otras instalaciones que puedan servir de referencia. Si se trata de analizar la situación de un país, la comparación podría hacerse con otros países que puedan servir de referencia. Diversas circunstancias pueden argumentarse a favor de la necesidad de una comparación mutua entre la situación de la Argentina y Brasil, aunque para una evaluación de eficiencia ello no sea suficiente; es necesario la comparación con otros países, tales como aquellos de la OECD⁵ y con el “estado del arte”, esto es, la máxima tecnología disponible.

El Departamento de Luminotecnia de la UNT ha estado trabajando en este tema por más de 10 años, siguiendo el doble procedimiento para la determinación de la *Pei* promedio de las instalaciones argentinas; esto es, mediante el relevamiento de un número importantes de instalaciones y a partir de índices típicos de componentes. Los resultados obtenidos con ambos procedimientos son compatibles entre sí. Para la comparación se ha procurado obtener datos del Brasil y de otros países, tarea en la que actualmente se halla empeñado. La necesidad de conocimiento de la situación de las instalaciones de los países de la región alienta una mirada introspectiva, favoreciendo el intercambio de información y la asociación de grupos de estudio regionales.

⁵ OECD: Organización de Cooperación y Desarrollo Económico.

Tabla 2 – Significación del alumbrado en el consumo de electricidad, basado en el mercado de lámparas, Argentina 1994.

Tipo de Lámpara	Venta x 10 ⁶ /año (1)	Vida útil [horas] (2)	Potencia Media [W] (3)	Consumo [TWh]
Incandescente	115,00	940	65	6,68
Fluoresc.Comp	0,20	4500	14	0,01
Fluoresc.T8	4,20	6500	40	0,93
Fluoresc.T12	7,80	6500	50	2,15
Vapor de mercurio	0,35	12000	300	1,20
Vapor de sodio	0,25	15000	220	0,70
Mezcladoras	0,70	1800	250	0,30
Otro	0,40	1500	100	0,05
TOTAL	--	--	--	12,02

Fuentes: (1) (3) Datos no oficiales de Osram Arg. y Philips Arg. (1994), (2) Estimaciones propias basadas en datos del banco de ensayo de lotes de lámparas.

Tabla 3 - Significación del alumbrado en el consumo de electricidad del Brasil, basado en el mercado de lámparas, 1994.

Tipo de lámpara	Venta x 10 ⁶ /año (1)	Vida útil [horas] (2)	Potencia Media [W] (3)	Consumo [TWh]
Incandescentes 60/100	238	940	65	13.81
Incandescentes 54/90 (4)	22	940	68	1.34
Incandescentes (otras)	44	900	100	3.76
Fluorescentes 20/40	36	6500	30	5.97
Fluorescentes SUSAP (5)	0,222	6500	37	0.04
Fluorescentes 16/32	0,832	6500	20	0.09
Fluorescentes compactas	0,444	4500	14	0.02
Vapor de Mercurio	3,10	12000	300	10.60
Vapor de Sodio	0,36	15000	220	1.01
Luz Mixta	4,60	1800	250	1.97
Incandescente halóg. de baja tensión	0,30	1500	60	0.02
TOTAL	--	--	--	38,63

Fuentes: (1) (3) Tolmasquim et al.(1994), (2) Estimaciones propias basadas en datos del banco de ensayo de lotes de lámparas. (4) Especiales para baja tensión de red (o eficientes). (5) Arranque rápido 37W.

La Eficiencia luminosa media de lámparas
Para la República Argentina es de
32,4 lm/Watt
(1994)

Calculado en base a datos de tabla 2, considerados apropiados factores de reposición. (ASSAF, 1999)

La Eficiencia luminosa media de lámparas
para la el Brasil es de
32,31 lm/Watt
(1994)

Calculado en base a datos de tabla 3, considerados apropiados factores de reposición. (ASSAF, 1999)

Tabla 4 – Datos significativos para Argentina y Brasil, sector iluminación, año 1994.

	ARGENTINA	BRASIL
Consumo en iluminación	12,5 TWh	38,19 TWh
Significación en el consumo general de electricidad (1)	26%	16%
Comercio (2)	50%	40%
Hogar (3)	30 %	31 % (4)
Eficiencia general de lámparas (5)	32,4 lm/W	32,3 lm/W
Potencia específica de iluminación (6)	6,7 W/100 lx m ²	6,6 W/100 lx m ² (7)
Potencial de remisión del consumo con índices de Europa (OECD)	7 TWh	21 TWh
Potencial de remisión del consumo con índices del estado del arte	10 TWh	32 TWh

Fuentes citadas anteriormente: PROCEL, CAMMESA, ABILUX y otras.

(1)(2)(3) Porcentaje del consumo eléctrico del sector correspondiente a iluminación

(4) Supuesto un hipotético reemplazo de la electricidad por gas en el calentamiento de agua de residencias del Brasil.

(5) Según ponderación de Tablas 2 y 3.

(6) Assaf y Dutt, 1999

(7) En base a relevamientos parciales y considerando datos de lámparas y fotométricos de luminarias.

6. INCLUSIÓN DEL FACTOR DE USO EN LA EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE ILUMINACIÓN

El *uso* o *control* eficiente de una iluminación es la minimización del tiempo de conexión de la carga de la instalación, basado en las siguientes premisas:

I - Aprovechamiento de los posibles aportes de luz natural proveniente de ventanas o aberturas varias.

II- Evitar el desperdicio de energía por luces innecesariamente encendidas en locales sin uso o desocupados.

La aparición en el mercado de los denominados Sistemas Automáticos de Control de iluminación (SAC) –dispositivos que reemplazan al usuario en el control del alumbrado– ha incrementado el interés por conocer el aprovechamiento y desperdicio de la energía que se asocian al control manual; ¿cómo se produce el derroche?, ¿cuánto es en un determinado local?, ¿cuanta energía de la luz natural puede aprovecharse?, etc, etc.

La energía eléctrica (kWh) ahorrada o perdida a causa de los usuarios que controlan la instalación en un determinado período de tiempo, está conformada por *fracciones* de energía que se producen en cada uno de los locales que componen el edificio. Cada fracción de energía –a su vez– está definida por una potencia de remisión o conexión de la instalación de alumbrado, por el período de tiempo que dure.

Se han propuesto los indicadores denominados **Derroche por factor ocupacional, (Dfo)** y **Contribución Energética de la Luz Natural (CELN)** (ASSAF y AVELLANEDA DE WILDE, 2000) para distinguir dos circunstancias, una, el *aprovechamiento energético del alumbrado natural (energía ahorrada)*, la otra, el *desperdicio por factor ocupacional (energía perdida)*. Ambos pueden ayudar a estimar en unidades de energía el aprovechamiento y derroche que se produce en un edificio.

6.1 Contribución Energética de la Luz Natural, *CELN*

La Contribución Energética de la Luz Natural se define como *la relación de la potencia de luz desconectada por causa del ingreso de luz natural, respecto de la potencia total de la instalación de iluminación*, asociado a la siguiente situación:

1. El local está ocupado
2. Hay suficiente aporte de luz natural
3. La instalación de alumbrado se halla desconectada total o parcialmente a causa de la presencia del alumbrado natural

Conviene expresar esta relación como el cociente entre unidades de consumo, es decir potencia de luminarias apagadas y encendidas.

$$CELNi(t) = \frac{Psi(t)}{Pi} \quad [\text{Eq. 05}]$$

Donde:

$CELNi(t)$ = *CELN* del local *i* en el momento *t* del relevamiento.

Pi = Potencia instalada de iluminación del local *i* (W)

$Psi(t)$ = Potencia de luces sustituidas por la luz natural (W)

6.2 Derroche energético por factor ocupacional, *Dfo*

De manera análoga, el derroche energético por factor ocupacional, *Dfo*, se define como *la relación de potencia de luces encendidas en locales sin ocupantes, respecto de la potencia conectada total*, cuando se verifica que:

1. El local está desocupado
2. La instalación de alumbrado se halla conectada total o parcialmente

En ese caso:

$$Dfoi(t) = \frac{Pdi(t)}{Pi} \quad [\text{Eq. 06}]$$

Donde:

$Dfoi(t)$ = Derroche por factor ocupacional en el local *i* en el instante *t*

$Pdi(t)$ = Potencia de luces encendidas si el local *i* en el instante *t* no está ocupado

Pi = Potencia instalada de iluminación del local *i*

Ambos coeficientes, *CELN* y *Dfo*, deben sustentarse estadísticamente, es decir, representar razonablemente las diferentes situaciones que se presenten en los locales. En principio puede admitirse que la variabilidad del *CELN* se origina –principalmente– en las variaciones que se producen en la luz natural admitida, según las características de cada local, a lo largo de las horas del día, el clima, las estaciones, etc. No es ése el resultado obtenido de un extenso relevamiento de instalaciones realizado por el Instituto de Luminotecnia de Tucumán que mostró que el comportamiento de los usuarios es determinante en el aprovechamiento de la luz natural.

6.3 Los resultados del relevamiento de instalaciones

A los efectos de determinar la significación del factor de uso, a partir de 1992 el Instituto de Luminotécnica de Tucumán ha desarrollado un procedimiento de evaluación de los indicadores descritos. El relevamiento –realizado en forma manual– abarcó un número importante de instalaciones y se continúa hasta el presente. En el año 1999 se utilizaron data-loggers en combinación con detectores de presencia para la colección automática de datos y la confrontación con el método manual.

Los resultados obtenidos sobre la magnitud del derroche ocupacional son expuestos en forma resumida en Tabla 5. Posteriores experimentos convalidaron los resultados en edificios no-residenciales, entre otros, el trabajo de Love (1998) (Tabla 6) realizado en edificios de la Universidad de Pursue, Canadá que arroja resultados coincidentes a los obtenidos por el procedimiento propuesto en Tucumán en 1994.

En base a estos resultados es posible sostener que 1º) el comportamiento de los usuarios de edificios no-residenciales en cuanto a este aspecto es coincidente en diversos países y 2º) puede admitirse que el *Dfo* excede el 20% del consumo energético en iluminación.

Tabla 5 –Derroche ocupacional en iluminación residencial y no residencial

Tipo de edificio	Derroche (<i>Dfo</i>) promedio
Residencias Unifamiliares (1)	(7±2)%
Administración estatal (2)	(23±4)%

Fuente: (1) Sobre 4608 datos obtenidos con data loggers y detectores de presencia, en 8 viviendas unifamiliares de San Miguel de Tucumán. *Proyecto Sistemas Innovativos en Iluminación*, 2000.

(2) Sobre 653 muestras obtenidas por relevamiento de 6 edificios de San Miguel de Tucumán. *Releva, Proyecto Lámparas y equipos Auxiliares*, 1994. (Assaf y Cisint, 1994).

Tabla 6–Derroche ocupacional, de oficinas, según Love (1998)

Local bajo prueba	Proporción de horas con luces encendidas en locales vacíos
A1	28 %
A2	20 %
A3	38 %
A4	28 %
A5	0 %
A6	24 %
Promedio	(23 ± 5)%

Fuente: *Lighting Research & Technology*, V30 N1, 1998.

7. LA CONTRIBUCIÓN ENERGÉTICA DEL ALUMBRADO NATURAL

El aprovechamiento del alumbrado natural en los edificios está determinado por una compleja conjunción de factores que abarcan, desde la disposición de luz natural en los ambientes y el confort visual, hasta el comportamiento de los usuarios.

Iwamoto y colegas (1994) han informado sobre la influencia de la pre-adaptación del sistema visual en la percepción del ambiente iluminado por la luz natural y en la consecuente reacción del usuario, lo cual es obvio. Las luminancias de los espacios abiertos e interior se sitúan en una relación de 1 a 100 o más⁶. La consecuente falta de adaptación incidirá en un más bajo aprovechamiento por que hará aparecer la iluminación del local subjetivamente menor si el ingreso ha sido precedido por una exposición a elevadas luminancias de espacios abiertos.

A los efectos de un mejor análisis, los factores que determinan el aprovechamiento de la luz natural pueden ser agrupados en estratos que comprenden variables *físicas, fisiológicas y psico sociales* (figura 5). El comportamiento de los usuarios, está determinado por los aspectos *fisiológicos de la visión* y los que constituyen sus propias *actitudes*. Cuando la voluntad de los individuos se ejerce sin limitaciones, las actitudes son especialmente relevantes; en este caso los resultados pueden ser mejor explicados con modelos de comportamiento; por el contrario, si existe algún tipo de condicionamiento, por ejemplo, interés en el buen uso de la energía o aflicción por el derroche, el usuario ajustará su comportamiento a las pautas de la percepción visual. En este caso la *apariencia visual*, relacionada con el nivel de iluminancia del ambiente, guiará sus reacciones, por lo que un modelo perceptual será mas apropiado para describir la situación. Esta particularidad explica las diferencias observadas entre los valores obtenidos mediante la determinación del coeficiente *CELN* por relevamiento y *predictivo propuesto por D. Hunt, (1979)*, o las que pueden encontrarse con otros modelos, tales como el de Reinhart (2001) y Souza (2003), tal como se verá.

D. Hunt (1979), investigador del Building Research Establishment, BRE, de Gran Bretaña, realizó una serie de experimentos y observaciones sobre comportamiento de usuarios de edificios no residenciales, correlacionando la *probabilidad de abstención de encendido* de la luz al ingresar al local, con el *coeficiente de luz diurna Cld* y el *nivel de iluminancia mínimo* en el plano de trabajo, producido por la luz natural. El arreglo experimental, consistente en la toma de imágenes fotográficas secuenciales para un estudio del comportamiento (LITTLEFAIR, 1999), sugiere que los ocupantes de los edificios estudiados, sintiéndose observados por las cámaras de los investigadores, pudieron haber modificado sus pautas de comportamiento. Según este modelo, los usuarios se guían *exclusivamente* por sus percepciones visuales, sin tomar en cuenta las *actitudes*. Por lo tanto el aprovechamiento resultante se corresponde *aproximadamente* con la cantidad de luz natural disponible en los ambientes.

Reinhart (2001) desarrolló un método dinámico de simulación – DAYSIM – introduciendo el concepto *autonomía de luz diurna* que describe la disponibilidad anual de iluminación natural en cualquier punto de un edificio. La *autonomía de luz diurna* está expresada como la fracción de tiempo en la cuál la luz natural excede un valor preestablecido de iluminancia horizontal. Si el intervalo de tiempo es el correspondiente a la horas de ocupación anual del espacio – por ejemplo, días de semana entre 7 a.m. y 6 p.m. – y la iluminancia es la requerida por el tipo de local – por ejemplo 500 lux horizontal – la fracción determinada por este procedimiento representará el tiempo anual en el cual la luz natural puede proveer por sí sola las necesidades de iluminación del espacio.

Souza (2003), presenta el parámetro PALN –Porcentual de aprovechamiento de la luz natural– que estima el período en el que la luz natural puede ser efectivamente utilizada para *substituir o complementar* la iluminación eléctrica. Su determinación está basada en una serie de simulaciones computacionales, que posibilitan la división de un ambiente en zonas de iluminación caracterizadas por similares distribución de iluminancias. El PALN permite

⁶ correspondiente a un coeficiente de luz diurna, *Cld*, típico de 1%.

evaluar el desempeño del sistema arquitectónico del edificio (aberturas y ambiente interior), frente a diversas opciones de control de la iluminación eléctrica, para 3 condiciones de cielo, ponderadas por la probabilidad de ocurrencia de cada uno de ellos. Los PALNs calculados en diferentes modelos arquitectónica presentan valores entre 10% a 80%, según la configuración arquitectónica, la iluminancia adoptada en el proyecto y el sistema de control de la iluminación artificial (SOUZA y PEREIRA, 2002).

Buscando la validación de los procedimientos propuestos en Tucumán, se calculó la predicción del ahorro con el modelo de Hunt y se obtuvo por relevamiento el ahorro verificado con el coeficiente *CELN*. La tabla 7 muestra las discrepancias obtenidas siguiendo ambos procedimientos. En edificios no-residenciales, donde las actitudes de los usuarios se ejerce sin ningún condicionamiento y el procedimiento para la obtención del coeficiente *CELN* no altera esta situación, los resultados muestran el predominio del comportamiento sobre la percepción visual. Resultaría así que el modelo de Hunt representa el máximo aprovechamiento posible de la luz natural con el control manual. Con igual procedimiento podría inferirse que los modelos de Souza y Reinhart representan el aprovechamiento que puede obtenerse con un sistema automático de control, sólo dependiente de las variables físicas del edificio (Figura 5).

Mientras que del *CELN*, representa el aprovechamiento verificado. La diferencia de este con aquellos es el *potencial* de energía que puede obtenerse con una mejor actitud de los usuarios sobre el uso razonable de la energía (Hunt) o instalando un sistema automático de control (Souza).

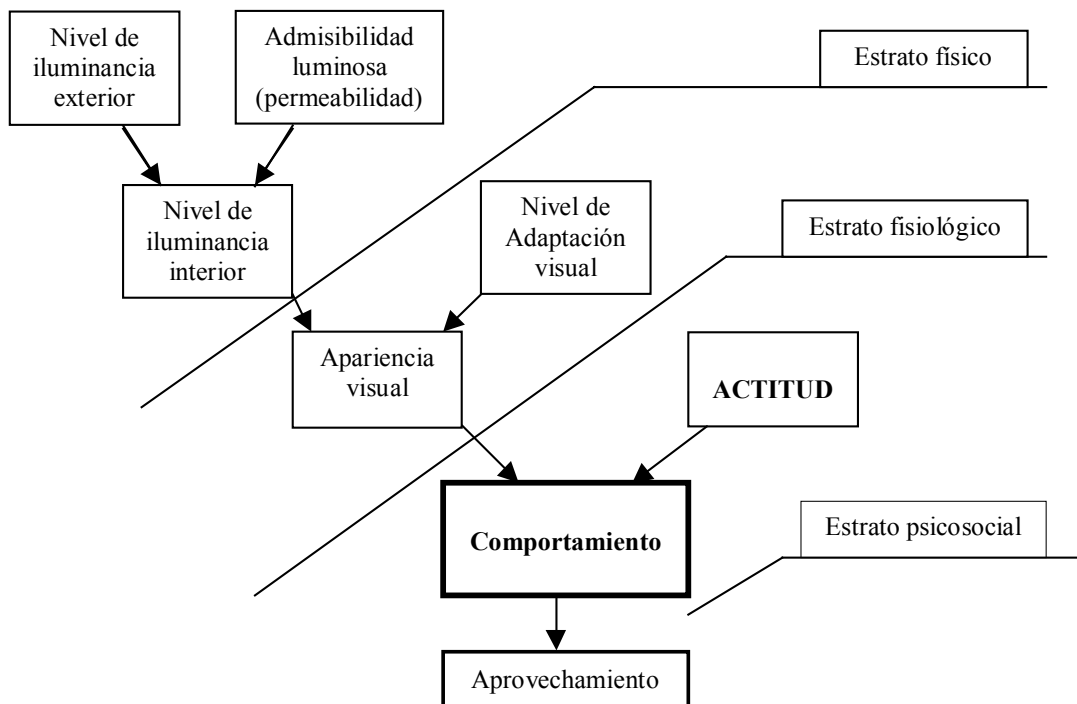


Figura 5: Factores que conforman los tres estratos del comportamiento de un usuario en el aprovechamiento energético de la luz natural

Tabla 7 – Variación del coeficiente CELN según el tipo de local analizado.

TIPO DE LOCAL	CELN <i>obtenido</i> por relevamiento	CELN calculado con el modelo de HUNT
Oficinas	3%	24%
Laboratorios	4%	35%
Aulas	2%	16%
Servicios Sanitarios	0%	25%
Talleres	6%	41%
TOTAL	3,96%	28,2

8. CONCLUSIONES

El arte de la iluminación encierra una serie de conceptos que exceden los alcances de las actuales especificaciones que orientan el diseño, sean normas, códigos y recomendaciones, muy influenciadas por la ergonomía laboral. Tal es el caso de la ambientación, difícil de representar con parámetros de la instalación. Ello limita el desarrollo de la eficiencia a aquellas instalaciones en donde el rendimiento visual es preponderante.

En lo que respecta a las situaciones de la Argentina y el Brasil, las similitudes que se insinúan en los datos recopilados por el Departamento de Luminotecnia de Tucumán, parecen reflejar el predominio de idénticos factores de conformación del mercado, lo que se manifiesta en las matrices de eficiencia de lámparas y en los índices de instalaciones (Tabla 4). Muy probablemente, tales factores puedan deberse a la influencia en el mercado de los mismos fabricantes de lámparas.

La necesidad de una comparación mútua, alienta la realización de estudios y sistematización de información conjunta. El enorme caudal de energía que es posible reducir en los circuitos de iluminación, puede justificar un mayor esfuerzo de la ciencia hacia este problema; considerando similares condiciones del alumbrado y tomando en cuenta que en ambos países es posible lograr índices de eficiencia equivalentes a los europeos ($3 \text{ W/m}^2 \text{ 100lx}$), el consumo que podría ahorrarse por reducción de la potencia de las instalaciones de iluminación es probablemente el más elevado de entre todos los consumos finales de la electricidad (Tabla 4).

En el denominado “factor de uso”, los datos recopilados revelan una clara diferenciación del comportamiento de los usuarios, a manera de casos extremos, en el edificio residencial y el no-residencial. En estos últimos, el derroche por factor ocupacional representa más del 20% del consumo del alumbrado, mientras que el aprovechamiento de la luz natural en los edificios estudiados es escaso, inferior al 4%, lo que contrasta claramente con las predicciones de Hunt (1979) o Souza y Pereira (2002).

El comportamiento del usuario que controla el alumbrado en edificios no-residenciales, juzgado como “poco eficiente”, ha impulsado el uso de los Sistemas Automáticos de Control de la iluminación. ¿Son, entonces, los SAC la solución tecnológica que anuncia la materialización de ahorros que los usuarios no pueden o quieren obtener? No tanto como lo creen algunos. Las reacciones adversas de los ocupantes de locales hacia una política de ahorro de energía que se extiende hasta el propio control de las instalaciones de luz es la mayor limitación de esta tecnología, máxime cuando se persiguen ahorros de una manera exagerada. En esto conviene ser cautelosos; la satisfacción de los ocupantes involucra valores que se encuentran mas allá de cualquier beneficio económico que puedan lograrse, muy por encima de las metas de ahorro de energía.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE/IES 90.1. Energy Efficient Design of New Buildings, Except Low-Rise Residential Buildings.
- ASSAF, L. (1999). *Metrología de la Eficiencia en sistemas de iluminación, incluyendo el aprovechamiento energético del alumbrado natural*. Tesis doctoral, Escuela de Postgrado en Luz y Visión, Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión, Ing. Herberto C. Bühler, Universidad Nacional de Tucumán.
- ASSAF, L. & AVELLANEDA DE WILDE MI. (2000). "Un procedimiento para mensurar la contribucion energetica efectiva del Alumbrado Natural en edificios". Trabajo presentado el Vº Congreso Panamericano sobre Iluminación *LUXAMERICA 2000*. San Pablo, Brasil, Abril.
- ASSAF, L., CASADO JC., AYUB F. (2000). "Situación de la iluminación residencial en San Miguel de Tucumán, según una encuesta", (inédito), Informe del proyecto CIUNT *Sistemas Innovativos en Iluminación*. Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión, "Ing. Herberto C: Bühler", UNT.
- ASSAF, L. & CISINT, C. (1994). "Uso y mantenimiento de instalaciones de alumbrado de edificios no-residenciales desde una nueva óptica: la Administración Energética". Revista ELECTROTECNIA Nº 6, órgano de la Asociación Electrotécnica Argentina, Nov. - Dic.
- BLACKWELL, HR. (1946) "Contrast thresholds of the human eye". J. op.Soc. Amer. 36, pp 624-643.
- CIE, (1981). Commission Internationale d'Eclairage, Technical Report Nr.19/2, An analytical model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance.
- CIE, (2003). Comisión Internacional de Alumbrado, TC 6-11. Draft "Ocular Lighting Effects on Human Physiology, Mood and Behaviour".
- CLEAR, R. & BERMAN, S. (1990). "Speedy, accuracy and VL". Journal of the Illuminating Engineering Society, pp3-13, 19(2) pp 124-131.
- HUNT, D.R.G. (1979). "The use of artificial lighting in relation to daylight levels and occupancy". *Building and Environment*, 14, 21-33.
- IDAE, (2001) (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España). Guía Técnica de Eficiencia Energética en Iluminación. Oficinas. Madrid, España, Marzo 2001.
- IESNA - Lighting Handbook Reference & Application, 8th. Edition, (1993). Illuminating Engeneering Society of North America.
- IWAMOTO, R., IWATA, T. & SHUKUYA, M. (1994). "An experiment on the relationship between variation of exposed illuminance for subjects and brightness sensation" Proceeding of Arch Inst. Japan Conference (citado en *Predicting Lighting Energy use under daylight linked Lighting Controls*, Littlefair P, comunicación personal, 1998).
- LITTLEFAIR, P. (1999). Comunicación personal. Impreso: *Predicting Lighting Energy use under daylight linked Lighting Controls*.
- LOVE, J. (1998). "Manual switching patterns in private offices" *Lighting Research &*

- Technology, 30 (1) (1998): pp.45-50.
- MILLS, E. & BORG, N. (1998). "Rethinking Lighting levels" boletín de la Asociación Internacional de Iluminación Eficiente, IAEEEL Newsletter, 1/98 pp 4-8.
- NARISADA, K. (1999). "Balance between energy, environment and visual performance". CIE 24th. Session, Warsaw, pp 17-22, June.
- TOLMASQUIM, M., PINGUELLI ROSA L et alt. (1998). *Tendências da eficiência elétrica no Brasil. Indicadores de Eficiência Energética* . ISBN 85-285-0030-6. ENERGE COPPE/UFRJ. Procel/Electrobrás.
- REINHART, C.F. & WALKENHORST, O. (2001). "Dynamic RADIANCE-based Daylight Simulations for a full-scale Test Office with outer Venetian Blinds", Energy & Buildings, Vol. 33 pp/ 683-697.
- SOUZA, M.B. de & PEREIRA, F.O.R. (2002). "Potencialidade de Economia de Energia Elétrica gasta em Iluminação através do Aproveitamento da Luz Natural com a Utilização de Sistemas Automáticos de Controle". In: IX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2002, Foz do Iguaçu - Brasil. v. CD Rom, p. 1-8.
- SOUZA, M.B. de (2003). *Potencialidade de Aproveitamento da Luz Natural através da Utilização de Sistemas Automáticos de Controle para Economia de Energia Elétrica*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Eng. de Produção – UFSC, Florianópolis/SC – Brasil.
- WESTON, H.C. & TAYLOR, A.K. (1927). "The relation between Illumination and Efficiency in fine work (Typesetting by hand)". Joint. Rep. Industry Fat. Res. Board Illum. Res. Comm. (D.I.S.R.), London HMSO.