Capítulo 7. Administración de energía en sistemas de iluminación

7.1 Introducción

A pesar de no ser el sector de mayor uso de la energía, la iluminación es significativa porque entra virtualmente en cada fase de la vida moderna. Las oportunidades para ahorrar energía requieren prestar atención a muchos parámetros no-eléctricos.

Los sistemas de iluminación son instalados para permitir que las personas puedan ver. Se le debe prestar atención no solo a la economía y a la eficiencia, sino también al tipo de trabajo que hacen las personas y al espacio en el que lo hacen. La iluminación también afecta otros parámetros ambientales y del edificio, especialmente aquellos que enfrían espacios ocupados dentro del edificio. Todos esos factores deben ser integrados dentro del proceso de diseño.

7.2 Definiciones de términos básicos de iluminación

7.2.1 Balastro. Un dispositivo usado con lámparas de descarga eléctrica para proporcionar el voltaje y la corriente necesarios para el arranque y funcionamiento de la lámpara

7.2.2 Candelas de potencia. Intensidad luminosa expresada en candelas

7.2.3 Coeficiente de iluminación (CU). La relación entre la cantidad de flujo luminoso recibido en el plano de trabajo y la cantidad de flujo luminoso emitido por las lámparas de la luminaria solamente.

7.2.4 Rendimiento de color. Una expresión general del efecto de una fuente de luz en la apariencia de color de los objetos comparada con la apariencia de color bajo una fuente de luz de referencia.

7.2.5 Iluminación general. Iluminación diseñada para producir un nivel sustancialmente uniforme de iluminación en toda un área, excluyendo cualquier provisión para requerimientos de locales especiales. Ver: Luz de tarea.

7.2.6 Deslumbramiento. La sensación producida por brillos dentro del campo visual que son suficientemente mayores que la luminancia a la cual los ojos están adaptados para causar molestia, pérdida de confort, o pérdida en desempeño visual y visibilidad.

7.2.7 Iluminación. Una condición en donde la luz incide sobre una superficie u objeto

7.2.8 Lámpara. Término genérico para una fuente de luz hecha por el hombre.

7.2.9 factor de depreciación de lúmenes de la lámpara (LLD). El factor usado en cálculos de iluminación para cuantificar la salida de fuentes de luz al 70% de su vida esperada como un porcentaje de su salida inicial.

7.2.10 Rejillas (*Louver*). Una serie de pantallas usadas para cubrir una fuente de luz de la vista en ciertos ángulos, o para absorber luz no deseada. Las pantallas usualmente son dispuestas en patrones geométricos.

7.2.11 Lumen (lm). Una unidad de flujo luminoso.

7.2.12 Luminaria. Una unidad de iluminación completa consistente de una lámpara o varias lámparas, junto con las partes diseñadas para distribuir la luz, para posicionar y proteger la lámpara, y para conectar las lámparas a la alimentación de potencia.

7.2.13 Factor de depreciación de suciedad de la luminaria (LDD). El factor usado en iluminación para relacionar la iluminación inicial producida por luminarias limpias, nuevas con la iluminación que producirán debido a la acumulación de polvo en un punto particular en el tiempo.

7.2.14 Luminancia. Una medida de la cantidad de flujo luminoso (lúmenes) por unidad de área reflejada de o transmitida a través de una superficie.

7.2.15 Contraste de luminancia. La relación entre la luminancia de un objeto y la del fondo inmediato.

7.2.16 Eficacia luminosa. Una medida de la eficiencia de la lámpara en términos de la salida de luz por unidad de entrada eléctrica expresada en lúmenes por watt.

7.2.17 Polarización. El proceso por el cual las ondas de luz son orientadas en un plano específico.

7.2.18 Reflectancia (de una superficie o medio). La relación entre flujo reflejado y flujo incidente.

7.2.19 Iluminación de tarea. Iluminación diseñada para producir iluminación sobre tareas visuales usualmente a niveles mayores que las áreas circundantes.

7.3 Concepto de sistema de iluminación

Un sistema de iluminación es aquella porción del sistema eléctrico que alimenta las lámparas o balastros junto a los controles asociados tales como interruptores y *dimmers*. El sistema también incluye las fuentes de luz, luminarias, pantallas, y medios de control óptico, el espacio completo a ser iluminado, y la naturaleza de la iluminación requerida. La efectividad del sistema completo se expresa en *figuras de mérito*. Un diagrama generalizado de este sistema y figuras de mérito asociadas se da en la Figura 7-1.

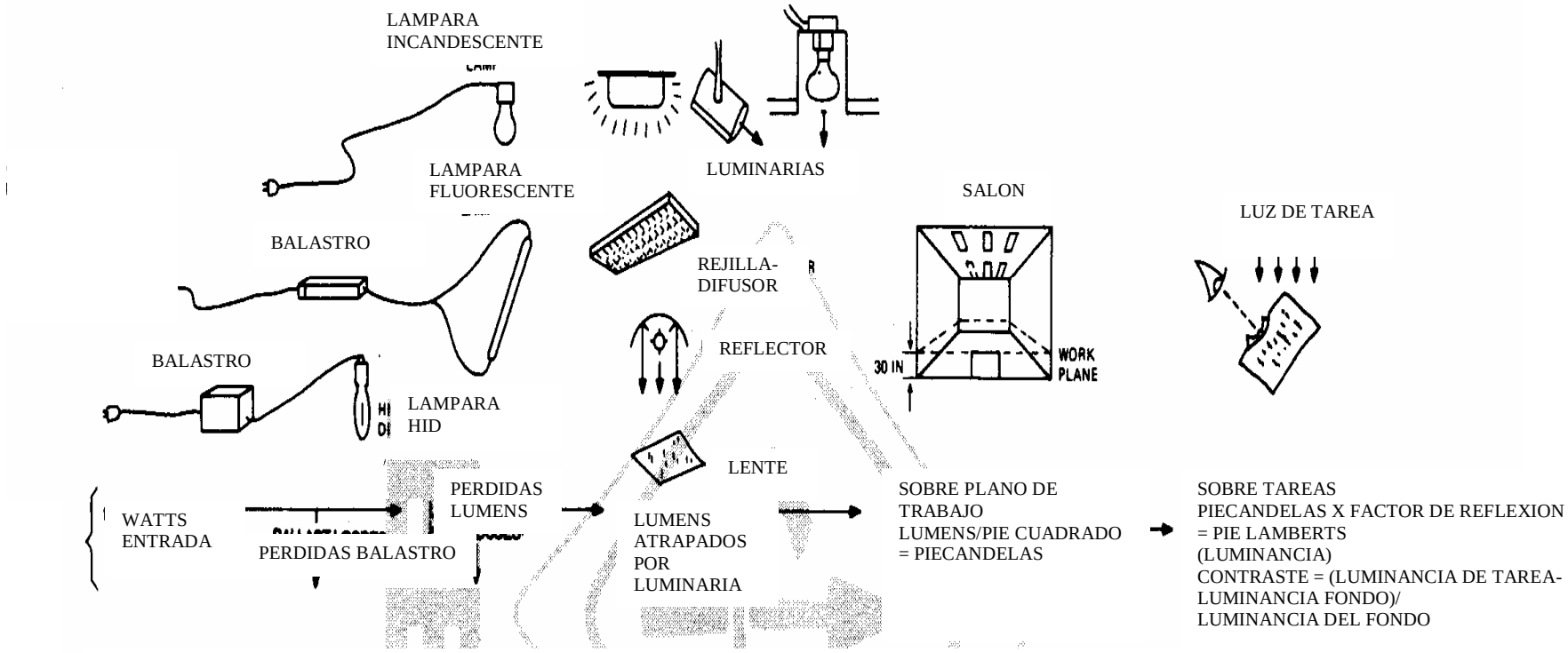

Figura 7.1 Sistema de iluminación total

El ojo humano no es igualmente sensible a todas las longitudes de onda del espectro visible. Los colores en la región de verde y amarillo producirán una sensación de brillo en el ojo con menos potencia radiante que la que producirán longitudes de onda en la región azul y roja del espectro. Las unidades de iluminación o unidades fotométricas toman en cuenta esta respuesta de sensibilidad en sus definiciones. Las magnitudes fotométricas se aplican por lo tanto a la respuesta visual humana en lugar de hacerlo respecto a los efectos radiantes de la energía.

7.4 Diseño de iluminación eficiente

A pesar de que el salón más eficiente puede ser uno en el que las superficies y muebles son altamente reflejantes, este espacio puede ser sicológicamente y estéticamente cuestionable. Las recomendaciones típicas para las reflectancias de superficies de salones se muestran en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1. Reflectancias recomendadas para superficies de oficinas

Superficie	Rango equivalente de la superficie
Acabado de cielos	80-90%
Paredes	40-60%
Muebles	25-45%
Máquinas y equipo de oficina	25-45%
Pisos	20-40%

Es importante considerar la luminancia de las superficies que rodean la tarea visual para evitar cambios grandes de contraste que provocan fatiga y pérdida de confort. La Tabla 7-2 resume las relaciones recomendadas que pueden ser usadas durante la planificación general.

Tabla 7-2. Relaciones de luminancia recomendadas

Para conseguir un balance confortable en la oficina, puede ser deseable y práctico limitar las relaciones de luminancia entre áreas de tamaño apreciable desde puntos de visión normales, de la manera siguiente
1 a 1/3 entre tarea y zonas adyacentes
1 a 1/5 entre tarea y superficies oscuras más remotas
1 a 5 entre tarea y superficies luminosas más remotas
Esas relaciones son recomendadas como máximos; las reducciones son generalmente beneficiosas

7.5 Fuentes de luz

7.5.1 Eficiencia de las fuentes de luz

La tabla 7-3 muestra como se coloca la energía en las diferentes fuentes luminosas. Una fuente de luz se puede caracterizar por su salida de luz, color, mantenimiento de luz, etc. Una medida más útil es la eficacia luminosa de la lámpara, la cual es la cantidad de luz emitida por la lámpara por watt de entrada eléctrica. Tal como se indica en la tabla 7-4, la

lámpara incandescente tiene la eficacia más baja, entre 10-20 lm/watt; y el mercurio es aproximadamente el doble, cerca de 50 lm/watt.

Tabla 7-3. Valores nominales iniciales de datos de energía de lámparas (en %)

Tipo de lámpara				Conducción y convección	Balastro
	Luz	Infrarrojo	Ultravioleta		
Incandescente (100 W)	10	72	-----	18	-----
Fluorescente (40 W)	20	33	-----	30	17
Fluorescente (40 W) excluyendo balastro	24	40	-----	36	----
Mercurio (400 W blanco deluxe)	15	47	2	27	9
Haluro metálico (400 W claro)	21	32	3	31	13
Sodio alta presión (400W)	30	35	0	20	15
Sodio baja presión (180W)	29	4	0	49	18

Tabla 7-4. Eficacias de lámparas en lúmenes

Fuente	Watts	Lúmenes/watt entrada aproximados[a]
Incandescente	40 W servicio general	11
Incandescente	1000 W servicio general	22
Fluorescente	2 24 en blanco frío –T12	50
Fluorescente	2 48 en blanco frío – T12	77
Fluorescente	2 96 (800mA) en blanco frío	73
High intensity discharge (HID)	400 W mercurio revestido con fósforo	50
HID	1000 W mercurio revestido con fósforo	55
HID	400 W haluro metálico	75
HID	1000 W haluro metálico	85
HID	400 W sodio alta presión	100

[a]Solamente lámpara

7.5.2 Características de fuentes de luz

Las fuentes de luz deben acoplarse a las restricciones ambientales. Por ejemplo, las lampares fluorescentes son generalmente las más eficientes para un sistema de iluminación general interior, en donde, el área iluminada mayor de la lámpara puede ser utilizado efectivamente para distribuir luz. En alturas montañosas elevadas o en donde el área de iluminación será controlada óptimamente de manera más estrecha, las fuentes más pequeñas, de mayor intensidad son más eficientes. La Tabla 7-5 brinda una guía general acerca del desempeño de las lámparas y de las características de aplicación.

7.5.3 Cromaticidad y rendimiento de color

La cromaticidad es una indicación de que tan fría o que tan cálida es una fuente de luz y se mide en términos de una escala de temperatura de color en grados Kelvin (ver figura 7-2). Entre mayor la temperatura de color aparente de una fuente de luz, más fría aparece al ojo humano. Las fuentes con temperaturas de color elevadas parecen ser las preferidas en niveles de iluminación elevados pero el gusto personal también influye.

El rendimiento de color describe que tan bien la fuente de luz hace que los colores de los objetos aparezcan de acuerdo a un patrón definido. Esto es muy subjetivo y las personas se refieren a su propia experiencia o a las condiciones de luz diurna externa como su patrón personal. Las características de distribución espectral de las fuentes de luz brindan una clave acerca de la habilidad de rendimiento de color de éstas, si el espectro visible es llenado generalmente entre los límites de la visión humana (longitudes de onda desde 400 nm hasta aproximadamente 750 nm), el rendimiento de color será mejor que si la fuente tiene emisiones sólo en una banda estrecha o porciones del espectro visible. Las comparaciones visuales lado a lado y las instalaciones de prueba son una guía más confiable para evaluar el rendimiento de color y la aceptabilidad de color. El índice de rendimiento de color CIE (Ra) es una medida usada frecuentemente de la habilidad de una fuente de luz para rendir colores en un modo natural y normal.

Tabla 7-5. Características de salida de lámparas

Guía de selección de lámpara para iluminación general interior										
Lámparas	**Incandescentes**			**Fluorescentes**			**Descarga de alta intensidad**			
Tipo	**Estándar**	**Tungsteno halógeno**	**Blanco frío**	**Blanco cálido**	**Blanco frío deluxe**	**Blanco cálido deluxe**	**Mercurio blanco deluxe**	**Mercurio blanco cálido deluxe**	**Haluro metálico**	**Sodio alta presión**
Potencial de control óptico	Excelente	Excelente	Regular	Regular	Regular	Regular	Bueno	Bueno	Excelente	Excelente
Control de resplandor con luminaria típica	Bueno	Excelente	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Excelente	Excelente	Bueno	Bueno
Efectos de color: acentos	Colores calidos	Colores calidos	Amarillo, azul, verde	Amarillo, verde	Ninguno: balance de color excelente	Amarillo, naranja, rojizo-como el incandescente	Rojo, amarillo azul, verde	Rojo, naranja, amarillo, verde	Amarillo, verde, azul	Amari-llo, naranja
Efectos de color: grises	Azules	Azules	Rojos	Rojos, azules	Ninguno	Azules	Rojos profundos	Rojos profundos, azules	Rojos	Rojos profun-dos, verdes, azules
Rango de potencias (watts) para aplicaciones típicas	30 - 1,000	100 – 1,500	20 – 215	20 -215	20 -215	20 -110	40- 1,000	175 – 1,000	175 – 1,500	35 – 1,000
Rango de lúmenes iniciales para aplicaciones típicas	210 - 23,740	3,450- 34, 730	1,300 – 16,000	1,300 – 15,000	850 – 11,000	820 – 6,550	1,575 – 63,000	6,500 – 58,000	14,000 – 150,000	36,000 – 140,000
lúmenes/watts iniciales de la lámpara	7 – 24	17 – 24	65 – 85	65 – 85	40 – 60	40 -60	30 -65	35 – 60	80 – 100	100 – 140
Vida nominal promedio de la lámpara (h)	750 – 2,000	1,500 – 4,000	9,000 (tres horas/ arranque) – 30,000 (encendido continuo para los tipos F40)				16,000 – 24,000	24,000 +	7,500 – 20,000 (10 o mas h/a)	16,000 – 24,000+
Depreciación de luz	Buena	Excelente	Buena	Buena	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular	Excelente

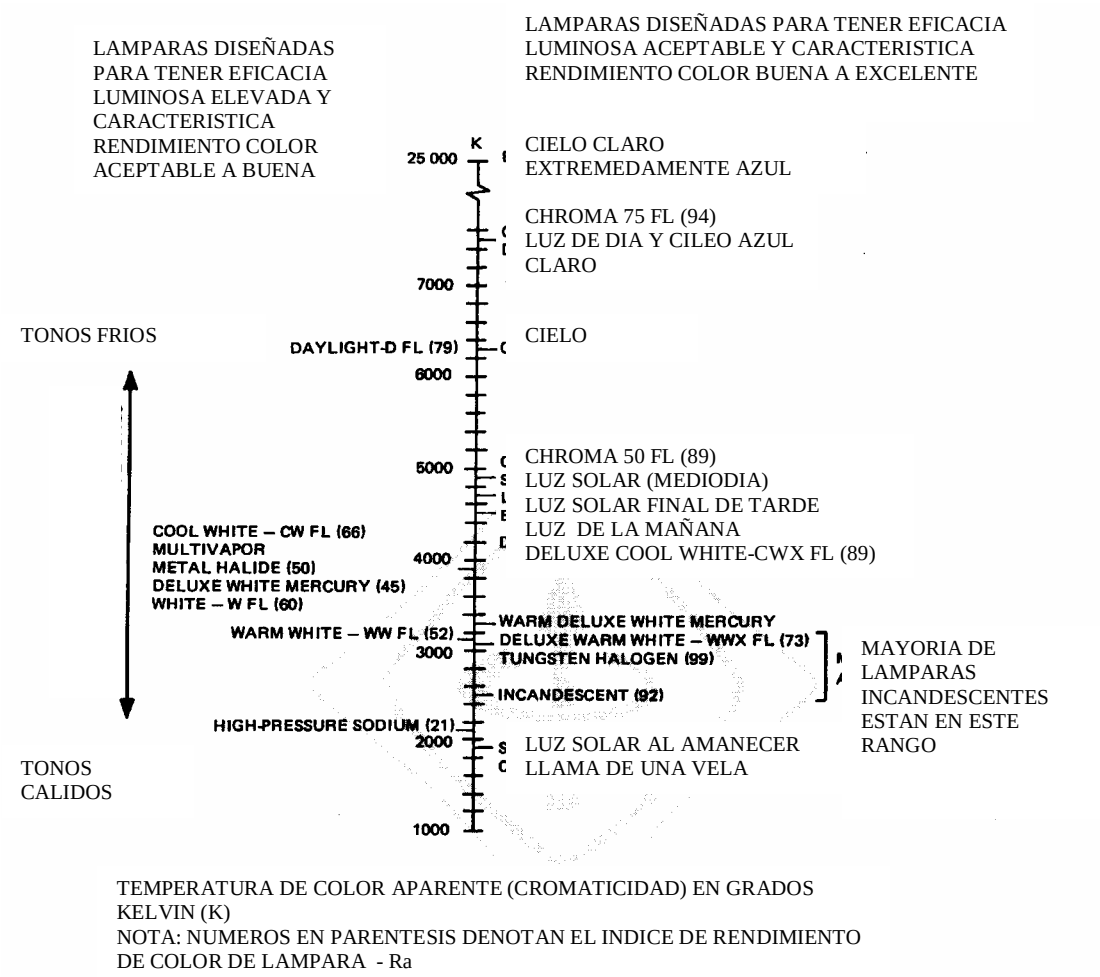

Figura 7-2. Características de color de fuentes de luz

7.5.4 Detalles de fuentes de luz disponible

7.5.4.1 Lámparas Incandescentes

Las lámparas incandescentes tienen muchas características deseables. Sin embargo, son convertidores muy ineficientes de electricidad en luz. Aproximadamente de 90 al 95% de la energía consumida por una fuente de luz incandescente se convierte en calor. La eficacia de las lámparas incandescentes (el tipo de iluminación general) es aproximadamente 20 lm/W.

Los ahorros de energía potenciales también existen para lámparas incandescentes cuando se pueden emplear lámparas con reflectores. Lámparas incandescentes usando reflectores incorporados ofrecen mejor utilización de la luz producida en comparación a los tipos sin reflector. En esta familia de lámparas están las lámparas R o lámparas reflectores para interiores, PAR, o lámparas reflectoras aluminadas parabólicas, y una nueva línea de lámparas reflectoras para interiores llamadas ER o tipo reflector elíptico. Las lámparas ER

permiten reducciones de potencia (watts) de hasta 50% por mejora de la eficiencia óptica del reflector.

7.5.4.2 Lámparas Fluorescentes

Las lámparas fluorescentes, introducidas a finales de los años 30, ofrecen al usuario dos beneficios principales en comparación con las lámparas incandescentes: mayor eficiencia y vida significativamente más larga. Las lámparas fluorescentes estándar típicas de la actualidad tienen eficacias mayores a 80 lm/W. Las características de las lámparas fluorescentes modernas son las siguientes:

a) Valor elevado de la eficacia (80+) en lumen por watt (lm/W)
b) Vida larga (20,000+ horas)
c) Disponibilidad en una gran variedad de tamaños y formas
d) Arranque y reiluminación rápidos tras apagones momentáneos
e) Disponibilidad de tipos con rendimientos de color elevados para aplicaciones criticas de color
f) Buen mantenimiento de la salida de luz a lo largo de la vida de la lámpara

Desde principios de los 70's, ha existido una línea de reemplazos de potencia reducida para las lámparas fluorescentes estándar. Esas lámparas están ahora disponibles en todos los tamaños populares y colores para la mayoría de aplicaciones. Sin embargo, las limitaciones de las lámparas de potencia reducida son las siguientes:

a) Usar solo donde la temperatura ambiental no cae por debajo de 16 ºC
b) Usar solo con balastros fluorescentes de factor de potencia elevados (por ejemplo, CBM)
c) No usar en donde corrientes de aire frío pueden ser dirigidas sobre la superficie de la lámpara

Las reducciones de potencia posibles con estos tipos de lámparas se encuentran en el rango del 10 – 20% para los tipos populares. La salida de luz también se reduce del 3- 18% dependiendo de la lámpara específica usada. Los ahorros de energía típicos serán aproximadamente de 5 -6 W por lámpara para el reemplazo de la popular lámpara de 4' 40W, y 17.5 por lámpara para el reemplazo de la popular lámpara *slimline* 75W. Los ahorros en costos de energía normalmente permiten recuperar el costo de la lámpara nueva en un año.

Otro tipo de lámpara fluorescente disponible para reducciones mayores de potencia y de luz de salida es el tipo fluorescente de impedancia modificada. Esas lámparas contienen condensadores que alteran la impedancia al circuito de la lámpara y de esta manera reducen la corriente y la potencia de la lámpara. Esas lámparas funcionan como un control tipo *dimmer* fijo y permiten que los sistemas de iluminación fluorescentes reduzcan su potencia en un 33%, 50% o más. La salida de luz también se reduce en proporción.

Dos desarrollos recientes en lámparas fluorescentes son los siguientes:

a) Lámpara de corte de cátodo
b) Lámpara 32 W F 32 T-8

La lámpara de corte de cátodo tiene un interruptor de corte térmico en serie con el filamento. El interruptor abre el circuito que aplica el bajo voltaje (3.6 V) en extremos de los electrodos después de que la descarga ha sido iniciada. La eficacia de la lámpara se incrementa en un 6% (81 lm/W) para la lámpara de arranque rápido 40 W F40. Esta lámpara no se recomienda para uso con balastros electrónicos y no debería funcionar en el modo atenuado (el cual reduce la vida de la lámpara significativamente).

La lámpara 32 W F 32 T-8 está reemplazando rápidamente a la lámpara estándar 40 W T-12. Esta lámpara usa el fósforo 70 CRI de tierras raras y tiene una eficacia de lámpara de 90 lm/W a 60 Hz. Cuando funciona en alta frecuencia en el modo instantáneo, su eficacia alcanza 100 lm/W, pero su vida se reduce hasta 15,000 h.

También está creciendo la popularidad de arreglos con tres lámparas para el montaje de 2 pies por 4 pies. Para eficiencia máxima el arreglo usa balastros de perdidas bajas, difusores cono sobre conos y reflectores especiales. La conmutación brinda reducciones de energía potenciales adicionales. Un segundo circuito permite que funcione solo la lámpara interior, las dos externas o las tres lámparas – produciendo ajustes de salida de luz fijos de 33%, 55% y 100%.

Las limitaciones en la aplicación de lámparas fluorescentes, incluyendo los tipos ahorradores de energía, son las siguientes:

a) Están limitadas normalmente para aplicaciones interiores debido al gran tamaño óptico de las lámparas
b) Sensibles a la temperatura: las temperaturas ambientales altas y bajas reducen la salida de luz
c) Potencia más elevada: 200 W

Las lámparas fluorescentes compactas (CFL) tienen *sockets* eléctricos con terminación simple (compatibles con los *sockets* de las lámparas incandescentes) de tal forma que ellas pueden ser colocadas en una base conteniendo un balastro con un conector tipo Edison para reemplazar directamente una lámpara incandescente. La eficacia puede ser tan alta como 65 lm/W comparada a 16 lm/W para una lámpara incandescente de 75 W.

7.5.4.3 Lámparas de Descarga de Alta Intensidad

Las fuentes de luz de descarga de alta intensidad (HID) caen en cuatro categorías principales: mercurio, haluros metálicos, sodio alta presión y sodio baja presión. El grupo HID de fuentes de luz, ofrece muchas oportunidades de ahorro de energía debido al potencial elevado de lm/W.

Las fuentes de luz de mercurio están disponibles desde 1934. La eficacia y la vida se han incrementado de manera constante hasta un punto a donde ahora tenemos eficacias de hasta 63 lm/W y la vida promedio típica sobrepasa las 24,000 horas. Las mejoras en la tecnología

de fósforo han hecho que las lámparas de mercurio estén disponibles con propiedades de rendimiento de color adecuadas para todas las aplicaciones, excepto las más críticas.

Las lámparas de mercurio están disponibles en numeroso rangos de potencia desde 40W has 1,000W en muchos colores de fósforo. Las aplicaciones típicas incluyen iluminación de calles, iluminación industrial, iluminación de área y seguridad, e iluminación de productos, tanto en interiores como exteriores.

Las lámparas de haluros metálicos fueron introducidas a mediados de los años 60's y han continuado ganado gran aceptación para una gama amplia de aplicaciones, industriales y comerciales, interiores y exteriores, y han sido aceptadas casi universalmente para aplicaciones de iluminación deportiva.

A pesar de funcionar de una manera similar a las lámparas de mercurio, los tipos de haluros metálicos usan haluros o metales de tierras raras para mejorar tanto la eficacia como el rendimiento de color. Las lámparas de haluros metálicos ofrecen en la actualidad eficacias de hasta 125 lm/W de luz blanca. El rendimiento de color de esas fuentes permite su uso en virtualmente todas las aplicaciones en donde una salida de luz elevada y buen color son requeridos. El espectro de color amplio de las lámparas de haluros metálicos junto con el potencial de control de óptico excelente de las fuentes, las hace ideales para iluminación de áreas, e iluminación industrial de alta calidad.

Las limitaciones de las lámparas de haluros metálicos incluyen tiempos relativamente largos de rearranque (8-15 min.), si la lámpara es apagada momentáneamente. Otra limitación es que las lámparas de baja potencia han estado disponibles desde hace muy poco tiempo. Las potencias típicas son 175, 250, 400, 1,000 y 1,500 W. Las potencias menores a 100W incrementarían el potencial de aplicación para montaje a baja altura.

La lámpara de haluros metálicos más pequeña tiene una salida de 2,580 lúmenes a 40W, y una eficacia de 65 lm/W. Esta puede reemplazar una lámpara incandescente de 150W que funciona diariamente durante varias horas. La vida típica de la lámpara es de 7,500 a 20,000 horas con mantenimiento entre regular y bueno de la salida de luz a lo largo de su vida.

Las lámparas de sodio de alta presión (HPS) ofrecen eficacias que sobrepasan las disponibles en la mayoría de lámpara de haluros metálicos. Los tipos disponibles actualmente ofrecen eficacias de hasta 140 lm/W. Un rango amplio de potencias está disponible con tipos de lámparas que ahora van desde 35W hasta 1,000W.

La principal ventaja de HPS comparada a mercurio y a los haluros metálicos es su tiempo de reencendido en caliente mas corto. Las lámparas HPS reencienden típicamente en 2-3 minutos después de un apagón momentáneo (Ver Tabla 7-6).

Tabla 7-6. Tiempo de arranques de lámparas

Lámpara	Arranque inicial (min.)	Reencendido[a] (min.)
Mercurio	5-7	3-6
Haluro metálico	3-5	10-15
Sodio alta presión	3-4	1

[a] Tiempo para alcanzar el 80% de lumen de salida

Las desventajas principales de las lámparas HPS son las siguientes:

a) El índice de rendimiento de color es bajo (valor típico 25), limitando las aplicaciones para esta fuente. Este puede ser mejorado hasta un CRI de aproximadamente 55-60 pero a expensas de vida y eficacia reducidas.
b) Las lámparas deben ser removidas del circuito cuando comienzan un ciclo de "encendido" y "apagado" debido ya sea a falla prematura o falla normal de fin de vida. Este es un problema de compatibilidad lámpara/ balastro que eventualmente será resuelto por los fabricantes de balastros.
c) La temperatura del color es relativamente baja (1,900 – 2,100 ºK)
d) Los efectos estroboscópicos son mayores que para otras lámparas HID

Las aplicaciones típicas de lámparas HPS incluyen iluminación de:

a) Calles y avenidas
b) Interior industrial
c) Área exterior (lotes de estacionamiento, almacenamiento, deportes, y recreativa)
d) Puentes y túneles
e) Televisión en circuito cerrado

El sodio de baja presión (LPS) es a esta fecha la fuente de luz más eficiente. Alcanzando eficiencias de lámpara de hasta 183 lm/W. Los tamaños disponibles con 18W, 35W, 55W, 90W, 135W y 180W. Las aplicaciones principales de LPS son: iluminación de seguridad, área, y carreteras.

La principal desventaja de LPS es que es una fuente monocromática, es decir que proporciona luz de un solo color (amarillo), lo cual le da a la lámpara un índice de rendimiento de color muy pobre. Otras desventajas son perdidas elevadas en los balastros y eficiencia baja del sistema. Las ventajas principales son que esta fuente entrega su salida nominal plena a lo largo de toda su vida nominal útil y reenciende instantáneamente cuando esta caliente. Las expectativas de vida de las lámparas LPS son generalmente de 18000 horas para todas excepto el tamaño de 18W, el cual tiene una vida promedio actualmente de 10,000 horas.

7.5.4.4 Consideraciones económicas

Aunque los precios varían considerablemente entre fuentes de luz eficientes como lámparas fluorescentes y HID, el factor más importante que determina los costos de iluminación no es el costo de las lámparas o las luminarias; sino el costo de la energía. En la actualidad esta

porción (energía) del costo total de suministrar luz con un sistema de iluminación general es típicamente más del 80% del total. Antes de tomar una decisión concerniente a la elección de un sistema de iluminación, el usuario debería decidir primero el requerimiento de color para la aplicación específica. Luego debe completarse un análisis económico para las diferentes fuentes de luz en consideración. El análisis económico debe incluir costos de capital y costos de operación.

7.6 Balastros

7.6.1 Definiciones generales

7.6.1.1 Figuras de Merito: Las pérdidas eléctricas en los balastros se pueden calcular determinando la diferencia entre la potencia de entrada y los watts entregados a la lámpara.

Perdidas de balastro = watts de entrada en balastro – watts en lámpara

Las tablas 7-7 y 7-8 brindan información para la mayoría de tipos comunes de balastros

Para lámparas fluorescentes y HID.

7.6.1.2 Factor de Balastro: Es la relación entre la salida de luz de una lámpara funcionando con un balastro comercial y la salida de luz de la misma lámpara funcionando con un balastro de referencia. El factor de balastro de un balastro de referencia es 100.

7.6.1.3 Vida de Balastros: Los Balastros Fluorescentes y HID son de vida larga y se puede esperar que duren entre 12-15 años en funcionamiento normal, contando que los límites nominales no se excedan. Sin embargo, las temperaturas altas reducen la vida del balastro, y un incremento de 10 ºC en el punto caliente de temperatura de un balastro de lámpara fluorescente puede reducir la vida esperada en un 50%. El reemplazo de balastros de baja eficiencia obsoletos con unidades de alta eficiencia nuevas puede brindar un doble beneficio: ahorros de energía y vida de funcionamiento del balastro más prolongada, ya que los balastros más eficientes generalmente funcionan a temperaturas menores.

Dependiendo del circuito usado, puede ser importante para la vida del balastro reemplazar prontamente las lámparas quemadas. Esto es particularmente cierto para sistemas fluorescentes de arranque instantáneo, en donde las lámparas quemadas pueden rectificar, absorbiendo corrientes intensas a través de los devanados del balastro, lo cual da como resultado fallas en los balastros. Si las lámparas se retiran de los *sockets* para reducir el uso de energía de iluminación, los balastros permanecerán normalmente energizados, excepto en el caso de los circuitos *slimline* o arranque instantáneo, en donde la remoción de la lámpara desconecta el balastro del sistema eléctrico. Para otros sistemas fluorescentes y HID un balastro energizado absorberá alguna potencia y puede afectar negativamente el factor de potencia del sistema. Los balastros fluorescentes de arranque rápido deberían ser desconectados, si las lámparas se remueven para prevenir la falla de los balastros.

Tabla 7-7. Watts de entrada en balastros de lámparas HID típicas

Tipo de lámpara	Designación ANSI	Watts	Reactor	Autotransformador de reactancia elevada (LAG)	Tipo de Balastro		Regulado con reactancia elevada (regulated lag)
					Autotransformador de watts constantes (CWA)	Regulado con watts constantes (CW)	
Mercurio	H39	175	192-200	200 – 208	200 – 210	210	-
	H37	250	272-285	277 – 286	285 – 300	292 – 295	-
	H33	400	430 – 439	430 – 484	450 – 454	460 – 465	-
	H36	1,000	1050 – 1070	-	1050 – 1083	1085 - 1102	-
Haluros Metálicos	M57	175	-	-	210	-	-
	M58	250	-	-	292 – 300	-	-
	M59	400	-	-	455 – 465	-	-
	M47	1,000	1050	-	1070 – 1100	-	-
	M48	1,500	-	-	1610 – 1630	-	-
Sodio Alta Presión	S55	150 (55V)	170	188 – 200	190	-	190 – 204
	S56	150 (100V)	170	188	188	-	-
	S66	200	220 – 230	-	245 – 248	-	254
	S50	250	275 – 283	296 – 305	300 – 307	-	310 – 315
	S67	310	335 – 345	-	365	-	378 – 380
	S51	400	440 – 463	464 – 470	465 – 480	-	480 – 485
	S52	1,000	1060 - 1065	-	1090 - 1106	-	-

Tabla 7-8. Watts de entrada de balastro de lámparas fluorescentes típicas

Tipo de lámpara	Corriente nominal de lámpara	Potencia nominal de lámpara (W)	Entrada del sistema (W)								Tipo de circuito
			Balastros estándar		Balastros para ahorro de energía		Balastros electrónicos				
			1 lámpara	2 lámparas	1 lámpara	2 lámparas	1 lámpara	2 lámparas	3 lámpara	4 lámparas	
F32T8	0.265	32	-	-	37	71	36	58	87	112	RS[a]
F40T12	0.430	40	57	96	50	86	36	71	109	-	RS
F40T12, ES	0.460	34/35	50	82	43	72	31	59	93	-	RS
F48T12	0.425	40	61	102	-	-	-	-	-	-	IS[b]
F96T12	0.425	75	100	173	-	158	88	140	-	-	IS
F96T12, ES	0.455	60	83	138	-	123	73	116	-	-	IS

[a] RS = rapid start
[b] IS= Instant start

7.6.1.4 Factor de eficacia del balastro: El factor de eficacia del balastro (BEF) es la salida de luz relativa dividida entre la potencia de entrada de un balastro de una lámpara fluorescente. Los balastros que cumplen con la nueva norma serán marcados con una letra mayúscula "E" impresa dentro de un círculo. Algunos balastros están excluidos de cumplir estas normas. Balastros atenuadores (*dimming*), y balastros teniendo un factor de potencia menor al 90 % para aplicaciones residenciales, están excluidos. La tabla 7-9 muestra el BEF mínimo requerido por Public Law 100-357 en los Estados Unidos.

Tabla 7-9. Factores de eficacia de balastros

Balastros	Watts nominales de lámparas	BEF
1-F40T12		
120 V	40	1.805
277 V	40	1.805
2-F40T12		
120 V	80	1.060
277 V	80	1.050
2-F96T12		
120 V	150	0.570
277 V	150	0.570
2-F96T12HO		
120 V	220	0.390
277 V	220	0.390

7.6.1.5 Intercambiabilidad del balastro: El desempeño óptimo de cualquier lámpara HID se puede obtener haciéndola funcionar con un balastro diseñado para la lámpara. Sin embargo, en años recientes un cierto número de lámparas han sido desarrolladas para que puedan ser usadas en varios tipos de circuitos con balastros ya existentes. Están disponibles lámparas especiales de haluros metálicos que son diseñadas para ser usadas con balastros para mercurio; un tipo especial de lámpara HPS llamada *Penning Start.* También pueden funcionar con balastros de mercurio.

Puede ser deseable mejorar la eficiencia del sistema de iluminación reemplazando una lámpara de mercurio, ya sea con un tipo de haluro metálico o uno HPS que funciona a mayores lúmenes por watt. La luz generada está disponible por lo tanto a un costo menor y puede ser posible reducir el número de luminarias dependiendo de la altura del montaje, espaciamiento, y consideraciones de luminarias.

7.6.2 Balastros Fluorescentes

7.6.2.1 Efecto de Variaciones de temperaturas y voltaje

La temperatura de la pared de la lámpara afecta la salida y eficiencia de una luz fluorescente. La temperatura óptima es de 40 ºC. Los procedimientos de prueba ANSI piden que los fabricantes caractericen las lámparas en aire libre a una temperatura ambiente de 25 ºC ± 0.5 ºC. Para determinar la salida de luz de las lámparas en aplicaciones prácticas, se pueden emplear pruebas certificadas por la Organización Certified Ballast

Manufacturers (CBM). El balastro funciona a su voltaje central nominal y la salida de luz inicial de la lámpara no puede ser menor que el 95% de la salida nominal dada por el fabricante.

Los valores de lúmenes nominales están basados en mediciones hechas a una temperatura ambiente de 25 ºC en aire en reposo. Las relaciones de variaciones de lúmenes contra temperatura ambiente para tres tipos de lámparas fluorescentes se muestran en la Figura 7-3.

Los balastros son diseñados típicamente para hacer funcionar lámparas fluorescentes sobre un rango de ±10% alrededor del voltaje central nominal.

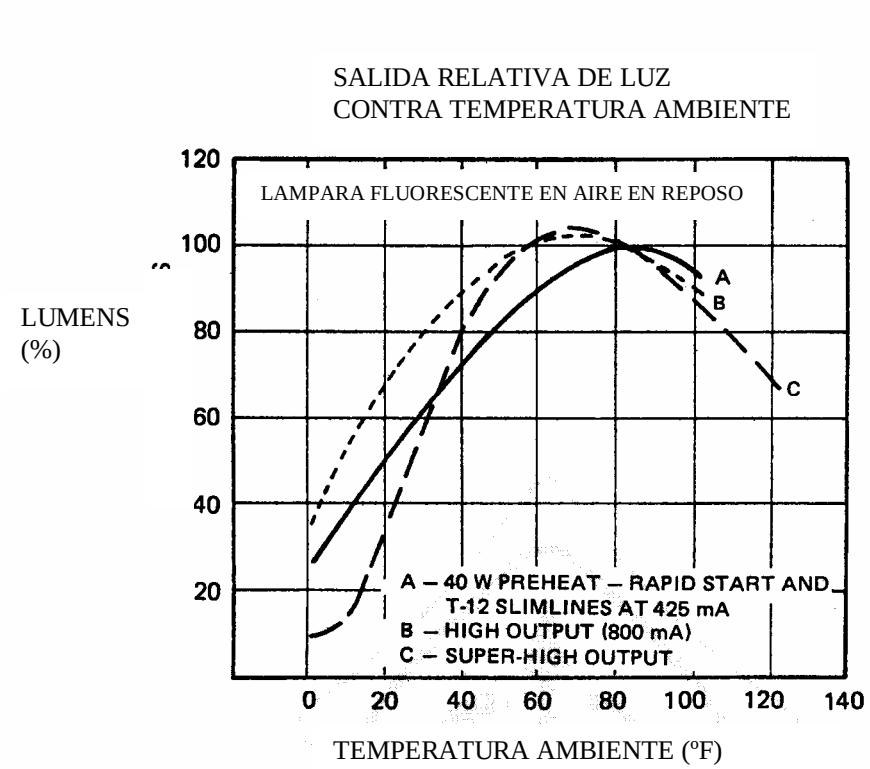

Figura 7-3. Relación de lúmenes contra temperatura ambiente (balastros fluorescentes)

7.6.2.2 Balastros eficientes

En general, a mayor tamaño del balastro, mayor la eficiencia. Es decir, que las perdidas relativas del balastro son menores para un balastro de 40W que para un balastro de 20W. Un balastro de dos lámparas es más eficiente que un balastro de una lámpara. Las eficiencias de los balastros generalmente pueden ser calculadas con los datos de catálogo de fabricantes. Sin embargo el diseñador debe estar seguro de que el fabricante especifica las condiciones de prueba a las cuales el balastro está especificado.

Los detalles siguientes son típicos de los nuevos balastros:

a) Balastros de baja energía. Las lámparas fluorescentes pueden funcionar por debajo de su potencia y salida nominales, contando con que los requerimientos de voltaje de arranque y voltaje de funcionamiento se cumplan. En el caso de arranque rápido, las lámparas y cátodos serán calentados independientemente de las corrientes que circula por la lámpara para brindar la vida nominal de la lámpara.

b) Balastros alto/bajo (*High/Low)*. Este tipo de balastros, generalmente disponible solo para operación de circuitos de arranque rápido, contiene terminales extras que pueden ser conectados o conmutados para permitir el funcionamiento multinivel de la lámpara.

c) Balastros de pérdidas bajas. Los balastros pueden ser diseñados para reducir perdidas internas mejorando las características mecánicas y eléctricas. Circuitos magnéticos más eficientes, espaciamiento más cercano de bobinas y sistemas de aislamiento mejorado pueden provocar reducciones de pérdidas de aproximadamente 50%, comparados a las unidades convencionales.

7.6.2.3 Balastros electrónicos

La eficiencia de sistemas de lámparas fluorescentes y HID se puede mejorar aun más utilizando balastros electrónicos. Las mejoras ocurren en las formas siguientes:

- Por medio de perdidas internas menores dentro de los balastros
- Haciendo uso del hecho de que la eficacia de las lámparas fluorescentes aumenta en función de la frecuencia de la potencia aplicada

Los balastros electrónicos usualmente hacen funcionar lámparas a frecuencias cercanas a 20 kHz. En general, al hacer funcionar una lámpara fluorescente con un balastro electrónico se conseguirá un incremento del 20 – 25% en eficacia del sistema comparado a un balastro de bobina de núcleo estándar. El balastro electrónico ofrece desempeño mejorado que incluye:

a) Flicker reducido
b) Regulación de voltaje y térmica mejorada
c) La habilidad de atenuar lámparas fluorescentes sobre un gran rango sin afectar la vida de la lámpara.

La Tabla 7-10 muestra el desempeño de balastros estándar y de bobina- núcleo eficiente junto con los balastros de alta frecuencia electrónicos.

Los datos son para dos sistemas de lámparas. La lámpara de 40W F40T12 CW aun se encuentra en uso generalizado; sin embargo la lámpara de 32W F32T8 está ganando popularidad debido a su alta eficiencia de sistema. La Tabla 7-10 muestra que el balastro electrónico puede cumplir todos los parámetros necesarios de la lámpara para mantener la vida de la lámpara. El alto contenido armónico del balastro electrónico T8 fue diseñado antes que las armónicas se convirtieran en punto de interés. En la actualidad, existe

tecnología para reducir el contenido de armónicos dentro de un límite especificado. La restricción serían las consideraciones de costos.

Los balastros electrónicos están disponibles para todos lo tipos de lámparas fluorescentes usadas generalmente, incluyendo la de 40W F40 T12, la de 34W F40 T12, la de 40W F40 T10, y la de 32W F32 T8 (de arranque rápido e instantáneo), todas las lámparas tipo F-96 y las lámparas F96 de salida alta. Existen balastros para una, dos, tres y cuatro lámparas. La nueva generación de balastros electrónicos para lámparas fluorescentes compactas (CFLs) tiene factores de potencia arriba del 90% con armónicos menores al 20%.

7.6.3 Balastros de Descarga de alta Intensidad (HID)

Para las lámparas de vapor de mercurio, los circuitos de los balastros pueden ser de los tipos de reactor, auto transformador o regulador. Los balastros tipo regulador contienen circuitos que están diseñados para que la lámpara funcione a una potencia relativamente constante, aunque el voltaje de entrada de línea nominal pueda variar.

En general, las pérdidas de balastros HID se encuentran entre 10- 20% de la potencia de la lámpara.

7.6.3.1 Balastros para lámparas de sodio alta presión (HPS)

En la actualidad, cuatro tipos generales de balastro están disponibles para el usuario de lamparas HPS. Cada uno tiene sus ventajas y desventajas.

El balastro de circuito de retardo es simplemente una inductancia colocada en serie con la lámpara. Este tiene la regulación de potencia más pobre debido a cambios en los voltajes de línea, pero puede ser usado efectivamente en circuitos en donde el voltaje de línea varía no más de ± 5%. Este balastro tiene una corriente de arranque relativamente elevada que puede producir un calentamiento de la lámpara deseablemente más rápido. Es relativamente barata y pequeña en tamaño, y tiene pérdidas de potencia bajas.

El balastro con circuito de adelanto está construido con una capacitancia en serie con la inductancia y la lámpara, en combinación con un auto transformador. El tamaño del balastro se mantiene pequeño manteniendo una porción del devanado primario común con el devanado secundario. Con el devanado secundario produciendo la regulación de potencia, la efectividad de regulación depende de la cantidad de acoplamiento entre el primario y el secundario. Una variación del voltaje de línea de ±10% dará lugar solamente a una variación de ±5% en la potencia de la lámpara. El balastro con circuito de adelanto tiene corriente de arranque baja.

El balastro con regulador magnético es esencialmente un transformador de aislamiento regulador de voltaje con sus devanados primario y secundario montados en el mismo núcleo, y contiene un tercer devanado capacitivo que ajusta el flujo magnético con los cambios ya sea en el voltaje primario o secundario. Este brinda la mejor regulación de

potencia con cambios ya sea del voltaje de entrada o del voltaje de la lámpara. Sin embargo, este balastro es el más costoso y tiene la mayor perdida de potencia. La figura 7-4 muestra el efecto de la variación de voltaje de línea sobre los watts de la lámpara para varios tipos de balastros.

Tabla 7-10. Datos de desempeño de algunos sistemas lámpara-balastro fluorescentes

Balastro	**EE Mag**	**Balastros electrónicos**	
lámpara	**40 W F40 T12 CW**	**40 W F40 T12 CW**	**32W F32 T8 41K**
Potencia (W)	85	74	69
Voltaje de filamento (V)	3.5	2.6	3.4
Factor de cresta de corriente de lámpara	1.7	1.4	1.5
Factor de balastro (%)	93	93	100
Salida de luz (lm)	5,690	5,670	5,820
Flicker (%)	30	1	1
3ª. Armónica (%)	12	5	43
Eficiencia del balastro (%)	87	89	90
Eficacia de lámpara (lm/W)	77	86	93
Eficacia del sistema (lm/W)	67	77	84

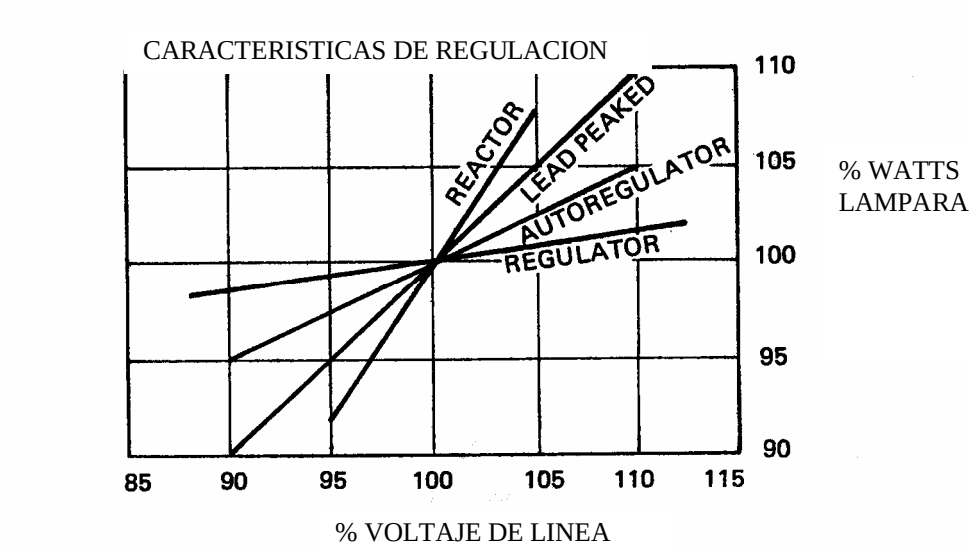

Figura 7-4. Característica de regulación del balastro (HPS)

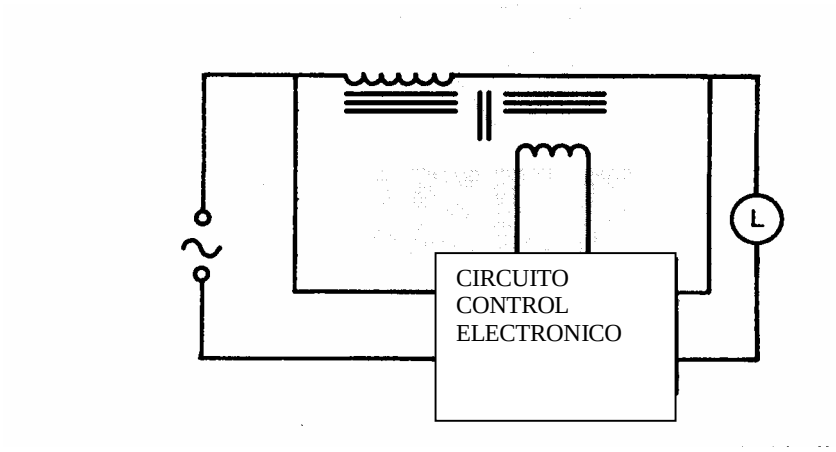

Figura 7.5 Balastro eficiente (HPS)

7.6.3.2 Balastros electrónicos

El problema principal con los balastros existentes para lámparas HPS es su incapacidad de hacer funcionar la lámpara a potencia nominal. Balastros controlados electrónicamente han sido diseñados y construidos con un circuito de control de estado sólido y un reactor. La figura 7-5 muestra el circuito de uno de tales balastros llamado el balastro super regulado. El uso de un dispositivo de conmutación de estado sólido permite que el devanado de control sea puesto en corto en un modo controlado por fase, y así brinda una variación suave y continua de la inductancia promedio del balastro.

Debido a que las lámparas HPS requieren más voltaje cuando envejecen. Se debe poner atención a la regulación de potencia de la lámpara, la cual puede variar hasta límites que pueden ser muy dañinos para la lámpara. Para evitar esto los fabricantes de la lámpara imponen límites de potencia de la lámpara sobre los balastos. Los límites de potencia y

voltaje son definidos por medio del diagrama generalmente aceptado, llamado el Trapezoide. El trapezoide muestra a los usuarios de la lámpara el rango de potencia y voltaje en el cual la lámpara debe funcionar para dar desempeño aceptable en términos de vida, salida luminosa y estabilidad. La Figura 7-6 muestra el trapezoide para la lámpara HPS de 400W.

Para balastros de tecnología actual funcionando a voltaje de entrada nominal, todas las lámparas de diseño particular funcionarán sobre una curva suave dentro del trapezoide llamada la característica del balastro.

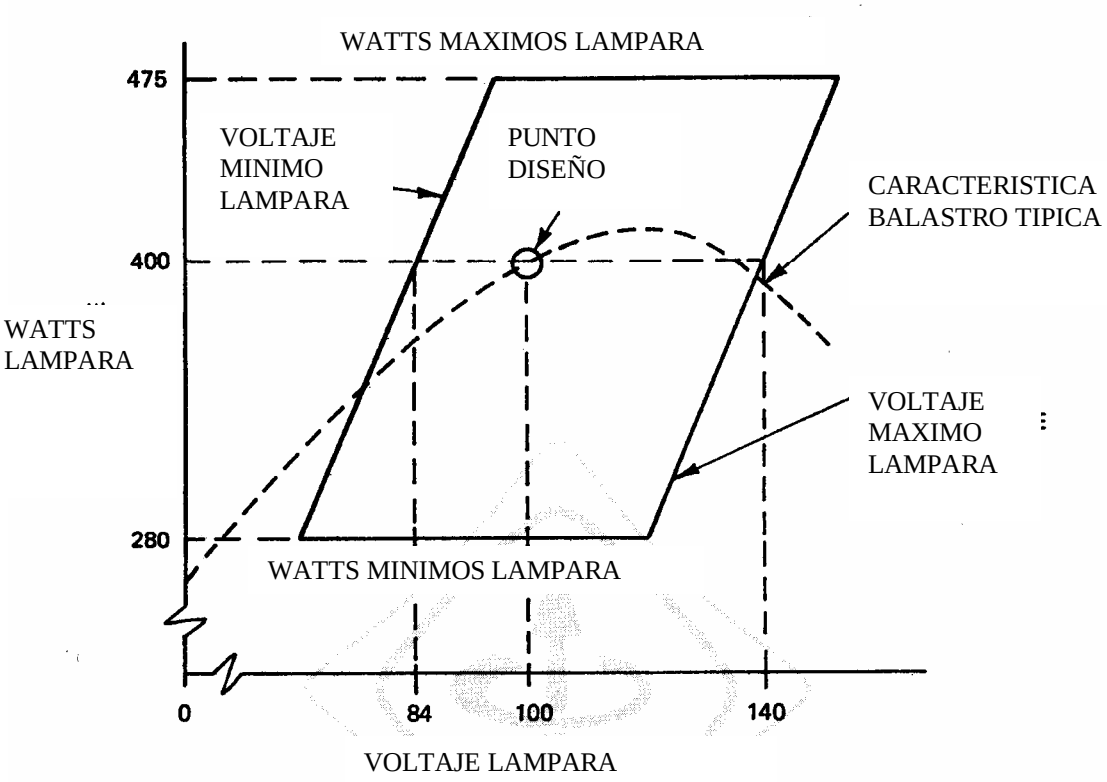

Figura 7-6 Diagrama del trapezoide para lámpara HPS de 400W

7.7 Luminarias

7.7.1 Criterios de eficiencia

El propósito principal de una luminaria es contener la fuente de luz y los accesorios eléctricos, y luego dirigir la luz desde la fuente hasta el área a ser iluminada. La eficiencia de la luminaria se define como la cantidad de luz que es emitida desde la luminaria dividida entre la cantidad de luz generada por las lámparas.

7.7.2 Control y utilización del deslumbramiento

La luminaria más eficiente puede que no sea una luminaria del todo ya que las lámparas expuestas pueden dirigir su luz eficientemente hacia el espacio sin utilizar ningún tipo de

cubierta. Tal equipo de iluminación, puede dar por resultado un deslumbramiento excesivo y dependiendo de la Reflectancia del salón, forma del espacio, y altura del montaje, puede que no ponga la luz donde se requiere. Existe una figura de mérito para sistemas de iluminación general que nos dice que tan eficientemente trabaja la combinación luminaria y salón. Este es el *coeficiente de utilización* (CU). El CU permite una estimación rápida de la iluminación que puede ser conseguida para un sistema dado.

En lugares en donde la gente pasa grandes periodos de tiempo haciendo trabajo visual, es importante controlar el deslumbramiento de los sistemas de iluminación. La probabilidad de confort visual o VCP es una medida del deslumbramiento directo basado en las reacciones estudiadas de las personas hacia las áreas de brillo dentro de su visión.

Generalmente, la luz emitida desde una luminaria desde un cono descrito por un ángulo de 45º rotado alrededor de una línea vertical desde la luminaria hasta el piso no contribuirá sustancialmente al deslumbramiento. La luz emitida por encima de 45º puede provocar deslumbramiento dependiendo de su intensidad y la luminancia del espacio circundante. La 7-7 muestra que las luminarias que emiten luz por debajo de 45º pueden causar perdida de contraste en las tareas, dependiendo de su posición en el campo de visión. Para reducir reflexiones, la luz emitida desde luminarias sobre 45º es deseable.

7.7.3 Pantallas

Algunas soluciones únicas a los problemas descritos previamente han sido brindadas usando nuevos tipos de materiales para pantallas que pueden dirigir la luz desde las luminarias hasta zonas muy estrechas para conseguir efectividad visual máxima y control del deslumbramiento. Un ejemplo de esto es un material de iluminación con una distribución llamada *alas de murciélago*. La Figura 7-8 muestra que un gran porcentaje de la luz se emite cerca de 45º de manera que si las estaciones de trabajo se colocan entre filas de luminarias, la iluminación principal sobre la tarea viene de lado. Las reflexiones veladas son minimizadas de esta manera con un grado regular de control de deslumbramiento.

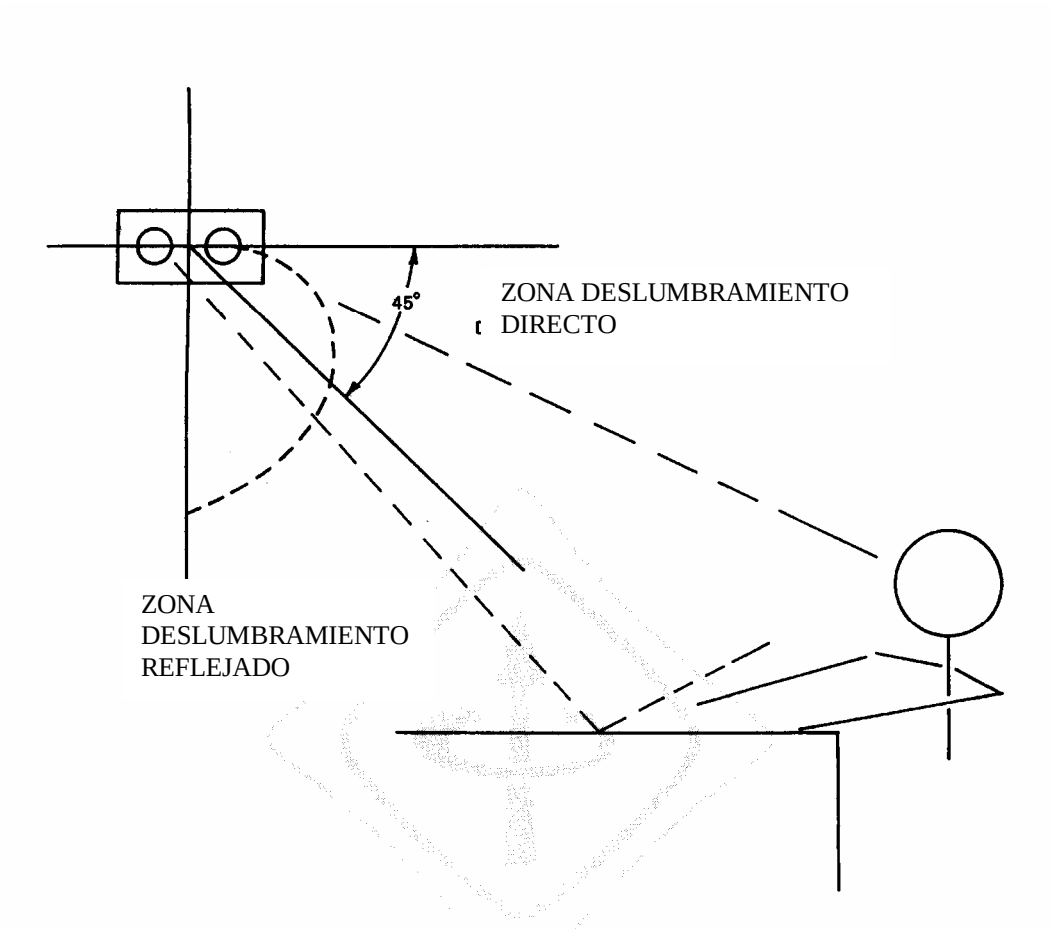

Figura 7.7 Ilustración del deslumbramiento

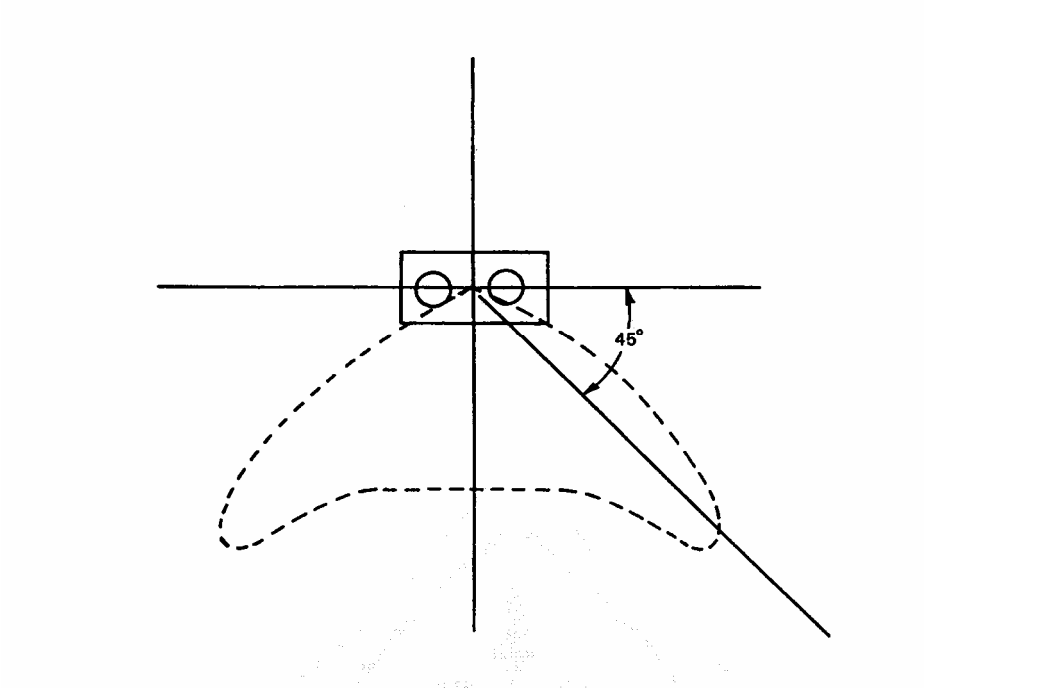

Figura 7.8 Distribución alas de murciélago

7.7.4 Efecto del polvo y consideraciones de mantenimiento

Todas las superficies eventualmente recogen polvo, o dicho de otra manera pierden su efectividad luminosa a lo largo de un periodo de tiempo. En casos extremos, tales pérdidas pueden alcanzar el 50% durante un período de dos años. Más típico, quizás son perdidas de 10- 25% sobre el mismo período, en espacios con aire acondicionado, con un uso de 8-12 horas diarias.

Los fabricantes de luminarias publican los factores de depreciación de polvo de la luminaria (LDDs) que son esperados, para ayudar a evaluar las perdidas de eficiencia debido al polvo. Sin embargo, se debe reconocer que la iluminación en un espacio interior depende no solamente de la depreciación de polvo de la luminaria sino también de la depreciación de polvo del salón.

7.7.5 Desempeño Térmico

Es bien sabido que el desempeño de las lámparas fluorescentes es afectado por la temperatura mínima de la pared de la lámpara (MLWT). La luz máxima de salida se consigue aproximadamente a 40 ºC y disminuye arriba y abajo de esta temperatura. En casi todas las luminarias, el MLWT está bien arriba de 40 ºC, en los cuales la luz de salida disminuye de 10 – 20% en luminarias de 2 y 4 lámparas respectivamente.

Las luminarias fluorescentes compactas tienen aún un efecto mayor sobre el desempeño de las lámparas. No solo la luz de salida disminuye en un 20% sino que también la eficacia del sistema disminuye en el mismo valor.

7.8 Controles de Iluminación

7.8.1 Generalidades

El control apropiado de un sistema de iluminación es uno de los medios más efectivos de ahorrar energía de iluminación. Las técnicas de control pueden variar desde un simple interruptor ENCENDIDO/APAGADO instalado sobre una luminaria individual, hasta sistemas controlados por computadora diseñados para hacer funcionar el sistema de iluminación de edificios grandes. La instalación de un número apropiados de puntos de conmutación (interruptores) es generalmente la clave para el control de energía por conmutación. Una vez que un sistema se instala es difícil añadir otos puntos de conmutación; de manera que se debe poner mucho cuidado a esta parte del sistema de iluminación durante el diseño inicial.

7.8.2 Interruptores

Los interruptores deberían ser dispuestos para cada área en la cual un individuo o grupo pueden trabajar y requieren niveles mayores de iluminación que el balance del salón. Las técnicas de conmutación a bajo voltaje incrementan la habilidad de control para puntos

múltiples del sistema; la conmutación a 277 V con barreras entre diferentes extremos interruptores esta disponible para uso en edificios comerciales.

La iluminación parcial puede ser aceptable en varios periodos del día: durante operaciones de limpieza, a la hora del almuerzo, y antes de que el personal se encuentre plenamente ocupado en la mañana. Por ejemplo, la iluminación en oficinas puede variar desde 50 fc hasta 100 fc. El control es normalmente dispuesto de manera que un medio de los balastros o un tercio de los balastros en una instalación fluorescente o HID son apagados. Esto significa, en algunos casos, que la mitad, un tercio, o dos tercios de las luminarias serán apagadas. En otros casos en donde balastros múltiples son instalados en filas continuas de luminarias o pares de luminarias, esto simplemente significa que la luminaria será atenuada a un medio, un tercio, o dos tercios de luz.

Puede ser deseable colocar interruptores adyacentes con las ventanas de manera que las luces pueden ser apagadas o reducidas sino son necesarias. Ahorros de energía significativos se pueden lograr usando la luz diurna.

Es esencial recordar a los responsables de controlar los interruptores de la luz, la necesidad de apagarla. Ninguna ventaja se ganara con la introducción de controles sofisticados, si estos no son utilizados.

7.8.3 Atenuación (*Dimming*)

Varios métodos de atenuación están disponibles los cuales brindan un efecto placentero, utilizan solo la cantidad de luz necesaria y ahorran energía. Voltaje reducido es usado principalmente para incandescentes, pero para iluminación fluorescentes y HID se requieren métodos más sofisticados.

Es posible reducir el voltaje de un sistema simplemente usando transformadores de *tap* variable o usando tiristores de disparo retardado.

Un segundo tipo de atenuación incandescente usa transistores o tiristores. Ellos reducen el voltaje disminuyendo el tiempo durante cada ciclo en que se aplica voltaje. Este método es el menos costoso. Otra forma de atenuación de voltaje involucra el uso de un reactor saturable junto con un control electrónico.

La atenuación de lámparas HID y fluorescentes puede ser realizada con un circuito controlado por fase. En sistemas de pleno rango usando lampas fluorescentes de arranque rápido, los cátodos de las lámparas se mantienen a un voltaje relativamente constante para prevenir falla prematura del tubo o la extinción del arco. Algunos tipos de balastros electrónicos también incorporan una característica de atenuación con la ventaja adicional de que las perdidas de potencia en disposivos de estado sólido son mínimas.

7.8.4 Sistemas de control remoto

En la mayoría de edificios grandes es deseable tener la habilidad de controlar la iluminación desde un lugar central o desde puntos del piso central. Esta provisión permite

que los individuos asignados para encender las luces en la mañana y apagarlas en la noche hagan su trabajo, y hagan ajustes intermitentes a la iluminación si es necesario.

7.8.5 Sistemas de control automático

Los controles automáticos varían desde un reloj de tiempo simple, una foto celda, o un detector de presencia hasta llegar a sistemas de iluminación controlados por computadora. Se requiere un análisis de costo de precio contra beneficio para cada instalación. El sistema debería ser programado para las operaciones normales y tener la posibilidad de pasarse a control manual local. La iluminación debería ser conmutada en grupos distribuidos, de manera que las áreas pueden ser iluminadas u oscurecidas a medida que cambian las condiciones.

7.9 Optimizando la energía de iluminación

Para conseguir un uso óptimo de la emergía en sistemas de iluminación, las consideraciones más importantes en el proceso de diseño de iluminación son las siguientes:

a) Utilizando luz diurna
b) Comprendiendo las tareas visuales
c) Considerando la cantidad y la calidad de iluminación
d) Seleccionando equipos y materiales de iluminación apropiados (lámpara, balastro, control)
e) Comprendiendo las características de mantenimiento
f) Criterios de espaciamiento

7.9.1 Utilizando luz diurna

El factor de luz diurna se define como la iluminancia recibida en un punto interior, desde un cielo de una distribución de iluminancia conocida o asumida, expresado como un porcentaje de iluminancia horizontal exterior desde un hemisferio sin obstrucciones del mismo cielo.

Los factores de luz diurna (calculados) entre el 2-5% indican que la iluminación eléctrica debería ser diseñada para aprovechar la luz diurna disponible. Esto puede conseguirse usando:

a) Iluminación de tarea o tarea-ambiente
b) Sistemas de control de iluminación eléctrica con controles fotosensibles para atenuar automáticamente la luz en proporción a luz diurna disponible, a manera de producir una iluminancia constante.

7.9.2 Tarea visual

El nivel de luminancia diseñado debería ser apropiado para la tarea visual. El nivel de diseño debería ser ajustado a la edad del trabajador y a la dificultad visual de la tarea. La relación de contraste máximo debería ser observada en el diseño.

7.9.3 Cantidad y calidad de la iluminación

La cantidad de iluminaciones usualmente medida en lúmenes por metro cuadrado (lux) o lúmenes por pie cuadrado. Ya que el ojo no puede ver pies-candelas, algunas recomendaciones se dan ahora en *footlamberts* o unidades de luminancia. La luminancia está más estrechamente ligada a la visión, ya que el ojo es un juez excelente de diferencias de iluminación (contraste), un elemento necesario de la visión.

De igual importancia es la calidad de la iluminación, la cual incluye:

a) Deslumbramiento directo
b) Deslumbramiento reflejado
c) Reflexiones veladas
d) Probabilidad de confort visual (VCP). Un VCP de 80% significa que el 80% de los ocupantes encontrarán que el deslumbramiento producido por el sistema es aceptable.

7.9.4 Hardware de iluminación

La eficiencia energética es solamente uno de los factores en el proceso de selección de hardware para iluminación. Las características físicas, calidad de construcción, facilidad de servicios, y los factores de calidad de la iluminación son más importantes en una instalación dada. Sin embargo, se le debe dar atención particular a las partes del sistema que transforman energía eléctrica en energía visible (la lámpara y el balastro) y la luminaria, la cual recoge y dirige esa energía visible hacia el salón. La compensación para un balastro, lámpara o luminaria ineficiente generalmente no puede ser conseguida por medio de la manipulación de las otras variables en el sistema de iluminación.

Para manipular esas variables del sistema con el propósito de alcanzar una eficiencia de energía luminosa optima, el ingeniero o diseñador debería familiarizarse con los diferentes tipos de lámparas, balastros compatibles con sistemas de alta eficiencia, y actualizarse con luminarias de nuevos diseños.

7.9.5 Mantenimiento

El mantenimiento incluye el reemplazo de lámparas quemadas o deterioradas, balastros, *sockets*, e interruptores; y la limpieza de luminarias y superficies del salón a intervalos adecuados. Como regla general, las luminarias deberían ser limpiadas anualmente.

7.9.6 Relación de altura del espacio de montaje.

La relación entre el espacio de la luminaria y la altura de la luminaria sobre el plano de trabajo es una consideración crítica en el diseño de iluminación industrial. Esta relación se conoce como la relación entre el espaciamiento y la altura de montaje (S/MH). El valor

S/MH en catálogos de fabricantes de luminarias es el espaciamiento máximo que dará como resultado una iluminación relativamente uniforme en el plano de trabajo.

Las lámparas HID están disponibles en tamaños de salida que barren un rango de más de 10:1 para una relación entre espaciamiento y altura de montaje de 1:1, el traslape de luz de luminarias adyacentes y pantallas de lámparas será razonable y el brillo del reflector se encontrará dentro de límites aceptables. Cuando la altura de montaje es igual al espaciamiento entre luminarias, el área cubierta por cada luminaria es igual al cuadrado de la altura de montaje. Al multiplicar el cuadrado de la altura de montaje por el doble del nivel de luz mantenida promedio se consigue un buen valor inicial aproximado de los lúmenes de las lámparas.

La tabla 7-11 ofrece una comparación de los requerimientos de energía de los cuatro sistemas de iluminación principales. La tabla resume un estudio de luminarias para proporcionar una iluminancia plana de 100 fc para iluminar un área de 926 m^2.

Tabla 7-11—Requerimientos de energía para los cuatro principales sistemas de iluminación.

Sistema	**Fluorescente (454.8 W)**	**HPS (400 W)**	**Haluros metálicos (400 W)**	**Mercurio (400 W)**	**Incandescente (1000 W)**
Número de luminarias	73	40	65	118	70
Requerimientos de potencia (kW)	33.2	19	30	52	70
Porcentaje de potencia requerida por sistema HPS	175	100	158	274	368

7.10 Efectos de factor de potencia y armónicos en la calidad de la potencia

Los balastros fluorescentes usados en edificios comerciales entregan un factor de potencia mayor que el 90%. Casi todos los balastros usan condensadores que proporcionan no solo corrección de factor de potencia, sino también desplazamiento de fase en unidades de dos lámparas para reducir efectos estroboscópicos. Los balastros con factor de potencia elevado son cosa de rutina para iluminación fluorescente, pero para muchas unidades HID, deben ser especificados.

La mayoría de sistemas de atenuación (*dimmers*) para iluminación del tipo de descarga depende solo de la acción de recorte de onda o usan solo una parte del ciclo para reducir la potencia que se entrega al sistema de iluminación. Esas unidades tienen un factor de potencia inherentemente bajo en las fases atenuadas, debido a su elevado contenido armónico.

El mayor impacto que tienen los balastros electrónicos sobre la línea de potencia son las corrientes armónicas. Las armónicas aparecen en la línea de potencia debido al diseño electrónico del balastro. Si se debe reducir el flicker, el balastro electrónico debe producir un voltaje dc puro. El dc puro se obtiene aplicando condensadores de almacenamiento de energía a continuación del rectificador a diodos de la entrada. Este condensador provoca que la corriente fluya en pequeñas ráfagas con una corriente de pico elevada. Las ráfagas están constituidas de ondas seno constituidas de la frecuencia fundamental y armónicas. El resultado, si no se corrige, es un factor de potencia bajo (50%), y la circulación de corriente que calienta los transformadores y desperdicia energía. Los balastros electrónicos de corriente atacan el problema de armónicos y factor de potencia por medio de diseño interno (alcanzando THD tan bajo como el 6%, y factor de potencia cercano a la unidad).

Existe una relación matemática entre factor de potencia y armónicos. Se pude demostrar que cuando el factor de potencia de desplazamiento es ignorado, corrientes armónicas del 20% se relacionan a un factor de potencia del 98%, y una distorsión del 5% requiere un factor de potencia de más del 99.8%. Esencialmente, el aumento de las armónicas contribuye a disminuir el factor de potencia.

En la actualidad, las frecuencias de conmutación de los balastros se encuentran en el rango de 20-50 kHz. Tiempos de subida rápidos en los transitorios de conmutación a esas frecuencias generan armónicos hasta el espectro de alta frecuencia. Esto puede causar interferencia a las radiocomunicaciones, equipo médico sensible, y computadoras.

La distorsión armónica de voltajes o corrientes del sistema de potencia es siempre indeseable. Los componentes armónicos se añaden a las pérdidas del sistema creando calentamiento adicional en el equipo del sistema de potencia. Altos niveles de distorsión de voltaje armónico pueden causar malfuncionamiento o falla de equipos. Los circuitos de comunicación de voz pueden ser afectados adversamente. El proceso de reducción de carga (*derating*) de transformadores y motores debido a voltajes y corrientes armónicas incrementa el costo de capital para una aplicación dada.

La revisión de la norma IEEE Std 519-1992 se espera que incluya límites propuestos para generación de corrientes armónicas de parte de los consumidores, con las distribuidoras como responsables de limitar la distorsión de voltaje armónico dentro de límites específicos.

7.11 Interacción de iluminación con otros subsistemas de los edificios

7.11.1 Generalidades

El subsistema de iluminación en un edificio interactúa primariamente con los subsistemas eléctricos y de HVAC (Calentamiento, Ventilación y Aire Acondicionado). La iluminación reacciona con el sistema eléctrico porque usa electricidad como su fuente de energía, y reacciona con el sistema HVAC debido a los efectos de calor disipado por el subsistema de iluminación.

Basado en el método de función de transferencia (TFM) de la publicación ASHRAE, la tasa instantánea de ganancia de calor de la iluminación eléctrica, se puede calcular de:

$q_{el} = 3.41\ W\ F_{ul}\ F_{sa}$

donde

q_{el} es la ganancia de calor, Btu/lb
W watts totales de iluminación
F_{ul} es el factor de uso de la iluminación
F_{sa} es el factor de permisividad especial de iluminación

Los watts totales se obtienen de los datos nominales de todas las lámparas instaladas

El factor de uso es la relación entre los watts en uso y los watts totales instalados

El factor de permisividad especial es para lámparas fluorescentes o para luminarias que son ventiladas de manera que solo parte del calor va al espacio acondicionado. Para lámparas fluorescentes, Fsa toma en cuenta principalmente las pérdidas del balastro... ASHRAE recomienda un valor de 1.20 para aplicaciones generales. Las luminarias industriales tienen factores especiales, que deben ser tratados individualmente.

7.11.2 Interacción de subsistemas HVAC

La luz solar produce 36 lúmenes de luz por cada Btu por hora por pie cuadrado de radiación solar. A manera de comparación, la tabla 7-12 muestra esta relación para fuentes típica de iluminación interior.

Tabla 7-12-Salida comparativa de fuentes de luz

Fuente	**lúmenes/(Btu/h) por pie cuadrado (incluyendo balastro)**
Lámpara incandescente	6
Lámpara mercurio	15
Lámpara fluorescente	30
Lámpara haluros metálicos	30
HPS	35
Luz diurna	36

De esta manera, la luz solar produce más luz con menos calor asociado a esta producción. Un problema con la luz diurna es que sin control apropiado, se introduce más luz de la requerida. Un estudio hecho para un edificio de oficinas demuestra que por cada watt adicional por cada pie cuadrado de demanda de iluminación pico, existe un incremento de aproximadamente (0.6 kWh/año)/pie^2 en energía de enfriamiento requerida. Este resultado está basado en una ocupación proyectada de 2500 horas de plena carga por año.

7.12 Técnicas de análisis de costo

En el modelo de costos anuales (figura 7-9), los costos iniciales y de operación son determinados usando valores actuales o proyectados en hardware, instalación, energía y mantenimiento. Si los factores de costo han sido estimados con exactitud, el modelo de costo anual brinda una buena estimación del dinero que será gastado.

Parámetros de sistema de iluminación		Base
Datos Básicos	1. Lúmenes iniciales nominales por lámpara	
	2. Vida nominal de lámpara a ___ horas por arranque	
	3. Intervalo de reemplazo de grupo (horas)	
	4. Watts promedio por lámpara	
	5. Watts de entrada para luminaria	
	6. Coeficiente de utilización	
	7. Factor de balastro	
	8. Factor de depreciación de lámpara	
	9. Factor de depreciación de polvo	
	10. Lúmenes mantenidos efectivos por luminaria (1.6.7.8.9) 10A. Pie candelas promedio sobre superficie de trabajo (10 / pie^2/luminaria)	
Costos Iniciales	11. Costo neto de una luminaria	
	12. Costo de instalación (materiales) por luminaria	
	13. Costo de mano de obra por luminaria	
	14. Costo neto inicial de lámpara por luminarias	
	15. Costo inicial total por luminaria (11+12+13+14)	
	16. Costo de propiedad anual por luminaria (15% de 12+13+14 Impuestos)	
Costos de operación	17. Horas de uso por año	
	18. Número de grupos de lámparas reemplazadas anualmente	
	19. número de reemplazos puntuales 21A Número de reemplazos puntuales por año	
	20. Costo de reemplazo de lámparas	
	21. Costo mano de obra por reemplazo de grupos	
	22. Costo mano de obra por reemplazo de lámparas puntuales	
	23. Costo de limpieza por luminaria	
	24. Costo de energía anual por luminaria	
	25. Costos de operación totales por luminaria	
Total	26. Costo anual total: propiedad y operación por luminaria	

Figura 7.9. Hoja de trabajo de costos anuales

Con el análisis del costo del ciclo de vida (LCC), la evaluación puede tomar la forma de un análisis de valor presente. El método dado aquí utiliza costos diferenciales para brindar una comparación detallada de sistemas... La figura 7.10 muestra una descripción del análisis LCC.

Análisis de Costo ciclo de vida para _____m^2

	Luminaria A _____ Arreglo _____	Luminaria B _____ Arreglo _____
A. Costos iniciales de iluminación y aire acondicionado		
1. Costos instalados de luminaria: luminarias, lámparas, mano de obra, etc.	$ _____	$ _____
2. kW totales de iluminación	_____ kW	_____ kW
3. Toneladas de aire acondicionado requerido para iluminación: (3.41 x kW /12)	_____ ton	_____ ton
4. Primer costo de equipo de aire acondicionado	$ _____	$ _____
5. Otros costos diferenciales	$ _____	$ _____
6. Subtotal Costos instalados mecánicos y eléctricos	$ _____	$ _____
7. Impuestos iniciales	$ _____	$ _____
8. Costos totales	$ _____ A1	$ _____ B1
9. Costos instalados por metro cuadrado	$ _____	$ _____
10. Watts por metro cuadrado de iluminación	_____ watts	_____ watts
11. Valor residual (a γ años)	$ _____ As	$ _____ Bs
B. Costos anuales de energía y mantenimiento		
1. Lámparas: horas de uso x kW x $/kWh	$ _____	$ _____
2. Aire acondicionado: horas-operación x ton x kW/ton x $/kWh	$ _____	$ _____
3. Mantenimiento de aire acondicionado: ton x $/ton	$ _____	$ _____
4. Otros	$ _____	$ _____
5. Costo de lámparas: (No. De lámparas ____ @ $ ___/lámpara por N) (reemplazo de grupo cada N años, típicamente cada 1, 2, o 3 años dependiendo de la jornada de uso)	$ _____	$ _____
6. Costo de reemplazo de balastros (No. de balastros ____ @ $ ___/balastro por n) (n = número de años de vida de balastro)	$ _____	$ _____
7. Costo de limpieza de lámparas No. De luminarias ____ @ $ ___ cada una	$ _____	$ _____
8. Costo anual de seguro	$ _____	$ _____
9. Costo anual de impuestos	$ _____	$ _____
10. Costo anual total de mantenimiento y energía	$ _____ Ap	$ _____ Bp
11. Costo por metro cuadrado	$ _____	$ _____

Figura 7.10 Análisis de costo de ciclo de vida (LCC)