

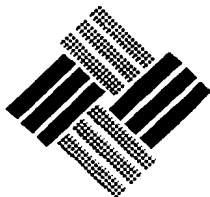
881217

**UNIVERSIDAD ANÁHUAC**

8

**ESCUELA DE INGENIERÍA**  
CON ESTUDIOS INCORPORADOS A LA U.N.A.M.

20j



VINCE IN BONO MALUM

**DISEÑO DE LA ILUMINACIÓN PARA TÚNELES  
EN CARRETERAS DE ALTA ESPECIFICACIÓN**

**Tesis que para obtener el título profesional de :  
Ingeniería Mecánica Eléctrica,  
Área Sistemas Eléctricos y Electrónicos**

Presentan:

**Carlos Enrique Estremadoyro Linares**  
**José Antonio Pérez Quiroga**

**Eugenio Ramón Macouzet Flores**  
**José Luis Alejandro Salsamendi Cao**

Asesor :  
Ing. Sergio Yumbe Mancilla

Revisor:  
Ing. Victor González Villela

MÉXICO, D.F.

1994

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>BASES TEÓRICAS.</b>	
1.1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.2. CONCEPTOS GENERALES.....	4
1.2.1. La visión.....	4
1.2.2. La luz.....	5
1.2.3. Luminotecnia.....	6
1.2.4. Flujo Luminoso.....	6
1.2.5. Ángulo Sólido.....	6
1.2.6. Intensidad Luminosa.....	8
1.2.7. Eficiencia Luminosa.....	8
1.2.8. Iluminación.....	8
1.2.9. Luminancia.....	9
1.3. PROPIEDADES DE LA LUZ.....	9
1.3.1. Reflexión.....	10
1.3.2. Refracción.....	11
1.3.3. Absorción.....	11
1.3.4. Transmisión.....	11
1.3.5. Difusión.....	12
1.4. LEYES FUNDAMENTALES DE LA LUMINOTECNIA.....	12
1.4.1. Ley fundamental de la iluminación.....	12
1.4.2. Ley del coseno.....	14
1.4.3. Ley de la inversa del cuadrado de las distancias.....	15

1.5. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA VISIÓN.....	17
1.5.1. Brillo.....	18
1.5.2. Iluminación.....	18
1.5.3. Sombras.....	18
1.5.4. Contraste.....	19
1.5.5. Deslumbramiento.....	19
1.6. FUENTES DE LUZ.....	20
1.6.1. Clasificación de las fuentes de luz.....	20
1.6.2. Lámparas de incandescencia (Fuentes de filamentos).....	21
1.6.3. Lámparas luminiscentes (Fuentes de descarga).....	22
1.6.4. Características de las fuentes de Luz.....	24
1.7. SISTEMAS DE ILUMINACIÓN.....	25
1.7.1. Tipos de iluminación.....	25
1.7.1.1. Iluminación directa.....	26
1.7.1.2. Iluminación semidirecta.....	26
1.7.1.3. Iluminación difusa o mixta.....	26
1.7.1.4. Iluminación semi-indirecta.....	27
1.7.1.5. Iluminación indirecta.....	27
1.7.2. Luminarias.....	28
1.7.2.1. Propiedades ópticas.....	28
1.7.2.2. Propiedades mecánicas y eléctricas.....	28
1.7.2.3. Clasificación de las luminarias.....	29

## CAPITULO II

### CRITERIOS DE ILUMINACIÓN DE TÚNELES.

2.1. BASES PARA EL CÁLCULO EN TÚNELES.....	31
2.1.1. Introducción.....	31

2.2. DEFINICIONES Y RECOMENDACIONES DE LA S.C.T. ....	31
2.2.1. Túneles largos: .....	32
2.2.2. Túneles cortos: .....	32
2.2.3. Cruce con paso elevado: .....	32
2.2.4. Existen fenómenos que están relacionados con el alumbrado vial de túneles, tales como: .....	32
2.2.4.1. Adaptación Visual:.....	32
2.2.4.2. Fenómeno de Hoyo Negro: .....	34
2.2.4.3. Fenómeno de Estructura Oscura:.....	34
2.2.4.4. Contraste: .....	35
2.2.4.5. Efecto de Escalera:.....	35
2.2.5. Objetivos de la iluminación de túneles: .....	36
2.2.5.1. Generalidades:.....	36
2.2.5.2. Iluminación diurna de los túneles largos: .....	37
2.2.5.3. Iluminación Diurna de Túneles Cortos:.....	39
2.2.5.4. Iluminación nocturna de túneles largos y cortos: .....	40
2.3. CRITERIOS DE SELECCIÓN, UBICACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LUMINARIAS .....	40
2.3.1. Lámparas para Iluminación de Túneles: .....	40
2.3.2. Descripción de los Equipos de Alumbrado: .....	41
2.3.2.1. Características de las luminarias para la iluminación de túneles: .....	41
2.3.3. Factor de Depreciación por Envejecimiento (FDE): .....	41
2.3.4. Factor de Depreciación por Ambiente (FDA): .....	42
2.3.5. Factor de Mantenimiento (CM): .....	42
2.3.6. Coeficiente de Utilización:.....	42
2.3.7. Ubicación de los Equipos de Alumbrado en los túneles: .....	42
2.3.8. Alumbrado Vial de Emergencia para Túneles:.....	43
2.3.9. Mantenimiento de las Instalaciones de Alumbrado en Túneles: .....	43

## CAPÍTULO III

### CÁLCULO PARA LA ILUMINACIÓN DE UN TÚNEL VEHICULAR.

3.1. INTRODUCCIÓN.....	46
3.1.1. Alcances del capítulo.....	46
3.1.2. Autopista México - Acapulco.....	47
3.1.3. Descripción y Localización.....	47
3.2. CRITERIOS PARA LA ILUMINACIÓN DE UN TÚNEL DE AUTOPISTA.....	49
3.2.1. Niveles de iluminación.....	49
3.2.2. Tipos de alumbrado.....	51
3.2.3. Selección de luminarias.....	51
3.2.3.1. Particularidades de las luminarias elegidas.....	52
3.2.4. Criterios de respaldo.....	53
3.3. CALCULO DE LA ILUMINACIÓN DE LOS TÚNELES GEMELOS: AGUA DE OBISPO.....	54
3.3.1. Iluminación.....	54
3.3.1.1. Cálculo de niveles de iluminación.....	54
3.3.1.2. Posición de Luminarias.....	56
3.3.1.3. Número total de luminarias.....	61
3.3.2. Instalación Eléctrica.....	61
3.3.2.1. Separación en circuitos.....	61
3.3.2.2. Sección del Conductor.....	63
3.3.2.3. División en Tableros.....	69
3.3.2.4. Conexión.....	72
3.3.3. Sistema de Respaldo.....	74
3.3.3.1. Plantas Generadoras.....	75
3.3.3.2. Fuente ininterumpida de potencia (UPS).....	76

3.3.4. Casa de Máquinas.....	77
3.3.4.1. Sub-estación.....	77
3.3.4.2. Cálculo de Tierras.....	77
3.3.4.3. Transformador.....	80
3.3.4.4. Diagrama Unifilar.....	81
3.4. Costos.....	83
CONCLUSIONES.....	86
BIBLIOGRAFÍA.....	88
ANEXO A.....	91

## INTRODUCCIÓN

Ante la decisión del Gobierno Federal de mejorar y ampliar la infraestructura de transportes de México, se están construyendo carreteras de alta especificación entre las principales ciudades. En este esfuerzo se están usando tecnologías de punta y nuevos esquemas de financiamiento, como lo es la concesión a la iniciativa privada para la construcción y operación de las mismas.

Actualmente la infraestructura carretera es insuficiente y se requiere una rápida modernización. Debido a la orografía del país, la construcción de carreteras se hace compleja y en las zonas sinuosas normalmente existen carreteras de pocos carriles (2 por lo general). Para la construcción de carreteras de alta especificación, que cumplan con las nuevas recomendaciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, así como con las normas internacionales, éstas nuevas autopistas requieren de una gran inversión debido a que es imprescindible la construcción de túneles y puentes para solucionar los problemas de la orografía antes mencionados. Con esta mejora en el diseño se logran disminuir dramáticamente los tiempos y costos de transporte, lo cual tiene un impacto positivo en el desarrollo del país.

Dentro de las tecnologías de punta utilizadas para la construcción de las carreteras, la de los túneles presenta aspectos muy interesantes para la ingeniería. En esta tesis estudiaremos la iluminación de túneles, que es uno de los elementos básicos en el diseño de carreteras de alta especificación.

La ciencia que estudia los fenómenos relacionados con la iluminación y sus aplicaciones es la luminotecnía. En el capítulo I de la presente tesis se exponen las bases teóricas y conceptos principales de la luminotecnía, así como algunos factores que influyen en la visión humana.

Posteriormente, en el capítulo II, se exponen los criterios generales y las recomendaciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, en cuanto a la iluminación de túneles en carreteras de alta especificación. Estos criterios y recomendaciones están basados en las normas internacionales y la aplicación de la teoría de la luminotecnía a un caso específico, que es el de la iluminación de túneles.



En el capítulo III, y para completar el estudio, se desarrolla un caso real. Específicamente el de la iluminación de un túnel vehicular en la nueva carretera México - Acapulco. Este ejemplo es de interés ya que nos muestra todos los aspectos a tomar en cuenta en el diseño de la iluminación de túneles y nos da la oportunidad de mostrar los distintos cálculos y la aplicación de los criterios y recomendaciones antes mencionados.

# **CAPÍTULO I**

## **BASES TEÓRICAS**

## **1.1. INTRODUCCIÓN**

En este capítulo, sentaremos las bases teóricas necesarias para la comprensión y debida aplicación de la luminotecnia. Primero se describen los conceptos principales así como las magnitudes, unidades básicas y relaciones de esta ciencia. Después se describen las propiedades de la luz y su importancia para su control, manipulación y uso. Además se describen las leyes fundamentales de la luminotecnia que son las bases teóricas para cualquier aplicación práctica. Se estudian los factores que influyen en la visión al igual que las fuentes de luz, sus características y clasificación. Por último, se describen, en general, los sistemas de iluminación utilizados en la actualidad.

## **1.2. CONCEPTOS GENERALES.**

A continuación definiremos conceptos fundamentales como son la visión y la luz, así como los conceptos, relaciones y unidades fundamentales relacionados con los fenómenos de la luminotecnia y la iluminación en general.

### **1.2.1. La visión.**

La visión es el resultado de los estímulos luminosos sobre el ojo y el mecanismo asociado de interpretación cerebral. Para que el ojo tenga visión es indispensable que se cumplan tres requisitos: el primero consiste en tener luz (una forma de energía radiante), el segundo es que existan objetos que modifiquen dicha energía, y por último es necesario que el ojo reciba la energía emitida y forme las imágenes. Después de cumplirse estos tres requisitos indispensables entra en juego el cerebro el cual interpreta la información que recibe.

## 1.2.2. La luz.

La luz se define como la sensación producida en el ojo por ondas electromagnéticas, las cuales se transmiten a distancia en todas las direcciones y en cualquier ambiente, es decir, no necesitan de una sustancia en especial para transportarse, pues incluso se transmiten en el vacío absoluto.

Las radiaciones electromagnéticas de longitudes de onda desde 380 nm (color violeta) hasta 780 nm (color rojo) son visibles por el ojo humano. El espectro visible por el ojo humano se muestra en la fig. 1.1

La luz está compuesta por campos electromagnéticos periódicos que se propagan en el espacio transportando energía bajo la forma de oscilaciones o vibraciones.

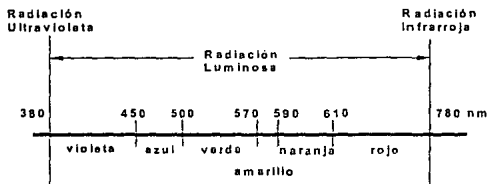


Fig. 1-1 Límites Aproximados de Radiación de los Diferentes Colores del Espectro Visible.

### 1.2.3. Luminotecnia.

La luminotecnia es la rama de la ciencia que estudia la producción y aplicaciones de la luz. Dentro de la luminotecnia se manejan principios, magnitudes y unidades propios del estudio de la luz, su producción y aplicaciones, los cuales se denominan sistemas de magnitudes luminotécnicas fundamentales.

### 1.2.4. Flujo Luminoso.

Todos los cuerpos emiten una energía radiante por unidad de tiempo, a ésta se le denomina potencia o flujo radiante. A la parte de este flujo que produce sensación luminosa se le llama flujo luminoso, es decir, es la medida de la potencia luminosa o la energía luminosa radiada al espacio por unidad de tiempo. El flujo luminoso de un fuente de luz no se distribuye uniformemente en el espacio debido a la interrupción que producen ciertos objetos. Para representarlo se utiliza la letra ( $\Phi$ ) y para su medición se utiliza el Lumen (lm).

### 1.2.5. Ángulo Sólido.

El flujo luminoso se distribuye por el espacio en todas direcciones, a fin de poder describir y expresar estos fenómenos se utiliza el concepto de ángulo sólido. El carácter radiante de la luz requiere una división *angular* del espacio (fig 1-2). Un haz de rayos dirigidos hacia la superficie (F) delimita en el espacio una superficie cónica, ocupada por el flujo luminoso ( $\Phi$ ). El vértice de este cono se encuentra en el punto luminoso (L) y su superficie lateral está formada por rayos dirigidos hacia el contorno de la superficie (F). Tal división del espacio se llama *ángulo sólido*.

Así como el ángulo plano viene medido por el arco de radio unidad que comprende, el ángulo sólido se mide por la porción de superficie esférica de radio unidad que intercepta.

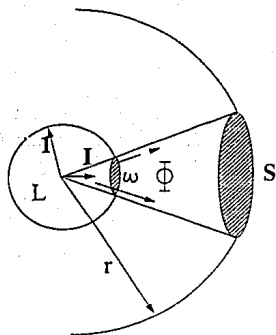


Fig. 1-2 Representación del Ángulo Sólido ( $\omega$ ).

El ángulo sólido de un cono se define como el cociente del área cortada sobre una superficie esférica (con centro coincidiendo con el vértice del cono) entre el cuadrado del radio de dicha esfera.

$$\omega = \frac{F}{r^2}$$

Donde:  $\omega$  = ángulo sólido  
 $F$  = superficie esférica  
 $r$  = distancia

El ángulo sólido se representa con la letra  $\omega$  y se ha definido como su unidad de medida el estereorradián (str), el cual es el ángulo sólido tal que subtiende un casquete esférico de superficie igual al cuadrado del radio.

### 1.2.6. Intensidad Luminosa.

La intensidad luminosa de una fuente en una dirección dada es la densidad del flujo luminoso en aquella dirección; medida por la cantidad de flujo emitido por unidad de ángulo sólido. Su unidad de medida es la candela (cd), se representa con la letra I y es equivalente a 1 lm / 1 str..

$$I = \frac{\Phi}{\omega}$$

donde: I = Intensidad Luminosa  
Φ = Flujo Luminoso  
ω = Ángulo Sólido

### 1.2.7. Eficiencia Luminosa.

Podemos llamar eficiencia luminosa al flujo emitido por una fuente por unidad de potencia eléctrica consumida. La eficiencia luminosa sirve para conocer el rendimiento de una lámpara. Por lo tanto cuanto mayor sea la eficiencia luminosa, menor será el consumo de energía. Se mide en lumen por watt (Lm/W) y se representa con la letra η

$$\eta = \frac{\Phi}{W}$$

donde: η = Eficiencia Luminosa  
Φ = Flujo Luminoso  
W = Potencia Eléctrica

### 1.2.8. Iluminación.

La iluminación es el flujo luminoso recibido por una superficie por unidad de área; por lo tanto, en una superficie dada, la iluminación será igual al resultado de dividir el flujo luminoso entre el área de la superficie. Se representa por la letra E.

$$E = \frac{\Phi}{A}$$

donde: E = Iluminación  
 $\Phi$  = Flujo Luminoso  
A = Área

La iluminación se mide en luxes; un lux equivale a iluminar una superficie de un metro cuadrado con un flujo de un lumen uniformemente repartido, el aparato de medición de la iluminación se llama luxómetro.

### 1.2.9. Luminancia.

También se le conoce como brillo o densidad luminosa y se define como la intensidad luminosa emitida por unidad de área de superficie emisora aparente. Se mide en candelas sobre metro cuadrado ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ).

$$B = \frac{I}{A}$$

donde: B = Brillo  
I = Intensidad Luminosa  
A = Área de la Superficie Emisora

## 1.3. PROPIEDADES DE LA LUZ.

Después de producir la luz por cualquier método nos encontramos con el problema de su control ya que las diferentes fuentes de luz existentes no son capaces de distribuirla de acuerdo a nuestras necesidades específicas, y por lo tanto, nos vemos obligados a utilizar diversos dispositivos de control que se encargan de aplicar eficaz y eficientemente la luz emitida. Los dispositivos mencionados consisten en el aprovechamiento específico de uno o varios fenómenos físicos que a continuación se explican. Es por esto que las propiedades de la luz son importantes para el estudio de la luminotecnía.



### 1.3.1. Reflexión.

Esta se efectúa cuando una superficie regresa la luz que incide sobre ella. Se debe a las condiciones moleculares de la superficie reflejante, al ángulo de incidencia de los rayos luminosos y al color de los rayos incidentes. La ley fundamental de la reflexión dice que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. La ley anterior es puramente teórica, y únicamente se cumple en el caso de que la superficie de incidencia sea perfectamente lisa y brillante, como en el caso de un espejo, en el que se obtiene una reflexión llamada especular. En el caso de superficies rugosas, irregulares o esmaltadas se obtienen reflexiones llamadas difusas o semidifusas.

La siguiente tabla indica el porcentaje de luz reflejada para materiales comunes.

SUPERFICIE REFLECTORA	% DE LUZ REFLEJADA
Carbonato de Magnesio	97 a 98
Espejos	80 a 90
Aluminio pulido	60 a 70
Cromo pulido	60 a 65
Níquel pulido	60 a 65
Pintura blanca (mate)	75 a 90
Papel secante blanco	70 a 80
Porcelana esmaltada	60 a 70
Pintura de aluminio	60 a 70
Pintura Negra	3 a 5

Tabla 1-1 Reflexión de Diferentes Materiales.

### 1.3.2. Refracción.

La dirección de los rayos luminosos es desviada al pasar de un medio hacia otro que posea diferente densidad. La ley fundamental de la refracción nos dice que el cociente de los índices de refracción de ambos medios es igual al cociente de los senos de los ángulos de incidencia y de refracción. El índice de refracción es la relación entre la velocidad de la luz a través del aire y su velocidad a través del medio correspondiente.

A continuación, como referencia, tenemos una tabla de índices de refracción para materiales comunes que se emplean en luminotecnia.

MATERIAL	ÍNDICE DE REFRACCIÓN
Aire	1
Agua	1.33
Vidrio común	1.5 a 1.54
Cristal	1.56 a 1.78

### 1.3.3. Absorción.

En las superficies reflectoras y transmisoras de la luz, una parte de la energía luminosa es absorbida. Debido a este fenómeno es que los cuerpos tienen un color determinado: puesto que la luz del color de la superficie se absorbe en menor proporción que los componentes de colores diferentes. Si un cuerpo es de color blanco, quiere decir que refleja totalmente la luz blanca. Por el contrario, un cuerpo negro absorbe toda la luz blanca, mientras que uno gris absorbe una parte de ella y refleja otra. Un cuerpo es de color verde cuando absorbe todos los colores de que está compuesta la luz blanca menos el verde.

### 1.3.4. Transmisión.

La transmisión de la luz es la propagación de la misma a través de los cuerpos transparentes o translúcidos. El grado de difusión de los rayos depende del tipo y densidad del material y varían por refracción.

### 1.3.5. Difusión.

Es la capacidad que posee la luz de dispersarse o distribuirse en todas las direcciones del espacio. Una superficie perfectamente difusora tiene la misma luminancia en todas direcciones.

La reflexión, la absorción y la transmisión están íntimamente ligadas pues si iluminamos una superficie, una parte del flujo luminoso se refleja, otra se transmite y otra más es absorbida por el cuerpo. Como consecuencia de esto podemos concluir con la siguiente relación:

(total)  $f_O = f_R + f_A + f_T$       Donde:  $f_O$  = Flujo luminoso incidente

$f_R$  = Flujo luminoso reflejado

$f_A$  = Flujo luminoso absorbido

$f_T$  = Flujo luminoso

transmitido

## 1.4. LEYES FUNDAMENTALES DE LA LUMINOTECNIA.

En esta sección, se explicará brevemente las leyes en las cuales se encuentra basada la luminotecnica.

### 1.4.1. Ley fundamental de la iluminación.

La ley fundamental de la iluminación dice así: "La iluminación de una superficie situada perpendicularmente a la dirección de la radiación luminosa es directamente proporcional a la intensidad luminosa de la fuente luminosa e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que la separa del mismo". Para entenderla mejor a continuación encontramos una figura ilustrativa de esta ley.

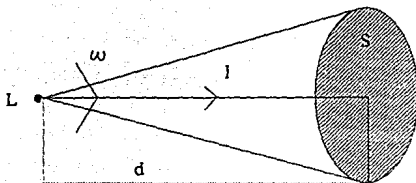


FIGURA 1-3. Ley fundamental de la iluminación.

donde:

L = Fuente Luminosa

$\omega$  = Ángulo Sólido

I = Intensidad Luminosa

S = Superficie

d = Distancia entre Superficie y Fuente Luminosa

Esta ley se aplica en fuentes luminosas puntuales, sin embargo, en la práctica se puede utilizar cuando la distancia entre la superficie de la fuente luminosa y la superficie sobre la cual se desea calcular su iluminación es diez veces mayor que el diámetro de la superficie luminosa, y en el caso de que ésta sea irregular, se tomará en cuenta su mayor dimensión transversal. En estas condiciones el error obtenido en cálculos de iluminación es menor al 1%, lo cual se considera suficientemente aproximado para la mayoría de los casos prácticos, y tiende a cero cuando la distancia entre ambas superficies aumenta.

### 1.4.2. Ley del coseno.

La ley del coseno se utiliza para calcular el valor de la iluminación en superficies en las cuales los rayos de luz incidentes no son perpendiculares a la misma y se define:

"La iluminación es proporcional al coseno del ángulo de incidencia de los rayos luminosos en el punto iluminado".

En la figura 1-4. se muestra una superficie que recibe un flujo luminoso uniforme  $\Phi$  procedente de un fuente de luz; esta superficie es perpendicular a la dirección del flujo y su iluminación, como ya se expresó, es igual al cociente del flujo entre el área de la superficie.

Así mismo, se tiene otra superficie  $S'$  la cual no es perpendicular al flujo luminoso.

La superficie  $S'$  se puede expresar como:

$$S' = \frac{S}{\cos \alpha}$$

y siendo la iluminación de una superficie:

$$E = \frac{\Phi}{\text{Área}}$$

por lo tanto su iluminación será: (sabemos que recibe el mismo flujo luminoso que  $S$ )

$$E' = \frac{\Phi}{S} \cos \alpha$$

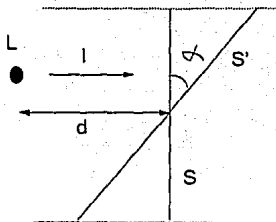


FIGURA 1-4. Ley del coseno.

Haciendo referencia a la figura ilustrativa de la ley general de la iluminación podemos expresar:

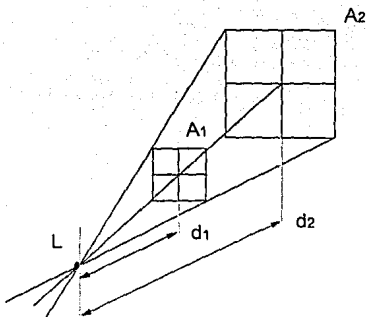
$$E' = \frac{I \cos \alpha}{d^2}$$

donde:  $E'$  = Iluminación  
 $I$  = Intensidad Luminosa  
 $\alpha$  = Ángulo entre S y S'  
 $L$  = Fuente Luminosa  
 $d$  = Distancia de fuente a S

#### 1.4.3. Ley de la inversa del cuadrado de las distancias.

Esta ley es consecuencia de la ley fundamental de la iluminación. Se enuncia de la siguiente manera:

"Para una misma fuente luminosa, las iluminaciones en diferentes superficies son inversamente proporcionales al cuadrado de sus distancias a dicha fuente."



**FIGURA 1-5.** Ley de la inversa del cuadrado de la distancia.

En la figura 1-5. se representa una fuente luminosa, donde:

L = Fuente Luminosa

A<sub>1</sub> = Superficie 1

A<sub>2</sub> = Superficie 2

d<sub>1</sub> = Distancia a Superficie 1

d<sub>2</sub> = Distancia a Superficie 2

La iluminación en la superficie A<sub>1</sub> será:

$$E_1 = \frac{I \cos \alpha}{d_1^2}$$

y la obtenida en la superficie  $A_2$ , situada a una distancia  $d_2$ :

$$E_2 = \frac{I \cos \alpha}{d_2^2}$$

de las expresiones anteriores podemos obtener:

$$I \cos \alpha = E_1 d_1^2$$

$$I \cos \alpha = E_2 d_2^2$$

y por lo tanto tenemos que:

$$E_1 d_1^2 = E_2 d_2^2$$

de donde obtenemos:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

## 1.5. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA VISIÓN.

Brevemente describiremos a continuación los factores que modifican o alteran la visión humana, teniendo efectos tanto fisiológicos como psicológicos en el hombre. Son sumamente importantes para las aplicaciones prácticas en casos concretos de iluminación.



### **1.5.1. Brillo.**

El brillo, en el ojo humano, es una sensación causada por las variaciones en la luminancia de los objetos iluminados *-brillo reflejado-* o luminosos *-brillo directo.* El brillo es directamente proporcional a la intensidad luminosa de una fuente e inversamente proporcional a la superficie de la fuente luminosa emisora (caso de brillo directo) o la superficie que refleja la luz incidente (caso de brillo reflejado).

### **1.5.2. Iluminación.**

La iluminación (E) afecta la capacidad visual, el estado de ánimo de las personas, la aptitud para realizar un trabajo y el poder de relajación. Cada actividad que realizamos requiere un cierto nivel de iluminación. Dicho nivel está en función de los siguientes factores:

- Tamaño de los detalles a captar.
- Distancia entre el ojo y el objeto observado.
- Factor de reflexión del objeto observado.
- Contraste entre los detalles del objeto y el fondo sobre el que destaca.
- Tiempo empleado en la observación.
- Rapidez del movimiento del objeto.

Cuanto mayor sea la dificultad para la percepción visual mayor será el nivel medio de iluminación requerido.

### **1.5.3. Sombras.**

Para lograr una visión estereoscópica adecuada se requiere que los objetos presenten superficies menos iluminadas que otras. Estas zonas que se encuentran menos iluminadas son las sombras, las cuales destacan las formas plásticas de los objetos.

#### **1.5.4. Contraste.**

Se llama contraste a la diferencia de luminancia que existe entre un objeto y el espacio inmediato. Los trabajos que precisan una gran agudeza visual requieren un mayor contraste.

Las mejores condiciones visuales se consiguen cuando existe un adecuado contraste de luminancia entre el objeto visual y las superficies circundantes.

#### **1.5.5. Deslumbramiento.**

El deslumbramiento es un efecto que produce molestia o disminución de la capacidad para distinguir los objetos, o ambas cosas a la vez, debido a una inadecuada iluminación o escalamiento de luminancias, o como consecuencia de contrastes excesivos en el espacio o en el tiempo.

Está íntimamente ligado con el brillo, pero no depende del brillo intrínsecamente sino de las diferencias de brillo.

El deslumbramiento se produce en los siguientes casos, los cuales habrá que evitar cuando se calcule un proyecto de iluminación:

- Brillo excesivo de una fuente luminosa. El límite tolerable para la visión directa de una lámpara es el producido por una luminancia de  $7500 \text{ cd/m}^2$ .
- Situación inadecuada de fuentes luminosas de brillo intenso, es decir próximas al órgano visual del observador o en el centro de su campo visual.
- Contrastes excesivos de luz y sombras en el campo visual. A mayor contraste de luminancia, mayor deslumbramiento.
- Brillo reflejado por superficies metálicas o muy pulimentadas, es decir, el brillo producido por reflexión especular.

- Tiempo de exposición excesivo. Una luminaria de valor bajo puede producir deslumbramiento si el tiempo de exposición es prolongado.

Los efectos que se producen en el observador son los siguientes:

- Disminución de la percepción visual. El observador concentra involuntariamente su atención hacia el objeto más brillante y disminuye, por tanto, la percepción en el resto del campo visual. Este efecto es aprovechado en algunos casos: por ejemplo, en los anuncios luminosos de tipo publicitario.
- Fatiga visual, lo que contribuye a un menor rendimiento en el trabajo a realizar.
- Dar un aspecto falso y perjudicial a los objetos excesivamente iluminados.

El estudio del deslumbramiento juega un papel decisivo al realizar cálculos de alumbrado público, tema que se discutirá posteriormente.

## 1.6. FUENTES DE LUZ

A cualquier cuerpo que emite radiaciones electromagnéticas visibles por el ojo se le denomina como una fuente de luz. Las fuentes artificiales de luz se conocen como lámparas o luminarias.

### 1.6.1. Clasificación de las fuentes de luz.

Existen dos tipos de fuentes de luz eléctrica, las que emiten radiación en forma de calor y las que emiten radiación luminiscente, aunque también existen algunas que emiten ambos tipos de radiación (mixta).

En la figura 1-6 se muestran las diferentes subdivisiones de las fuentes de luz eléctrica.

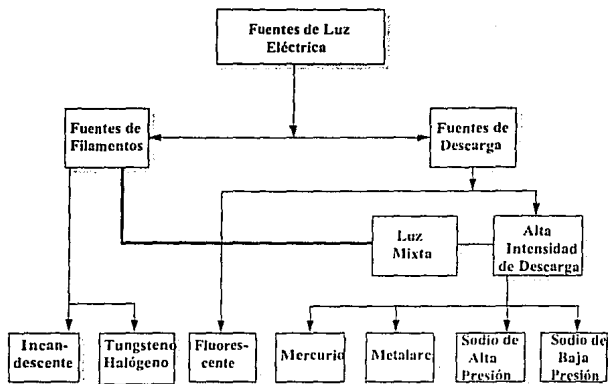


Fig. 1-6. Subdivisiones de las fuentes de luz eléctrica.

A continuación se encuentra una explicación básica de los dos tipos de fuentes de luz eléctrica y algunas características de las mismas.

### 1.6.2. Lámparas de incandescencia (Fuentes de filamentos).

Cuando provocamos que una corriente eléctrica circule a través de una resistencia ésta se calienta, y si éste fenómeno se realiza en el vacío la resistencia se pone incandescente adquiriendo un color rojo-blanco, lo cual provoca una emisión de luz y calor. Este principio fue puesto en práctica por primera vez por Henrich Goebel en 1854, haciendo uso personal de su descubrimiento. La primera lámpara incandescente fabricada en serie de filamento de carbón fue construida por Thomas Alva Edison en 1879.

Para producir luz lo más parecida a la luz blanca, se requiere elevar la temperatura del filamento lo más alto posible.

El material que más alto punto de fusión tiene es el carbón, además de ser el más económico de todos. El único defecto que tenían las lámparas de carbón es que su duración era muy limitada, por lo que en la actualidad se utilizan casi exclusivamente las de filamento de tungsteno.

La lámpara de incandescencia es muy fácil de emplear, pues se encuentra muy fácilmente en el mercado, además de existir toda una gama de potencias. El precio del equipo e instalación del mismo es moderado, pero el consumo de energía es alto. Posee además la desventaja de un bajo rendimiento luminoso, además de una vida útil reducida. Por lo anterior, se restringe a aplicaciones principalmente sencillas, es decir menores a 200 lux, y número de horas de uso menores a 2000.

### 1.6.3. Lámparas luminiscentes (Fuentes de descarga).

La luminiscencia se puede definir como la radiación luminosa emitida por un cuerpo por efecto de un agente exterior que excita los átomos de dicho cuerpo.

La luminiscencia puede ser de varios tipos catalogándose de acuerdo al fenómeno que la origina:

Radio luminiscencia.- Es la que se produce por las radiaciones emitidas por los cuerpos radiactivos.

Bio luminiscencia.- Se provoca por fenómenos bioquímicos.

Quimioluminiscencia.- Se produce por fenómenos químicos.

Triboluminiscencia.- Se provoca por agentes mecánicos, tales como frotamiento, pulverización, etc., del cuerpo luminiscente.

**Electroluminiscencia.**- Se produce por el paso de una descarga eléctrica a través de los gases luminiscentes.

**Fotoluminiscencia.**- Se produce por la reacción de otras radiaciones luminosas, de distinta longitud de onda.

De las luminarias luminiscentes, una de las más comunes para la iluminación de túneles es la de *vapor de sodio de alta presión*. Esta lámpara está formada por un tubo de arco de cerámica de óxido de aluminio policristalino relleno de vapor de sodio, mercurio y gas xenón; teniendo un sellado monolítico en sus extremos también de cerámica, electrodos de tungsteno y bombilla de vidrio borosilicato al vacío.

De todas las lámparas de alta intensidad de descarga las de vapor de sodio de alta presión son las de mayor eficacia, lo cual se debe al descubrimiento de la cerámica (óxido de aluminio policristalino), que resiste el ataque del vapor de sodio y las altas temperaturas de operación.

Las lámparas de vapor de sodio encuentran sus principales aplicaciones en la iluminación de exteriores, y han desplazado en este campo a las fluorescentes. Su rendimiento luminoso es muy elevado. Son muy útiles en carreteras y autopistas con niebla debido al color amarillo de la luz que producen. Debido a su color monocromático tienen restringidas todas las aplicaciones en las que sea primordial la discriminación de colores.

La lámpara fluorescente se aplica cuando se requiere una elevada temperatura de color, es decir, para tonos blancos de luz predominando los tonos fríos. Al contrario de las de incandescencia, se aplica para instalaciones que deban superar los 200 lux y tengan uso prolongado.

Las lámparas de vapor de mercurio se pueden aplicar cuando el color de la luz no es una restricción. Resultan económicas debido a su alto rendimiento luminoso y larga duración. Son ideales para alumbrado directo, suspendidas a gran altura como es el caso de las naves industriales.

Las de xenón son ideales para iluminar grandes espacios abiertos como son campos

deportivos, plazas, parques, etc.

#### 1.6.4. Características de las fuentes de Luz.

Debido a la gran variedad de luminarias que existen actualmente en el mercado, en el momento de hacer la selección de alguna para satisfacer una necesidad determinada se deben de estudiar ciertas características desde los puntos de vista luminotécnico, económico, técnico de funcionamiento y tecnología de fabricación. A continuación se describen algunas de estas características:

- **Potencia nominal:** Condiciona el flujo luminoso y las proporciones de la instalación bajo el punto de vista eléctrico (sección de los conductores, tipos de protección, etc. ).
- **Eficiencia luminosa y degeneración del flujo luminoso durante el funcionamiento promedio de vida y costo de la lámpara:** Estos factores condicionan la economía de la instalación. La eficiencia de una lámpara disminuye con el tiempo. Se dice que una lámpara ha concluido su vida útil cuando el flujo luminoso es menor al 80% del flujo luminoso inicial.
- **Rendimiento cromático:** Condiciona la mayor o menor apreciación de los colores respecto a la observación con luz natural.
- **Temperatura de color:** Condiciona la tonalidad de la luz. Se dice que una lámpara proporciona luz cálida o fría si prevalecen las radiaciones luminosas de color rojizo o azulado respectivamente.
- **Color de la luz:** El color de la luz emitida por una lámpara se determina por su composición espectral. Las lámparas incandescentes únicamente pueden radiar un color blanco cálido, debido a su alto contenido de rojo. Los colores de las lámparas de descarga están determinados por los gases o vapores que contengan. Con las lámparas fluorescentes se puede obtener cualquier tipo de matiz que se desee, mediante la mezcla de sustancias luminiscentes conocidas, dependiendo de la aplicación que se le vaya a dar, como por ejemplo iluminación decorativa o iluminación de trabajo.

- **Tiempo transcurrido hasta obtenerse el flujo luminoso normal:** La condición ideal de una lámpara es que cuando la conectemos, inmediatamente, emita su flujo total; la condición anterior la cumplen estrictamente todas las lámparas incandescentes, mientras que las fluorescentes necesitan una balastro de arranque rápido o conexiones denominadas Rapid-Start (encendido rápido). Las otras lámparas de descarga, requieren de un tiempo de encendido que puede llegar a ser de varios minutos.

## 1.7. SISTEMAS DE ILUMINACIÓN

### 1.7.1. Tipos de iluminación.

Los sistemas de iluminación se clasifican según la distribución del flujo luminoso, por encima o por debajo de la horizontal, o sea teniendo en cuenta la cantidad del flujo luminoso proyectada directamente a la superficie iluminada y la que llega a la superficie después de reflejarse en el techo y las paredes. Si la mayor parte del flujo luminoso se envía hacia abajo, se produce una iluminación directa, por el contrario, si la mayor parte del flujo luminoso se envía hacia el techo u otro medio para que llegue a la superficie iluminada después de proyectarse en el mismo, la iluminación puede considerarse como iluminación indirecta. Los demás sistemas se encuentran clasificados como combinaciones de los anteriores, en los cuales se proyecta la luz tanto hacia arriba como hacia abajo.

En la siguiente tabla se encuentra un resumen de los diferentes sistemas de iluminación.

DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO LUMINOSO %		
Sistema de Iluminación	Indirecta	Directa
Iluminación directa	0 a 10	100 a 90
Iluminación semidirecta	10 a 40	90 a 60
Iluminación mixta o difusa	40 a 60	60 a 40
Iluminación semi-indirecta	60 a 90	40 a 10
Iluminación indirecta	90 a 100	10 a 0



Para conseguir que parte del flujo no se dirija directamente hacia el suelo, obteniéndose así el nivel de iluminación deseado, se utilizan dispositivos llamados aparatos de alumbrado. Estos aparatos utilizan las propiedades de la luz (reflexión, refracción, etc.) explicadas anteriormente.

A continuación se explican brevemente los distintos sistemas de iluminación.

#### **1.7.1.1. Iluminación directa.**

Como se puede observar en la tabla, para la iluminación directa, casi todo el flujo luminoso se dirige hacia la superficie que se desea iluminar, en la práctica esto resulta imposible, pues siempre existe alguna luz reflejada en las paredes, que se suma a la procedente de las paredes. La iluminación directa produce sombras duras y profundas, y existe el riesgo de deslumbramiento al situarse dentro del campo visual, para evitarlo se colocan viseras o placas verticales que corten o difundan la porción del haz luminoso que pudiera llegar directamente a la vista del observador.

#### **1.7.1.2. Iluminación semidirecta.**

En la iluminación semidirecta las sombras que se producen no son tan duras, y se reduce considerablemente el peligro de deslumbramiento. Para conseguirla basta con añadir un vidrio difusor adecuado a un aparato concebido para iluminación directa. Con ello se reduce el rendimiento luminoso, pero el efecto obtenido es agradable a la vista.

#### **1.7.1.3. Iluminación difusa o mixta.**

Como se ve en la tabla, aproximadamente la mitad del flujo luminoso se dirige directamente al objeto a iluminar, la otra mitad hacia el techo y llega a la superficie que se va a iluminar, después de reflejarse varias veces en las paredes y el techo.

Con este sistema se consigue eficientemente la iluminación de las sombras y se reduce en mayor grado el problema del deslumbramiento.

El efecto que se consigue es agradable a la vista debido a que todas las superficies están iluminadas y no existen zonas oscuras. El inconveniente que posee éste sistema de iluminación es que al no producir sombras los objetos parecen planos y se pierde la plasticidad del relieve.

#### **1.7.1.4. Iluminación semi-indirecta.**

También se le conoce como iluminación semidifusa. Una pequeña parte del flujo luminoso se recibe directamente por la superficie a iluminar mientras que la mayor parte de dicho flujo luminoso se envía hacia el techo en donde se refleja.

El rendimiento luminoso es bajo porque en las sucesivas reflexiones que sufre la luz antes de llegar a la superficie que se va a iluminar, parte del flujo luminoso es absorbido por paredes y techo. Para que éste sistema sea efectivo las paredes y el techo deben de estar cubiertas con material de elevada reflexión es decir de colores claros.

Las sombras que se llegan a producir son suaves y agradables a la vista y la iluminación es de buena calidad.

#### **1.7.1.5. Iluminación indirecta.**

En este sistema de iluminación se dirige todo o casi todo el flujo luminoso hacia el techo, de forma que la fuente de luz queda totalmente oculta a los ojos del observador, y éste no percibe ninguna zona luminosa; solamente aprecia zonas iluminadas.

Las paredes y el techo han de ser blancas para conseguir un rendimiento luminoso aceptable con niveles de potencia luminosa moderados. Es el más caro de todos los sistemas de iluminación, pero el más agradable a la vista, debido a que no produce contrastes de brillo y carece de deslumbramiento. Es el más semejante a la luz natural.

### **1.7.2. Luminarias.**

Son dispositivos que filtran o transforman la luz emitida por una o varias lámparas, además de que contienen todos los accesorios necesarios para fijarlas, protegerlas y conectarlas al circuito de alimentación.

Otra función que poseen es la de proteger a la fuente de luz contra daños de origen mecánico o ambiental, además de impedir el acceso directo a las partes sometidas a tensión, con la finalidad de evitar accidentes.

Deben poseer ciertas propiedades, con el fin de contar con las características que se mencionan a continuación.

#### **1.7.2.1. Propiedades ópticas.**

- Distribución luminosa adaptada a la función que deban realizar.
- Luminancias reducidas en determinadas direcciones.
- Buen rendimiento luminoso.

#### **1.7.2.2. Propiedades mecánicas y eléctricas.**

- Solidez.
- Construcción de un material adaptado a su función.
- Protección contra la humedad y demás agentes atmosféricos.
- Facilidad de montaje y limpieza.
- Cómodo acceso a la lámpara y equipo eléctrico.
- Calentamiento admisible con su construcción y con su empleo.

### 1.7.2.3. Clasificación de las luminarias.

La clasificación más importante de las lámparas es la que se refiere a la forma en que distribuyen el flujo luminoso, y de acuerdo a este criterio se pueden encontrar los siguientes tipos:

**Difusores:** Utilizan preferentemente sus propiedades de transmisión y difusión. Su misión es la de difundir la luz para disminuir los efectos de deslumbramiento. Están formados por envoltentes opalinos de vidrio o material plástico en cuyo interior se coloca la lámpara y son adecuados para la ejecución de sistemas de iluminación semi-indirecta y difusa, ya que el flujo luminoso se distribuye de un modo casi uniforme en todas direcciones. Disminuyen la luminancia de la lámpara y, por lo tanto atenúan el deslumbramiento. Los difusores empleados en interiores generalmente son esféricos, y no están adecuados para grandes potencias, es decir que son recomendables para lámparas incandescentes de 40 a 200 watts y lámparas fluorescentes tubulares normales.

**Reflectores:** Utilizan principalmente su capacidad de reflexión. Están formados por superficies especulares (aluminio pulido, vidrio plateado, placa de hierro esmaltada, etc.) que refleja en determinadas direcciones la luz emitida por la lámpara. Si su construcción es adecuada, se puede conseguir un alto rendimiento. Dentro de esta clasificación se pueden encontrar los proyectores, que sirven para concentrar la luz en una dirección bien definida, generalmente sobre superficies delimitadas.

**Refractores:** Se basan en las leyes de la refracción. Están constituidos por recipientes de material transparente dotados de una profunda cavidad, y cuyo perfil y orientación han sido predeterminados a fin de modificar notablemente la distribución del flujo luminoso. Tienen la característica de disminuir sensiblemente el deslumbramiento.

**Mixtos:** Algunas luminarias pueden estar compuestas por diferentes partes, combinando materiales de las clasificaciones anteriores. Resultan muy interesantes, pues con ellos se pueden conseguir todos los sistemas de iluminación, como es el caso de los faros de un coche, constituidos por un proyector que concentra la luz y un refractor que es la parte de cristal frontal, dotada de acanaladuras prismáticas que dirigen la luz en los ángulos deseados.

## **CAPÍTULO II**

**CRITERIOS DE ILUMINACIÓN DE TÚNELES**

**RECOMENDACIONES DE LA S.C.T.**

## **2.1. BASES PARA EL CÁLCULO EN TÚNELES**

### **2.1.1. Introducción**

En este capítulo se enmarcan las recomendaciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes para el cálculo de la iluminación en los túneles carreteros, así como las referentes a la selección de luminarias.

En 1988, y en vista de los grandes avances en la tecnología en las diversas áreas de la construcción en nuestro país, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes edita, por primera vez, un Manual de Alumbrado Vial con el fin de que las obras de alumbrado tanto en vialidades urbanas como en carreteras, sean de una máxima eficiencia, calidad y economía.

Las recomendaciones de la S.C.T. se elaboraron con el fin de satisfacer las necesidades de nuestro país en esta especialidad de la iluminación, tomando en cuenta las recomendaciones, principios y técnicas de los Comités Nacionales de los países miembros de la "Comission International de L'Eclairage." (C.I.E.)

## **2.2. DEFINICIONES Y RECOMENDACIONES DE LA S.C.T.**

- Las cubiertas naturales o artificiales sobre una carretera se consideran túneles.
- Velocidades vehiculares de diseño de los túneles: hasta de 110 km/h.
- Distancia entre vehículos: desde 15 m.
- Atención de los conductores dirigida a: pintura del pavimento, rayas de los carriles, vehículos en su propio carril y en los otros carriles.
- Los túneles se denominan: largos, cortos o cruces con paso elevado.

### **2.2.1. Túneles largos:**

Los túneles rectos cuya longitud es mayor de 45m y aquellos cuya salida no se ve desde la entrada se clasifican como túneles largos. En los últimos, la brillantez de la salida se encuentra fuera del campo de visión de los conductores y prácticamente es ineficaz para distinguir los objetos por silueta.

### **2.2.2. Túneles cortos:**

Son aquellos cuya salida es visible desde la entrada en ausencia de tráfico y cuando su altura es de 5.5m o menor y su longitud se limita a 45m. En los túneles cortos es posible distinguir a los objetos por silueta, contra el fondo luminoso del lado de salida.

### **2.2.3. Cruce con paso elevado:**

Es la parte de la carretera inferior, cubierta por otra carretera superior, su longitud puede ser hasta de 30m cuando la altura libre es de 6 a 10 m.

### **2.2.4. Existen fenómenos que están relacionados con el alumbrado vial de túneles, tales como:**

#### **2.2.4.1. Adaptación Visual:**

Es el conjunto de cambios fisiológicos que ocurren cuando el ojo humano recibe estímulos luminosos de diferente intensidad. Como la luminancia del campo visual es diferente de punto a punto, la intensidad del estímulo luminoso es la suma de los estímulos producidos por cada punto. La adaptación a estímulos luminosos de diferente intensidad se logra mediante lo siguiente:

- a) el cambio de diámetro de la pupila
- b) la sensibilidad de la retina a las diferentes luminancias
- c) los cambios fotoquímicos de la retina
- d) el cambio del diámetro de la retina permite la adaptación rápida a luminancias de 4,000 cd/m<sup>2</sup> o menores, cuya relación es de 100:1.
- e) la sensibilidad de la retina cambia con las luminancias y con los colores. Para las luminancias mayores la visión se inicia a través de los conos. La sensibilidad en la fovea central de la retina es muy alta. La mancha amarilla es menos sensible a la luz verde y azul que la porción circundante de la retina.
- f) los cambios fotoquímicos que ocurren en la retina para reproducir las diferentes imágenes, no son instantáneos y dan origen a la persistencia de la imagen en la retina. La duración de los cambios fotoquímicos en la retina depende de las diferencias de intensidad de los estímulos consecutivos.
- g) la adaptación visual de una iluminación menor a una iluminación mayor es prácticamente instantánea y para efectos de alumbrado no representa ningún problema. La adaptación visual al disminuir la luminancia del campo visual depende de las tres variables antes enlistadas. La mayor dificultad para lograr la adaptación es la persistencia de la imagen en la retina; porque a su vez origina incomodidad e inseguridad en el conductor.
- h) la percepción se dificulta cuando el nivel de iluminación decrece muy rápidamente. Una disminución rápida de la iluminación también reduce la comodidad visual. El porcentaje conveniente de disminución en la iluminación es casi constante e independiente del luminaria.
- i) para alumbrado de túneles se consideran aceptables las disminuciones de la iluminación correspondientes a las relaciones de iluminación y tiempos de adaptación entre zonas adyacentes como lo muestra la siguiente tabla:



Porcentajes de Disminución de la Iluminación	Relación de las Iluminaciones	Tiempo de Adaptación
70%	3:1	1 seg.
90%	10:1	2 seg.
96%	25:1	3 seg.
99%	100:1	4 seg.

**Tabla 2.1. Iluminación de Zonas Adyacentes.**

- En los diseños de alumbrado de túneles el tiempo de adaptación corresponden al tiempo de recorrido de la zona y la velocidad permisible dentro del túnel.

#### **2.2.4.2. Fenómeno de Hoyo Negro:**

El ojo humano no puede ver los objetos ubicados dentro de una zona cuya luminancia es mucho menor que la del resto del campo visual. La zona con mayor luminancia asemeja a un "hoyo negro". Nombre asignado a este fenómeno. Durante el día, cuando un conductor se aproxima a un túnel, debido a las altas luminancias exteriores y a la menor luminancia interior, el túnel se asemeja a un "hoyo negro".

#### **2.2.4.3. Fenómeno de Estructura Oscura:**

Las paredes, techo, calzadas y banquetas, de un túnel corto con iluminación menor que las superficies exteriores, conforman una "estructura oscura". Este fenómeno dificulta la percepción de algunos obstáculos cercanos a las paredes o en calzada del túnel corto.

#### 2.2.4.4. Contraste:

La distinción de objetos se realiza por contraste con otros objetos y con el fondo. Cuando la luminancia de un objeto es mayor el contraste es positivo. Cuando los objetos alrededor tienen una luminancia mayor, la distinción se hace por contraste negativo, es decir, por silueta.

Las superficies de rodamiento, las paredes de un túnel y las superficies de otros vehículos se pueden llamar fondo.

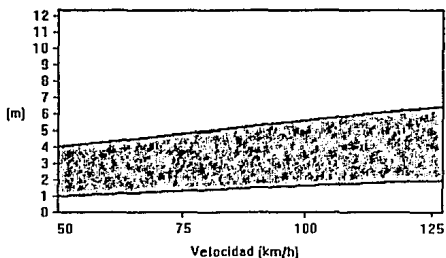
El contraste (C) es la relación porcentual entre la luminancia de un objeto (L) y la luminancia del fondo (L') según:

$$C\% = \frac{L - L'}{L'}$$

Para que un objeto sea distinguido por un 75% de los conductores el contraste debe ser de  $\pm 20\%$ .

#### 2.2.4.5. Efecto de Escalera:

Las superficies más iluminadas y aquellas con mínima iluminación al aparecer alternadamente producen parpadeos en el aparato visual de los conductores, por asemejarse esta alternancia a una escalera, a este fenómeno se le da el nombre de "efecto de escalera". Se ha comprobado que algunas cantidades de parpadeos por segundo producen mayor molestia a los conductores y para evitarlas es necesario tener espaciamiento de los luminarias según indica la siguiente gráfica:



**Fig. 2.1. La zona sombreada indica separaciones inaceptables entre unidades de iluminación por producir Efecto de Escalera molesto.**

## 2.2.5. Objetivos de la iluminación de túneles:

### 2.2.5.1. Generalidades:

Los objetivos principales de la iluminación de túneles son los siguientes:

- Permitir la adaptación del sentido de la visión de los conductores de los vehículos al transitar por el túnel y sus proximidades.
- Mantener la uniformidad de la iluminación tanto en los planos verticales como en los horizontales y eliminar zonas oscuras.

- Lograr una distancia de visibilidad mayor que la distancia de frenado hasta lograr alto total, cuando se transita a la velocidad máxima permitida. A la última distancia se le denomina distancia de paro seguro.

### 2.2.5.2. Iluminación diurna de los túneles largos:

Para diseñar la iluminación durante el día de un túnel largo, éste y sus proximidades se dividen en las siguientes zonas:

D1 = Zona de preparación = 100 m. disminuir luminancia exterior

D2 = Zona de acercamiento o de rejilla = 25 m. disminución del nivel de iluminación exterior de 70,000 luxes a 20.000 ó 15,000 luxes.

D3 = Zona de entrada

D4 = Zona de transición

D5 = Zona central

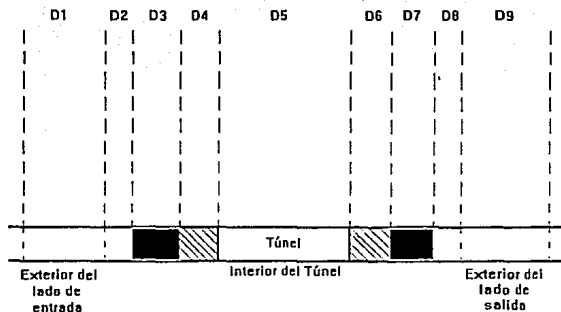
D6 = Zona de transición

D7 = Zona de salida

D8 = Zona de alejamiento

D9 = Zona de preparación

donde: D1=D9    D2=D8    D3=D7    D4=D6



**Fig. 2.2 Zonas de la Carretera para la Iluminación Diurna y Variación de las Iluminaciones.**

El acondicionamiento del lado exterior de entrada del túnel y la iluminación interior del túnel deben conducir al cumplimiento de lo siguiente:

Considerando que el nivel de iluminación promedio diurno es de 70,000 luxes,

- a) Disminuir la iluminación de adaptación del conductor en los laterales de la carretera del lado de entrada sembrando árboles de follaje y plantas de color oscuro, mediante el acotamiento de pavimentos, taludes y paredes frontales del túnel en colores oscuros.
- b) Construir pérgolas, techos translúcidos o rejillas en la zona de acercamiento para disminuir el nivel exterior.

- c) Mantener altas reflectancias en el interior del túnel construyendo paredes, techo y superficies horizontales en colores claros, y limpiándolas periódicamente.
- d) Lograr relaciones de luminancias promedio entre zonas adyacentes como máximo de 10:1 con un tiempo de recorrido de cada zona de 2 segs. como mínimo.

En las zonas de entrada y de transición pueden existir varios escalones de disminución de luminancia para alcanzar la luminancia promedio de la zona central.

Los niveles de iluminación en las primeras zonas de entradas de los túneles largos serán de 1,200 a 2,000 luxes dependiendo de la importancia de la carretera y el volumen horario de tránsito. La iluminación promedio diurna en cada zona será:

D1 = 100 m. disminuir luminancia exterior

D2 = 25 m. disminución del nivel de iluminación exterior a 20,000 luxes

D3 = 50 m. disminución de 20,000 a 2,000 (relación 10:1)

D4 = 50 m. zona de transición, disminuir de 2,000 a 200 luxes. siendo aceptable que en esta zona la variación del nivel de iluminación sea menos brusca de 2,000 a 1,500 ó 1,000 luxes.

D5 = zona central: el nivel de iluminación promedio mínima será de 100 luxes en carretera de montaña y 200 luxes en carreteras planas.

#### **2.2.5.3. Iluminación Diurna de Túneles Cortos:**

Los túneles de 25 a 45 m. de longitud tendrán alumbrado diurno con un nivel de iluminación promedio mínimo de 1,200 luxes cuando en las zonas de aproximación y/o de salida existan sombras.

Dichas sombras pueden ser producidas por los siguientes elementos:

- Arboles de follaje tupido y permanente
- Superficies oscuras y lisas en una distancia de 10 a 150m. en el lado de entrada
- Paredes oscuras
- Arbustos de follaje verde oscuro en el lado de entrada
- Cerros
- Columpios en la carretera

En el caso de no existir sombras en las zonas de aproximación, este tipo de túneles tendrá una iluminación promedio mínima de 2,000 luxes.

#### **2.2.5.4. Iluminación Nocturna de Túneles Largos y Cortos:**

Cuando los túneles largos y cortos forman parte de una carretera iluminada con un promedio de iluminación de 20 a 40 luxes, el nivel de iluminación promedio en el interior del túnel será de 100 a 150 luxes

### **2.3. CRITERIOS DE SELECCIÓN, UBICACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LUMINARIAS**

#### **2.3.1. Lámparas para Iluminación de Túneles:**

Para el alumbrado de túneles, las principales características de las lámparas son las siguientes:

- Gran flujo luminoso
- Larga duración

- Facilidad de montaje en los equipos de alumbrado
- Debido a los altos valores de iluminación para alumbrado diurno en las zonas de entrada de los túneles largos se consideran adecuadas las lámparas de vapor de sodio de alta presión de 250 y 400 W.

### **2.3.2. Descripción de los Equipos de Alumbrado:**

#### **2.3.2.1. Características de las luminarias para la iluminación de túneles:**

- Serán de sobreponer en techo o muro para operar a 220 V
- Deben ser herméticas a prueba de polvo, resistir la acción de los detergentes, la atmósfera húmeda y los humos del túnel.
- Debe permitir fácil limpieza, mantenimiento y reposición de las lámparas, así como de accesorios.
- Se pide por norma que las alimentaciones eléctricas sean de 220 V. para seguridad del personal de mantenimiento.

#### **2.3.3. Factor de Depreciación por Envejecimiento (FDE):**

Es el factor que sirve para determinar el flujo luminoso de una lámpara cuando alcanza el 80% de su vida promedio. Se obtiene dividiendo el flujo luminoso medio (lúmenes medios) entre el flujo luminoso nominal (lúmenes a 100 horas de vida) o de tablas, ambos datos de los fabricantes de lámparas.



#### **2.3.4. Factor de Depreciación por Ambiente (FDA):**

Es el factor que sirve para determinar la disminución del flujo luminoso de una luminaria debido a polvos y humos en el ambiente. Este factor es proporcionado por los fabricantes de luminarias y depende de las condiciones ambientales siendo menor para luminarias abiertas que para cerradas.

#### **2.3.5. Factor de Mantenimiento (CM):**

Es el producto del factor de depreciación por envejecimiento y el factor de depreciación por ambiente.

#### **2.3.6. Coeficiente de Utilización:**

Es el factor que se obtiene de dividir el flujo luminoso incidente sobre una superficie entre el flujo luminoso total emitido por una luminaria. Este dato es proporcionado por los fabricantes de luminarias mediante gráficas.

#### **2.3.7. Ubicación de los Equipos de Alumbrado en los túneles:**

Las unidades de alumbrado se instalarán de preferencia en la parte vertical superior de las paredes, con una altura mayor a la de los vehículos más altos permitidos en el túnel.

Cuando las unidades se instalan en las paredes, el mantenimiento se facilita y la distribución de flujo luminoso es excelente.

Cuando los túneles son muy anchos o muy altos, las unidades de alumbrado pueden instalarse en el techo. En este caso se dificulta el mantenimiento, pero se obtiene un direccionamiento excelente para los conductores, especialmente cuando los carriles se separa o se juntan.

### **2.3.8. Alumbrado Vial de Emergencia para Túneles:**

En los túneles iluminados, una falla en el sistema de alumbrado es peligrosa y la utilización de alguna(s) de las siguientes soluciones pueden evitar accidentes:

-Conectar lámparas a grupos de baterías y cargadores y alimentarlas en cuanto ocurre una interrupción de las alimentaciones normales.

-La utilización de las baterías se limita al tiempo necesario para permitir a los conductores salir del túnel e informar a otros conductores acerca de la interrupción en el suministro de la energía eléctrica.

-Al encender las lámparas de emergencia deben iluminarse también letreros de "Encender luces" en ambas entradas del túnel.

-Instalar unidades equipadas con lámparas de 300 W, 24 volts, a cada 30m en los tramos rectos y a cada 10m en las curvas.

-Instalación de plantas de emergencia, con equipos automáticos de transferencia y de preferencia una planta de operación continua para obtener por lo menos el nivel nocturno de iluminación en tanto entra en operación la planta principal de emergencia.

### **2.3.9. Mantenimiento de las Instalaciones de Alumbrado en Túneles:**

Una buena iluminación de un túnel será posible, cuando las paredes se limpien frecuentemente.

-La limpieza de las paredes es necesaria para mantener su factor de reflexión cercano al inicial. La frecuencia de limpieza crece paralelamente con el volumen de tráfico, en un túnel con alta intensidad de tráfico (varios miles de vehículos al día) debe seguirse el siguiente programa:

-Limpieza de la superficie exterior de las luminarias y del sistema óptico, una vez al mes.

-Limpieza del túnel, dos veces al mes.

-El personal de mantenimiento debe aprovechar las etapas de limpieza para hacer reparaciones eléctricas y cambios menores.

-Reemplazo de lámparas.

Si el túnel puede cerrarse al tráfico por algunas horas cada semana, el recambio de lámparas dañadas puede efectuarse una vez por semana. También deben cambiarse las lámparas cuyo flujo luminoso sea insuficiente.

Si el túnel puede cerrarse únicamente unos días cada año, se adoptará un reemplazo sistemático de lámparas durante esos días.

## **CAPÍTULO III**

**CÁLCULOS PARA LA ILUMINACIÓN DE UN**

**TÚNEL VEHICULAR:**

**TÚNELES GEMELOS AGUA DE OBISPO.**

### 3.1. INTRODUCCIÓN.

Una vez expuestos en los capítulos anteriores las bases teóricas de la luminotecnia, los criterios generales de iluminación de túneles y la normatividad requerida por las autoridades tanto nacionales como internacionales en este capítulo estudiaremos un caso específico de iluminación de un túnel vehicular.

El ejemplo a estudiar es la iluminación en los túneles gemelos de Agua de Obispo en la autopista México-Acapulco, a través del cual ilustraremos los pasos a seguir para la adecuada iluminación de un túnel en carreteras de alta especificación.

#### 3.1.1. Alcances del capítulo.

Se inicia el capítulo localizando geográficamente al túnel en cuestión y haciendo una breve descripción del mismo en cuanto a localización, dimensiones física, parámetros básicos y de iluminación, para los cálculos que se realizarán.

Posteriormente se establecen los criterios básicos a seguir para la iluminación de este túnel, en particular, sustentados en la teoría expuesta en el capítulo anterior.

El diseño y el cálculo de la iluminación de un túnel de este tipo lo podemos dividir en cuatro partes principales: la iluminación propiamente para cumplir con las especificaciones requeridas por las autoridades y las normas; la instalación eléctrica de esta iluminación; los sistemas de respaldo y emergencia y por último, el suministro de energía.

Este capítulo se enfoca principalmente a los cálculos necesarios para la iluminación y la instalación eléctrica. En lo referente a la iluminación del túnel, se determinarán tanto el tipo como el número de luminarias y su posición en el túnel de acuerdo a los requerimientos de las autoridades y criterios internacionales para la iluminación de un túnel de estas características. En lo que respecta a la instalación eléctrica se propondrá el arreglo y separación en circuitos, la división en tableros, el cálculo de la sección de los conductores, la conexión general y el diagrama unifilar.

Acerca de los sistemas de respaldo y emergencia, se hablará de su importancia en este tipo de túneles, del esquema propuesto, y de las características generales de los equipos requeridos. Para completar el sistema se mencionará los elementos necesarios para la conexión del sistema a la línea de transmisión existente como son: la sub-estación, el transformador y casa de máquinas.

Por último, y en base a los cálculos anteriores, se incluye una lista de materiales con cantidades y especificaciones; y un presupuesto general con precios unitarios, que incluyen los materiales y la instalación para la implementación del túnel, a manera ilustrativa.

### 3.1.2. Autopista México - Acapulco.

Durante el transcurso del año 1992, llegó a su fase final la construcción de la Autopista México-Acapulco; esta autopista es de las más modernas del país ya que para su diseño, trazo y construcción se tomaron en cuenta los estándares internacionales. Esta carretera permite acortar considerablemente tanto la distancia como el tiempo entre la Ciudad de México y el Puerto de Acapulco. Para lograr esto, y tomando en cuenta la orografía del terreno, fue necesario construir a lo largo de la misma varios túneles, puentes, terraplenes, así como dinamitar importantes secciones de montañas.

El tramo Chilpancingo - Acapulco debido a la complicada orografía del terreno tiene dos túneles y varios puentes, los túneles de Tierra Colorada, localizado en el kilómetro 39 entre Tierra Colorada y Acapulco, de 386 mts de largo y el de Agua de Obispo, que será el que estudiaremos a continuación.

### 3.1.3. Descripción y Localización.

En la carretera México-Acapulco (Fig 3-1), en el tramo que está localizado entre Chilpancingo y Tierra Colorada, en el Estado de Guerrero, se construyeron embebidos en una montaña, los túneles gemelos denominados *Agua de Obispo*, los cuales cumplen con las estrictas normas de trazado de autopistas, en lo referente a radios de curvatura y a pendientes.



Fig. 3-1 Mapa de Localización.

Los Túneles de *Agua de Obispo* son dos túneles idénticos de dos carriles cada uno, con flujo vehicular en un solo sentido cada túnel; una separación entre paredes interiores de 10 metros, y una longitud de 377 metros, con un pequeño radio de curvatura, mismo que impide ver la salida del túnel al entrar como se puede apreciar en el diagrama de planta del túnel (Fig. 3-2).

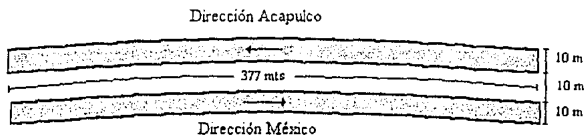


Fig. 3-2 Planta

Son túneles cuasi-circulares como se muestra en el corte transversal de la Fig. 3-3, con una altura máxima de 8.65 metros y un arroyo de 10 metros, lo cual permite dos carriles completos más un acotamiento de protección.

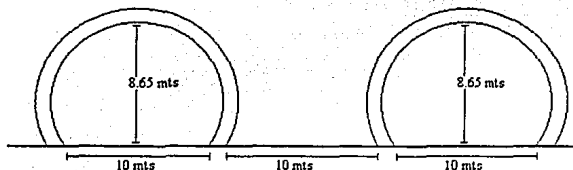


Fig. 3-3 Corte transversal.

Existe una línea de transmisión de 13.2 KV. a 50 metros. del túnel, desde donde se suministrará la energía eléctrica y cerca de donde se construirá la casa de máquinas.

De acuerdo a los capítulos anteriores procederemos a definir los criterios y normas más importantes para la iluminación de este túnel en particular.

### 3.2. CRITERIOS PARA LA ILUMINACIÓN DE UN TÚNEL DE AUTOPISTA.

#### 3.2.1. Niveles de iluminación.

Por tratarse de una autopista, en la cual cada túnel solo tiene tráfico en un solo sentido las Zonas de iluminación a considerar son las siguientes.

- D<sub>1</sub> Zona de preparación
- D<sub>2</sub> Zona de acercamiento
- D<sub>3</sub> Zona de entrada
- D<sub>4</sub> Zona de transición
- D<sub>5</sub> Zona de cruceo



De acuerdo a la norma mencionada en el capítulo anterior, para una relación de 10:1, que es el caso de la zona D<sub>3</sub> (Zona de entrada), en el nivel de iluminación se requiere como mínimo una zona de 2 segundos, lo cual a 110 Km/Hr que es el límite de velocidad a la entrada del túnel es de 61.1 mts.

En base a la teoría expuesta en el capítulo anterior, se determinaron los siguientes niveles de iluminación diurna para las diferentes secciones del túnel.

Sección	Longitud (m)	Iluminación mínima (luxes)
Iluminación diurna promedio (Luz solar)		70,000 - 100,000
D <sub>1</sub> Zona de preparación	-125 a -25	40,000
D <sub>2</sub> Zona de acercamiento	-25 a 0	15,000
D <sub>3</sub> Zona de entrada	0 a 61	1,500
D <sub>4</sub> Zona de transición	62 a 123	500
D <sub>5</sub> Zona de crucero	123 a 377	200

Tabla 3-1. Niveles de iluminación Diurna.

Para el caso de la iluminación nocturna sólo se necesita una zona dentro del túnel, en la cual las normas obligan a mantener una iluminación mínima de 200 luxes. Sin embargo para la zona de preparación se requiere adaptar al ojo humano para el nivel de iluminación interior, como se describe en el capítulo anterior por lo que necesitamos implementar luminarias exteriores, las cuales deben cumplir con un nivel de adaptación mínimo de 30 luxes.

Sección	Longitud (m)	Iluminación mínima (luxes)
Iluminación nocturna promedio		Menor a 30
D <sub>2</sub> Zona de acercamiento	-65 a 0	30
D <sub>5</sub> Zona de crucero	0 a 377	200

Tabla 3-2. Niveles de iluminación Nocturna.

Por lo anterior podemos deducir que los niveles de iluminación deben ser distintos en el día que en la noche. Paradójicamente, en la noche tendrá que haber menor iluminación, ya que el diferencial entre los niveles de iluminación entre el exterior y el interior del túnel se reducen drásticamente, y la adaptación es de menos a más iluminación.

### 3.2.2. Tipos de alumbrado.

Al contar ahora con dos distintos niveles de iluminación, existirán dos alumbrados dentro del túnel que serán uno diurno y uno nocturno. Pero, por conveniencia, al tener que iluminar más durante el día, se aprovechará el alumbrado nocturno y sólo se adicionará otro alumbrado para cubrir el requerimiento adicional durante las horas diurnas. Debido a esto se les denominará alumbrado permanente, a aquél que se encuentre en funcionamiento 24 horas, y alumbrado diurno, a aquél, que funcione durante las horas en las que haya luz solar.

Para facilitar y automatizar la conexión del alumbrado diurno, se instalará una celda fotoeléctrica conectada inversamente, (ya que el alumbrado se tiene que prender en el día y apagar en la noche) que active y desactive dicho alumbrado.

### 3.2.3. Selección de luminarias

Entre las posibles luminarias a elegir se encuentran las de vapor de sodio tanto a alta como a baja presión y las de aditivos metálicos como se menciona en el capítulo anterior. Entre los factores a considerar se encuentran los siguientes:

**Factor de Mantenimiento.** Las luminarias de vapor de sodio de baja presión están prácticamente descontinuadas comercialmente debido al alto costo requerido para su mantenimiento, ya que estas son construidas a base de filamentos muy largos los cuales, se intemperizan fácilmente (Son difíciles de sellar y se llenan de polvo) lo cual disminuye su vida útil, y además merma su luminosidad perdiendo eficacia.

**Eficiencia.** La luminarias que proporcionan más lúmenes por potencia consumida, son las de vapor de sodio a alta presión, lo cual fue uno de los factores determinantes en la selección de las luminarias.

**Disponibilidad.** Las luminarias de vapor de sodio de alta presión son muy usadas en el país y existen proveedores nacionales que producen este tipo de luminarias.

Tomando en cuenta los factores anteriores, sólo existe otro tipo de luminaria que se acerca a la de vapor de sodio de alta presión que es la de aditivos metálicos, pero tiene el inconveniente que emite una luz muy blanca, la cual tiene un impacto sobre la vista del conductor que provoca un deslumbramiento sobre éste, y ésta es la razón por la cual no es recomendable su utilización en la iluminación de túneles.

A diferencia de las de aditivos metálicos, las luminarias de vapor de sodio emiten una luz de color amarillo rosa que no es molesta al ojo humano.

Las luminarias que se eligieron, por los factores antes mencionados y por los criterios de los capítulos anteriores, son las de vapor de sodio de alta presión a 250 Watts de potencia nominal.

#### **3.2.3.1. Particularidades de las luminarias elegidas.**

Entre las particularidades de estas luminarias, se tiene que en caso de cualquier interrupción en la alimentación (solo con la ruptura del arco eléctrico, por breve que esta sea), éstas tardan en restablecerse cinco minutos, lo que resultaría catastrófico, ya que dejaría el túnel a ciegas, lo cual podría ocasionar accidentes de gravísimas consecuencias.

La eficiencia es de 110 lm/W, ya que las luminarias elegidas proporcionan 27,500 lúmenes en las lámparas de 250 Watts. La vida promedio es de 24,000 Horas. El factor de envejecimiento F.D. es de 0.88. En cuanto al factor de utilización F.U., este varía y se muestra en la Fig 3-4.

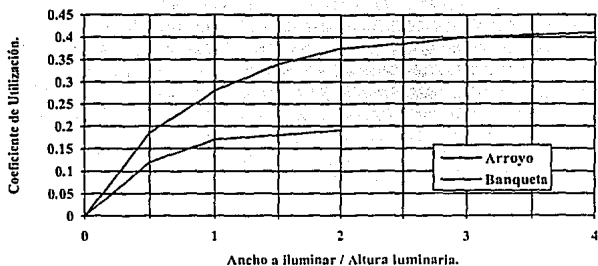


Fig 3-4. Coeficiente de Utilización.

En este tipo de luminarias se recomienda un color claro en las superficies reflejantes, por lo que, se decidió pintar la cavidad del túnel en amarillo, porque este color aumenta la reflexión, logrando mayor luminosidad (luxes) con menor número de luminarias, lo cual genera un ahorro en la inversión inicial así como un consumo menor de energía.

#### 3.2.4. Criterios de respaldo

Entre los sistemas de emergencia y respaldo mencionados en el capítulo 2 y por tratarse de un túnel en una carretera tan importante y de tráfico intenso se propone un sistema de respaldo de energía ininterrumpido, el cual constará de plantas generadoras de emergencia para suplir el flujo eléctrico de la compañía suministradora, cuando se interrumpa el suministro, una unidad de continuidad (UPS - On Line, Unidad ininterrumpida de potencia) y un sistema automático de transferencia.

### 3.3. CALCULO DE LA ILUMINACIÓN DE LOS TÚNELES GEMELOS: AGUA DE OBISPO.

#### 3.3.1. Iluminación.

A continuación se calcularán los parámetros necesarios para la iluminación del túnel que son principalmente el número de luminarias por cada sección y su distribución a lo largo del túnel.

##### 3.3.1.1. Cálculo de niveles de iluminación.

Los niveles de iluminación (cantidad de luxes) en general para un área determinada dependen en forma proporcional al flujo luminoso, cantidad y características de las luminarias utilizadas en dicha área, definiéndose en la siguiente fórmula:

$$E = \frac{\Phi \cdot Nr \cdot CU \cdot CM}{A \cdot L}$$

Donde: E = Nivel de iluminación promedio (luxes)

Nr = Número de luminarias.

$\Phi$  = Flujo luminoso de las luminarias (lúmenes). Dato proporcionado por el fabricante.

CU = Coeficiente de utilización de la luminaria. El cual se obtiene de tablas proporcionadas por el fabricante y varía de acuerdo a cada modelo, la altura de montaje, la distancia al techo (cavidad) y los coeficientes de reflexión del piso y del techo.

CM = Coeficiente de Mantenimiento. Dato proporcionado por el fabricante.

A = Ancho del piso del túnel (Arroyo más acotamiento).

L = Distancia de la sección.

Para el caso de caso de las luminarias elegidas, es decir, las de vapor de sodio de alta presión de 250 Watts, y para una altura de colocación de 6 metros (altura requerida por ser el gáligo en este caso de 5.50 metros) el fabricante proporciona los siguientes datos:

$$\Phi = 27,500 \text{ lúmenes.}$$

$$CM = 0.70$$

$$CU = 0.35$$

De los diagramas de las medidas del túnel tenemos:

$$A = 10 \text{ metros (Arroyo = Dos carriles más acotamiento)}$$

Los luxes (E) y las distancias (L) varían conforme a las secciones y al tipo de alumbrado como se muestra en el siguiente cuadro:

Zona	Distancia (L)	Luxes (E)
D3	61 mts	1.500
D4	61 mts	500
D5	255 mts	200

A continuación se hará el cálculo completo para la Zona D3 (Zona de entrada). De la fórmula anterior despejamos el número de luminarias y sustituimos los datos obteniendo:

$$Nr = \frac{A \cdot L \cdot E}{\Phi \cdot CU \cdot CM} = \frac{10 (61) (1,500)}{27,500 (0.35)(0.7)} = 135.8 \text{ Luminarias}$$

Este resultado nos da un mínimo de 136 luminarias en la zona D3, las cuales deben ser colocadas uniformemente a lo largo de 61 metros, en ambas paredes, lo que nos conduce a un resultado de 68 luminarias por pared. Por lo tanto habrá una luminaria

cada 0.90 metros.

De manera similar se hace el cálculo para las zonas restantes, concentrando los resultados en la siguiente tabla.

Zonas	E (Luxes)	$\Phi$ (Lúmenes)	CU	CM	L (mts)	A (mts)	Número de Luminarias	Separación (mts)
D3	1500	27,500	0.35	0.7	61	10	135.81	0.90
D4	500	27,500	0.35	0.7	61	10	45.27	2.70
D5	200	27,500	0.35	0.7	255	10	75.70	6.74

Tabla 3-3 Cálculo de número de luminarias.

La distancia máxima de separación entre luminarias para la iluminación de túneles de alta velocidad (110 Km/Hr) es de 5 metros, por lo que para la Zona D5 en que el cálculo nos da una separación de 6.74 mts se escoge una de 5 mts, la cual nos da un nivel de iluminación de 269 luxes, que cumple en exceso la norma.

Para el caso de la Zona D4 donde el cálculo anterior nos recomienda una separación de 2.70 mts, se elige una separación de 2.50 mts, puesto que las luminarias del alumbrado permanente están a 5 mts y así solo se necesita una luminaria intermedia para el alumbrado diurno en esta Zona.

### 3.3.1.2. Posición de Luminarias

De acuerdo a los cálculos y al razonamiento anterior las distancias entre luminarias en las distintas secciones del túnel quedarían como en la siguiente tabla:

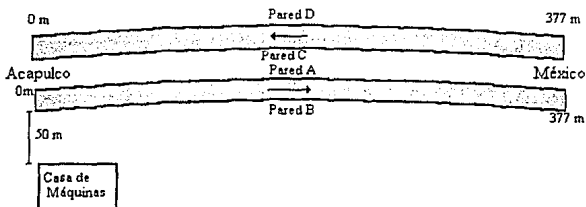
Distancia (Mts)	Permanente (Mts)	Diurno (Mts)
0 - 60	3.60	0.90
61 - 120	5.00	2.50
121 - $\infty$	5.00	5.00

Tabla 3-4 Distancia entre luminarias.

Para fines del posicionamiento de las luminarias y como referencia de aquí en adelante se denominaron las paredes de los túneles de acuerdo a la siguiente tabla:

Pared A	Pared Interna Dirección México
Pared B	Pared Externa Dirección México
Pared C	Pared Interna Dirección Acapulco
Pared D	Pared Externa Dirección Acapulco

que corresponde al siguiente esquema:



**Fig. 3-5 Denominación de las paredes y  
Posición de la Casa de Máquinas.**

Como se muestra en el diagrama anterior se tomará como referencia para las siguientes tablas la entrada principal al túnel por el lado de Acapulco, por estar de este lado la casa de máquinas.

A partir de los cálculos anteriores, se resume a continuación la posición en metros de cada una de las luminarias de ambos túneles.

Las primeras luminarias se colocarán a 50 cm. de las entradas de los túneles, para evitar que sean afectadas por las inclemencias del tiempo (p.ej. lluvias).



Las luminarias exteriores que se requieren se colocarán a 5, 35 y 65 metros de las entradas de los túneles. Así mismo estas luminarias exteriores formarán parte por su localización de los circuitos de las paredes A y C respectivamente.

En los siguientes diagramas (Fig 3-6) se muestra esquemáticamente la colocación de las luminarias a lo largo del túnel, las luminarias en color oscuro representan las luminarias del alumbrado permanente.

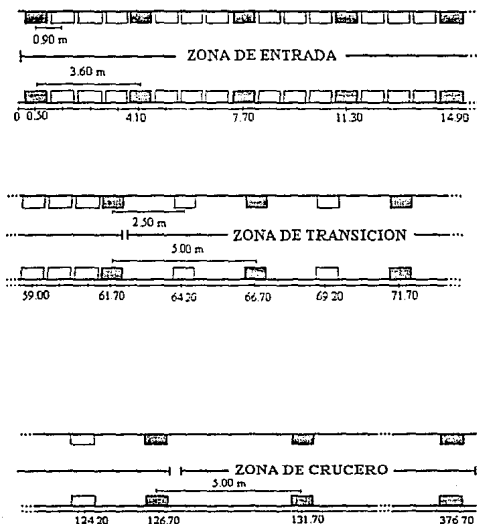


Fig. 3-6 Posición de Luminarias

## POSICIÓN DE LAS LUMINARIAS EN LAS PAREDES A Y B.

### ALUMBRADO PERMANENTE

Nr	Distancia	Nr	Distancia
1	0.50	42	181.70
2	4.10	43	186.70
3	7.70	44	191.70
4	11.30	45	196.70
5	14.90	46	201.70
6	18.50	47	206.70
7	22.10	48	211.70
8	25.70	49	216.70
9	29.30	50	221.70
10	32.90	51	226.70
11	36.50	52	231.70
12	40.10	53	236.70
13	43.70	54	241.70
14	47.30	55	246.70
15	50.90	56	251.70
16	54.50	57	256.70
17	58.10	58	261.70
18	61.70	59	266.70
19	66.70	60	271.70
20	71.70	61	276.70
21	76.70	62	281.70
22	81.70	63	286.70
23	86.70	64	291.70
24	91.70	65	296.70
25	96.70	66	301.70
26	101.70	67	306.70
27	106.70	68	311.70
28	111.70	69	316.70
29	116.70	70	321.70
30	121.70	71	326.70
31	126.70	72	331.70
32	131.70	73	336.70
33	136.70	74	341.70
34	141.70	75	346.70
35	146.70	76	351.70
36	151.70	77	356.70
37	156.70	78	361.70
38	161.70	79	366.70
39	166.70	80	371.70
40	171.70	81	376.70
41	176.70		

### ALUMBRADO DIURNO

Nr	Distancia	Nr	Distancia
1	1.40	33	39.20
2	2.30	34	41.00
3	3.20	35	41.90
4	5.00	36	42.80
5	5.90	37	44.60
6	6.80	38	45.50
7	8.60	39	46.40
8	9.50	40	48.20
9	10.40	41	49.10
10	12.20	42	50.00
11	13.10	43	51.80
12	14.00	44	52.70
13	15.80	45	53.60
14	16.70	46	55.40
15	17.60	47	56.30
16	19.40	48	57.20
17	20.30	49	59.00
18	21.20	50	59.90
19	23.00	51	60.80
20	23.90	52	64.20
21	24.80	53	69.20
22	26.60	54	74.20
23	27.50	55	79.20
24	28.40	56	84.20
25	30.20	57	89.20
26	31.10	58	94.20
27	32.00	59	99.20
28	33.80	60	104.20
29	34.70	61	109.20
30	35.60	62	114.20
31	37.40	63	119.20
32	38.30	64	124.20

Tabla 3-5 Posición de Luminarias Paredes A y B.

## POSICIÓN DE LAS LUMINARIAS EN LAS PAREDES C Y D

### ALUMBRADO PERMANENTE

Nr	Distancia	Nr	Distancia
1	376.50	42	195.30
2	372.90	43	190.30
3	369.30	44	185.30
4	365.70	45	180.30
5	362.10	46	175.30
6	358.50	47	170.30
7	354.90	48	165.30
8	351.30	49	160.30
9	347.70	50	155.30
10	344.10	51	150.30
11	340.50	52	145.30
12	336.90	53	140.30
13	333.30	54	135.30
14	329.70	55	130.30
15	326.10	56	125.30
16	322.50	57	120.30
17	318.90	58	115.30
18	315.30	59	110.30
19	310.30	60	105.30
20	305.30	61	100.30
21	300.30	62	95.30
22	295.30	63	90.30
23	290.30	64	85.30
24	285.30	65	80.30
25	280.30	66	75.30
26	275.30	67	70.30
27	270.30	68	65.30
28	265.30	69	60.30
29	260.30	70	55.30
30	255.30	71	50.30
31	250.30	72	45.30
32	245.30	73	40.30
33	240.30	74	35.30
34	235.30	75	30.30
35	230.30	76	25.30
36	225.30	77	20.30
37	220.30	78	15.30
38	215.30	79	10.30
39	210.30	80	5.30
40	205.30	81	0.30
41	200.30		

### ALUMBRADO DIURNO

Nr	Distancia	Nr	Distancia
1	375.60	33	337.80
2	374.70	34	336.00
3	373.80	35	335.10
4	372.00	36	334.20
5	371.10	37	332.40
6	370.20	38	331.50
7	368.40	39	330.60
8	367.50	40	328.80
9	366.60	41	327.90
10	364.80	42	327.00
11	363.90	43	325.20
12	363.00	44	324.30
13	361.20	45	323.40
14	360.30	46	321.60
15	359.40	47	320.70
16	357.60	48	319.80
17	356.70	49	318.00
18	355.80	50	317.10
19	354.00	51	316.20
20	353.10	52	312.80
21	352.20	53	307.80
22	350.40	54	302.80
23	349.50	55	297.80
24	348.60	56	292.80
25	346.80	57	287.80
26	345.90	58	282.80
27	345.00	59	277.80
28	343.20	60	272.80
29	342.30	61	267.80
30	341.40	62	262.80
31	339.60	63	257.80
32	338.70	64	252.80

Tabla 3-6 Posición de luminarias en las paredes C y D.

### 3.3.1.3. Número total de luminarias.

El número total de luminarias por pared quedará de la siguiente manera:

Total Luminarias Pared A: 87 luminarias alumbrado permanente, (incluye 6 exteriores)  
+ 64 luminarias de alumbrado diurno = 151 luminarias.

Total Luminarias Pared B: 81 luminarias de alumbrado permanente + 64 luminarias de  
alumbrado diurno = 145 luminarias

Total Luminarias Pared C: 87 luminarias alumbrado permanente (incluye 6 exteriores)  
+ 64 luminarias de alumbrado diurno = 151 luminarias.

Total Luminarias Pared D: 81 luminarias de alumbrado permanente + 64 luminarias de  
alumbrado diurno = 145 luminarias.

### 3.3.2. Instalación Eléctrica.

#### 3.3.2.1. Separación en circuitos

Se decidió distribuir los circuitos por tipo de alumbrado (Diurno y Permanente) y por pared de túnel (A,B,C,D), por ser lo más práctico y ordenado, y que en caso de falla de un circuito el túnel no se quede totalmente a oscuras por tener las luces de la pared de enfrente en un circuito distinto.

El criterio convencional para la división de las luminarias en circuitos se basa en poder utilizar protecciones termo-magnéticas de 30 Amp, porque éstas utilizan un marco de hasta 50 amperes, ya que de no ser así habría que utilizar los marcos de más de 50 Amperes que resultan excesivamente caros y no se justifica su utilización.

Por lo anterior se han dividido los circuitos de la siguiente manera:

ALUMBRADO  
PERMANENTE

Circuitos de la pared A

Circuito	Luminarias	# de Lum.
A1	3 Externos y del 1-14	17
A2	15-31	17
A3	32-48	17
A4	49-65	17
A5	66-81 y 3 Externos	19

Circuitos de la pared C

Circuito	Luminarias	# de Lum.
C1	3 Externos y 68-81	17
C2	51-67	17
C3	34-50	17
C4	33-17	17
C5	16-1 y 3 Externos	19

Tabla 3-7 División en circuitos, paredes A y C.

Como se puede observar el número máximo de luminarias por circuitos es de 19, con lo que tenemos una carga máxima usando luminarias de 250 Watts y un factor de 20% (consumo de la balastro), tenemos 5.700 Watts, lo que nos da para un factor de potencia de 0.9 una corriente de:

$$I_{\text{máxima}} = \frac{W}{f.p. (V) \sqrt{3}} = \frac{5,700 \text{ W}}{0.9 (220 \text{ V}) 1.73} = 16.64 \text{ Amp.}$$

que con un 30% de tolerancia es 21.73 Amp que permitan utilizar sin problema protecciones de 30 Amperes.

De forma similar y tomando en cuenta que el número máximo de luminarias en cualquier caso no excede 19, tenemos los siguientes circuitos para las demás paredes:

#### ALUMBRADO PERMANENTE.

##### Circuitos de la Pared B

Circuito	Luminarias	# de Lum.
B1	1-16	16
B2	17-32	16
B3	33-48	16
B4	49-64	16
B5	65-81	17

##### Circuitos de la pared D

Circuito	Luminarias	# de Lum.
D1	66-81	16
D2	50-65	16
D3	34-49	16
D4	18-33	16
D5	1-17	17

TABLA 3-8 División en circuitos Paredes B y D.

#### ALUMBRADO DIURNO

##### Pared A

Circuito	Luminarias	# de Lum.
A6	1-16	16
A7	17-32	16
A8	33-48	16
A9	49-64	16

##### Pared C

Circuito	Luminarias	# de Lum.
C6	49-64	16
C7	33-48	16
C8	17-32	16
C9	1-16	16

##### Pared B

Circuito	Luminarias	# de Lum.
B6	1-16	16
B7	17-32	16
B8	33-48	16
B9	49-64	16

##### Pared D

Circuito	Luminarias	# de Lum.
D6	49-64	16
D7	33-48	16
D8	17-32	16
D9	1-16	16

Tabla 3-9 División en circuitos, alumbrado diurno.

### 3.3.2.2. Sección del Conductor

Para el cálculo de la sección de cada uno de los conductores se utilizan las fórmulas que se muestran a continuación.

Para determinar la carga total:

$$W_{Tot} = (Nr) (1.2) (W_{Nom})$$

Donde:  $W_{Tot}$  = Carga total  
 $Nr$  = Número de luminarias.  
 $W_{Nom}$  = Potencia nominal de la luminaria.  
1.2 = 20% (balastra).

Para calcular la corriente en un circuito trifásico:

$$I = \frac{W_{Tot}}{f.p. (V) \sqrt{3}}$$

Donde:  $I$  = Corriente  
 $W_{Tot}$  = Carga total  
 $f.p.$  = Factor de Potencia ( $\cos\phi$ )  
 $V$  = Tensión

Para el cálculo de la sección de un conductor:

$$S = \frac{\rho \sqrt{3}}{(V_{ef}) (\Delta V)} \sum Id$$

Donde:  $d$  = Distancia del conductor  
 $I$  = Corriente  
 $V_{ef}$  = Tensión efectiva  
 $\rho$  = Resistividad del conductor  
 $\Delta V$  = Caída máxima de tensión

Para el caso específico de este túnel el conductor es de cobre por lo tanto  $\rho = 1/56$  y además la caída de tensión máxima permitida es del 3% por lo que  $\Delta V = 0.03$  y la tensión es de 220V, entonces:

$$S = \frac{\sqrt{3}}{56 (220) (0.03)} \Sigma I \cdot d$$

$$S = 0.004686 \Sigma I \cdot d$$

Los datos generales para determinar la sección del conductor son los que a continuación se mencionan:

La tensión es de 220 Volts.

El Factor de Potencia = 0.9 de acuerdo a lo establecido por SEMIP.<sup>1</sup>

La potencia nominal de las luminarias seleccionadas es de 250 Wats.

Las distancias de la casa de máquinas al inicio de cada una las paredes del túnel, considerando que la casa de máquinas esta a 50 metros de la entrada (pared B) y como se muestra en el diagrama de planta (Fig 3-5) son las siguientes:

Pared	Distancias (Metros)	Distancia Total (m)
A	50 + 10	60
B	50	50
C	50 + 10 + 10	70
D	50 + 10 + 10 + 10	80

<sup>1</sup>Diario oficial Octubre 1992.



Con estos datos y para poder calcular la sección de los conductores calculamos primero la corriente por cada luminaria.

$$W_{Tot} = (Nr) (1.2) (W_{Nom}) = (1) (1.2) (250 \text{ W}) = 300 \text{ W}$$

$$I = \frac{W_{Tot}}{f.p. (V) \sqrt{3}} = \frac{300 \text{ W}}{(0.9) (220 \text{ V}) (1.73)} = 0.8748 \text{ Amperes.}$$

Para el circuito A1, que corresponde a la Pared A del alumbrado permanente, calculamos la sumatoria del producto de la corriente por la distancia del conductor de la siguiente manera:

Foco #	Distancia entrada	I	d	I · d
Ext 3	65	0.8748	125	109.35
Ext 2	35	0.8748	95	83.10
Ext 1	5	0.8748	65	56.86
1	0.5	0.8748	60.5	52.92
2	4.1	0.8748	64.1	56.07
3	7.7	0.8748	67.7	59.22
4	11.3	0.8748	71.3	62.37
5	14.9	0.8748	74.9	65.52
6	18.5	0.8748	78.5	68.67
7	22.1	0.8748	82.1	71.82
8	25.7	0.8748	85.7	74.97
9	29.3	0.8748	89.3	78.12
10	32.9	0.8748	92.9	81.27
11	36.5	0.8748	96.5	84.42
12	40.1	0.8748	100.1	87.56
13	43.7	0.8748	103.7	90.71
14	47.3	0.8748	107.3	93.86

$\Sigma$	$I d =$	1,276.82
----------	---------	----------

Tabla 3-10 Cálculo de Sumatoria I · d

Por lo que la sección del conductor es:

$$S = 0.004686 \sum I_d = (0.004686) \cdot (1,276.82)$$

$$S = 5.9832 \text{ mm}^2$$

De manera similar se hacen los cálculos para cada uno de los circuitos restantes; los resultados se muestran en las siguientes tablas y los cálculos detallados se encuentran en el Anexo A.

Circuito	$\Sigma I \cdot d$	Sección
A1	1276.82	5.98
A2	2189.01	10.26
A3	3445.75	16.15
A4	4709.84	22.07
A5	6826.24	31.99
A6	981.44	4.60
A7	1249.91	5.86
A8	1518.39	7.12
A9	2068.29	9.69

Circuito	$\Sigma I \cdot d$	Sección
B1	1084.75	5.08
B2	2019.56	9.46
B3	3138.08	14.71
B4	4389.05	20.57
B5	5750.85	26.95
B6	841.47	3.94
B7	1109.95	5.20
B8	1378.42	6.46
B9	1928.32	9.04

Circuito	$\Sigma I \cdot d$	Sección
C1	1784.42	8.36
C2	2681.35	12.56
C3	3945.44	18.49
C4	5208.30	24.41
C5	7136.62	33.44
C6	5028.09	23.56
C7	5577.99	26.14
C8	5846.46	27.40
C9	6114.94	28.65

Circuito	$\Sigma l \cdot d$	Sección
D1	1648,82	7,73
D2	2562,73	12,01
D3	3888,31	18,22
D4	5008,06	23,47
D5	6360,58	29,81
D6	5168,06	24,22
D7	5717,96	26,79
D8	5986,43	28,05
D9	6254,91	29,31

**Tabla 3-11 Sección del conductor de todos los circuitos.**

Lo anterior es usando el método teórico lo cual nos da un resultado exacto, en la práctica se utiliza el método de punto medio. En lugar de la sumatoria de todos los puntos, el resultado se obtiene multiplicando la corriente total del circuito por la distancia media de los luminarias como se ilustra a continuación:

$$S = \frac{\rho \sqrt{3}}{(V_{ef}) (\Delta V)} I_{total} d_{media}$$

Podría mencionarse que este método es casi exacto para el caso de las luminarias interiores en las que su distribución es prácticamente uniforme.

Como ejemplo de este método calculamos a continuación la sección del conductor para el circuito A4, la primera luminaria se encuentra a 276.70 (216.7 de la entrada más 60 a la casa de máquinas),

la última se encuentra a 356.70, por lo que,

la distancia media es de  $(276.70 + 356.70) / 2 = 316.7$  mts

$$\text{Carga Total} = (17 \text{ luminarias}) (1.2) (250 \text{ W}) = 5,100 \text{ Wats}$$

$$I = \frac{5,100 \text{ W}}{0.90 (220 \text{ V}) (1.73)} = 14.88 \text{ Amp}$$

$$S = 0.004686 I_{\text{total}} d_{\text{media}} = (0.004686) \cdot (14.88) (316.70) = 22.08 \text{ mm}^2$$

Comparándolo con el cálculo exacto de la tabla anterior de 22.07 mm<sup>2</sup> el resultado es bastante aproximado, en los casos en los que la distribución de luminarias es irregular habrán mayores variaciones entre este método y el cálculo exacto, pero para efectos prácticos siempre se realizan con el método de punto medio.

Como se puede observar, la sección del conductor mínima necesaria para el circuito antes mencionado es de 22.07 mm<sup>2</sup>. Sin embargo, se debe recurrir a las tablas de calibres comerciales y escoger el calibre inmediato superior: tomando en cuenta un factor de seguridad del 30% que es el usado en la práctica. Para este ejemplo, el calibre comercial elegido tiene una sección real de 33.63 mm<sup>2</sup> que corresponde al calibre 2 AWG.

### 3.3.2.3. División en Tableros

Se ha decidido distribuir los circuitos en cuatro tableros, de acuerdo al tipo de alumbrado, es decir, permanente o diurno y además por túnel, esto es principalmente por razones de mantenimiento y de operación.

Quedando los tableros distribuidos de la siguiente manera:

Tablero	Descripción	Circuitos
I	Alumbrado Permanente Dirección México.	A1-A5, B1-B5
II	Alumbrado Diurno Dirección México.	A6-A9, B6-B9
III	Alumbrado Permanente Dirección Acapulco.	C1-C5, D1-D5
IV	Alumbrado Diurno Dirección Acapulco.	C6-C9, D6-D9

Tabla 3-12 Distribución en Tableros.

De acuerdo a la división de tableros mencionada y en base a los cálculos anteriores, las especificaciones de cada uno de los tableros son las siguientes:

TABLERO I  
ALUMBRADO PERMANENTE DIRECCIÓN MÉXICO

Circuito	300 Watts	Total Watts	Volts	Amp I	F A S E S			Sección mm <sup>2</sup>	Cull. AWG	Sección Real mm <sup>2</sup>
					A	B	C			
A1	17	5,100	220	14.88	1,800	1,800	1,500	5.98	4	21.15
A2	17	5,100	220	14.88	1,800	1,500	1,800	10.26	4	21.15
A3	17	5,100	220	14.88	1,500	1,800	1,800	16.15	2	33.63
A4	17	5,100	220	14.88	1,800	1,800	1,500	22.07	2	33.63
A5	19	5,700	220	16.62	1,800	1,950	1,950	31.99	1/0	53.48
B1	16	4,800	220	14.00	1,650	1,650	1,500	5.08	4	21.15
B2	16	4,800	220	14.00	1,650	1,500	1,650	9.46	4	21.15
B3	16	4,800	220	14.00	1,500	1,650	1,650	14.71	2	33.63
B4	16	4,800	220	14.00	1,650	1,650	1,500	20.57	2	33.63
B5	17	5,100	220	14.88	1,500	1,800	1,800	26.95	1/0	53.48
Totales	168	50,400		147.02	16,650	17,100	16,650			

Tabla 3-13 Tablero alumbrado permanente dirección México.

Con el fin de mantener el sistema balanceado, se requiere distribuir las cargas uniformemente entre las tres fases. Por ser las luminarias iguales en cuanto a su consumo eléctrico, el problema se reduce a conectar las cargas de manera balanceada como se describirá posteriormente.

**TABLERO II**  
**ALUMBRADO DIURNO DIRECCIÓN MÉXICO**

Circuito	300 Wats	Total Watts	Volts	Amp I	F A S E S			Sección mm <sup>2</sup>	Culi. AWG	Sección Real mm <sup>2</sup>
					A	B	C			
A6	16	4,800	220	14.00	1,650	1,650	1,500	4.6	4	21.15
A7	16	4,800	220	14.00	1,650	1,500	1,650	5.86	4	21.15
A8	16	4,800	220	14.00	1,500	1,650	1,650	7.12	4	21.15
A9	16	4,800	220	14.00	1,650	1,650	1,500	9.69	4	21.15
B6	16	4,800	220	14.00	1,650	1,500	1,650	3.94	4	21.15
B7	16	4,800	220	14.00	1,500	1,650	1,650	5.2	4	21.15
B8	16	4,800	220	14.00	1,650	1,650	1,500	6.46	4	21.15
B9	16	4,800	220	14.00	1,650	1,500	1,650	9.04	4	21.15
Totales	128	38,400		112.00	12,900	12,750	12,750			

Tabla 3-14 Tablero alumbrado diurno dirección México.

**TABLERO III**  
**ALUMBRADO PERMANENTE DIRECCIÓN ACAPULCO**

Circuito	300 Wats	Total Watts	Volts	Amp I	F A S E S			Sección mm <sup>2</sup>	Calibre AWG	Sección Real mm <sup>2</sup>
					A	B	C			
C1	17	5,100	220	14.88	1,800	1,800	1,500	8.36	4	21.15
C2	17	5,100	220	14.88	1,800	1,500	1,800	12.56	4	21.15
C3	17	5,100	220	14.88	1,500	1,800	1,800	18.49	2	33.63
C4	17	5,100	220	14.88	1,800	1,800	1,500	24.41	2	33.63
C5	19	5,700	220	16.62	1,800	1,950	1,950	33.44	1/0	53.48
D1	16	4,800	220	14.00	1,650	1,650	1,500	7.73	4	21.15
D2	16	4,800	220	14.00	1,650	1,500	1,650	12.01	4	21.15
D3	16	4,800	220	14.00	1,500	1,650	1,650	18.22	2	33.63
D4	16	4,800	220	14.00	1,650	1,650	1,500	23.47	2	33.63
D5	17	5,100	220	14.88	1,500	1,800	1,800	29.81	1/0	53.48
Totales	168	50,400		147.02	16,650	17,100	16,650			

Tabla 3-15 Tablero alumbrado permanente dirección Acapulco.

**TABLERO IV**  
**ALUMBRADO DIURNO DIRECCIÓN ACAPULCO**

Círculo	300 Watts	Total Watts	Volts	Amp I	F A S E S			Sección mm <sup>2</sup>	Culi. AWG	Sección Real mm <sup>2</sup>
					A	B	C			
C6	16	4,800	220	14.00	1,650	1,650	1,500	23.56	2	33.63
C7	16	4,800	220	14.00	1,650	1,500	1,650	26.14	2	33.63
C8	16	4,800	220	14.00	1,500	1,650	1,650	27.40	1/0	53.48
C9	16	4,800	220	14.00	1,650	1,650	1,500	28.65	1/0	53.48
D6	16	4,800	220	14.00	1,650	1,500	1,650	24.22	2	33.63
D7	16	4,800	220	14.00	1,500	1,650	1,650	26.79	2	33.63
D8	16	4,800	220	14.00	1,650	1,650	1,500	28.05	1/0	53.48
D9	16	4,800	220	14.00	1,650	1,500	1,650	29.31	1/0	53.48
Totales	128	38,400		112.00	12,900	12,750	12,750			

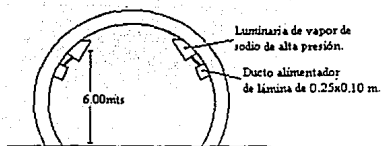
Tabla 3-16 Tablero alumbrado diurno dirección Acapulco.

#### 3.3.2.4. Conexión.

Desde la casa de máquinas hasta el túnel se llevarán los conductores a través de una tubería de asbesto-cemento de 4" de diámetro con registros de 60 x 60 x 40 centímetros espaciados uniformemente.

#### Selección de Ducto.

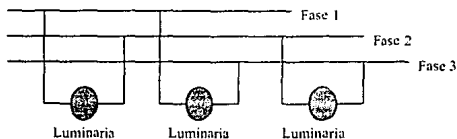
Se requiere un ducto de 10x25 centímetros, se usa un ducto rectangular porque uno cuadrado (que son más comerciales) como se observa en el diagrama (Fig 3-7) resultaría muy abultado, sobresaldría de la luminaria y podría ser un objeto distractor para el conductor ya que crearía sombras.



**Fig 3-7 Colocación de Luminarias y Ducto.**

La altura libre general (gáligo) estipulada para esta carretera es de 5,50m, por lo que se colocarán las luminarias a 6m de altura en ambas paredes.

Una vez en el túnel se utilizará el ducto de 10 x 25 cm descrito anteriormente que será colocado de acuerdo a la Fig 3-7. Para conectar las luminarias se seguirá el tipo de conexión convencional que se muestra en la siguiente figura (Fig 3-8).



**Fig 3-8 Conexión de las luminarias**

Como se observa para las dos últimas luminarias de cada circuito, se necesitará un cable menos. Para una tierra general habrá un cable calibre 4 desnudo a lo largo de cada pared de ambos túneles.

Para conectar las luminarias exteriores, sólo se les integra una celda fotoeléctrica que las encienda cuando sea de noche. Para activar el alumbrado diurno habrá que conectar inversamente una celda fotoeléctrica.



### 3.3.3. Sistema de Respaldo

Debido a la importancia de esta carretera tanto a niveles de flujo vehicular como por su trascendencia geográfica, hemos decidido implementar un sistema de emergencia sofisticado, logrando de esta manera que en caso de una situación de falla súbita por parte de la compañía suministradora, ésta pase totalmente desapercibida para los conductores, evitando accidentes.

El sistema de emergencia propuesto consta de una planta generadora de respaldo con transferencia automática para suplir la alimentación de la compañía suministradora, que será nuestra fuente alternativa de energía.

Como las plantas generadoras no son instantáneas, es decir, tardan unos cuantos segundos en arrancar y convertirse la fuente de energía del sistema de alumbrado total, y como las luminarias elegidas (vapor de sodio de alta presión) presentan la característica de tener un tiempo de restablecimiento considerable (hasta de 5 minutos), es necesario, proveer a este sistema de emergencia con un sistema de continuidad que evite cualquier interrupción en el suministro, ya sea cuando el suministro se transfiera a la planta o cuando se restablezca el suministro por la compañía suministradora.

Para resolver este problema, es necesario implementar un sistema de respaldo de energía ininterrumpido en línea que se denomina UPS - On Line (Uninterrupted power supply, por sus siglas en inglés). Este sistema, como su nombre lo indica, provee continuamente de energía al sistema, aún en caso de cualquier interrupción en el suministro de energía eléctrica. El UPS almacena energía suficiente para suministrar, sin interrupción, la carga requerida por el sistema durante un período máximo de 5 minutos, lo cual es suficiente para que la planta generadora sustituya la alimentación convencional.

El sistema de respaldo es muy importante en este tipo de túneles y, en este caso, es la parte más costosa del sistema de iluminación como veremos posteriormente.

### 3.3.3.1. Plantas Generadoras

El alumbrado se ha dividido en cuatro tableros más uno de servicios generales, como se indica anteriormente, el consumo de cada uno de estos tableros es el siguiente:

I	50.4 KW
II	38.4 KW
III	50.4 KW
IV	38.4 KW
V	4.3 KW

Los tableros I y II comprenden el túnel dirección México, y los III y IV al túnel dirección Acapulco. Como se observa el total de carga por cada túnel asciende a 88.8 KW. Se decidió respaldar cada túnel con una planta generadora, pero como a la vez es necesario también respaldar la casa de máquinas, ésta se ha conectado a una de las plantas, es decir, una planta respaldará al túnel dirección México y la otra además de respaldar al túnel dirección Acapulco, también respaldará la casa de máquinas, por lo que la carga máxima de las plantas quedará:

Planta No. 1 88.8 KW

Planta No, 2 93.1 KW

Aparentemente se podría respaldar todo el sistema de alumbrado con una sola planta de 200 KW, pero haciendo énfasis a la seguridad y a los requerimientos de carga de la unidad ininterrumpida de poder (UPS), para su debido funcionamiento se ha decidido instalar un sistema doble.

El UPS requiere para su debido funcionamiento que la capacidad de las plantas generadoras sea aproximadamente del doble de la carga del sistema, para que estos puedan recargarse mientras alimentan la carga.

Por lo anterior y en base a las especificaciones de los equipos disponibles en el mercado se eligieron plantas de 200 KW.

### 3.3.3.2. Fuente ininterrumpida de potencia (UPS).

Es una fuente de poder ininterrumpida, es decir, en caso de cualquier falla en el suministro de energía, ya sea proveniente de la compañía suministradora, de la planta generadora o durante la transferencia entre cualquiera de éstas, esta fuente proporcionará la continuidad requerida, ya que está conectada en línea.

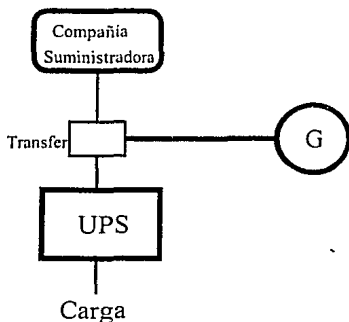


Fig 3-9 Fuente de Poder Ininterrumpida (UPS)

Al igual que en el caso de las plantas requerimos de dos UPS, que individualmente proporcionen 93 KW, por razones de disponibilidad comercial, escogimos los UPS de 120KW / 150KVA, dichos UPS además pueden por sí mismos mantener el suministro de energía por 5 minutos, que resulta suficiente para nuestras necesidades que contemplan normalmente 7 segundos, que es lo que tardan las plantas generadoras en reemplazar la alimentación de la compañía suministradora.

### **3.3.4. Casa de Máquinas.**

La casa de máquinas consistirá en, como su nombre lo indica, el lugar donde se instalará, la sub-estación, el transformador, las plantas generadoras, así como todos los tableros de control, también contará con una pequeña área de servicio, para los operarios.

#### **3.3.4.1. Sub-estación**

Existe una línea de transmisión de 13.2 KV., en el lugar donde se construyó la casa de máquinas. Para poder suministrar la energía eléctrica al túnel, requerimos de una sub-estación y un transformador; la sub-estación nos la proporciona directamente la compañía suministradora.

Esta sub-estación es del tipo compacto y cuenta con los siguientes módulos:

- 1 - Módulo de medición
- 2 - Módulo de cuchillas de paso y prueba
- 3 - Módulo de interruptor, fusibles y pararrayos
- 4 - Módulo de acoplamiento lateral y transformador

#### **3.3.4.2. Cálculo de Tierras**

Uno de los aspectos principales para la protección contra sobretensiones en las subestaciones es la de disponer de una tierra adecuada, a la cual se conectan los neutros de los aparatos, los pararrayos, los cables de guarda, las estructuras metálicas, los tanques de los aparatos y todas aquellas otras partes metálicas que deben estar a potencial de tierra.

### **Necesidad de la Red de Tierra.**

La necesidad de contar con una red de tierra en las subestaciones es la de cumplir con las siguientes funciones:

- Proporcionar un circuito de muy baja impedancia para la circulación de las corrientes de tierra, ya sean debidas a una falla de aislamiento o a la operación de un pararrayo.
- Evitar que durante la circulación de estas corrientes de tierra, puedan producirse diferencias de potencial entre distintos puntos de la sub-estación, que puedan ser peligrosas para el personal.
- Facilitar, mediante sistemas de relevadores, la eliminación de las fallas a tierra en los sistemas eléctricos.
- Dar mayor continuidad y confiabilidad al servicio eléctrico.

### **Elementos de la Red de Tierra.**

- Conductores: Los conductores usados son de cable de cobre. Para sistemas de anillo se usa el cable de cobre de 1000 MCM y para sistemas de malla cable de cobre de 4/0 AWG.
- Electrodo: Son las varillas que se clavan en terrenos blandos y que sirven para encontrar zonas más húmedas y por lo tanto con mayor resistividad eléctrica. Los electrodos pueden ser fabricados de tubos o varillas de fierro galvanizado o bien de varillas de Copperweld.
- Barras para Pararrayos: Son el conjunto de electrodos que se instalan sobre la parte más elevada de las estructuras y que sirven para complementar la red de cables de guarda de la sub-estación.
- Conectores y Accesorios: Son aquellos elementos que nos sirven para unir a la red de tierras, los electrodos profundos, las estructuras, los neutros de los bancos de transformadores, etc. Son principalmente de tres tipos:

- a) Conectores atornillados (alta resistencia mecánica y a la corrosión)
- b) Conectores a presión (económicos, buen contacto)
- c) Conectores soldados (poco usados, fallas en la fusión de las uniones)

#### **Factores Considerados en el Diseño.**

- Características del terreno: Normalmente se obtienen muestras hasta una profundidad razonable que permita juzgar la homogeneidad y condiciones de humedad o nivel de aguas freáticas. Se deberán de realizar mediciones de resistividad eléctrica que incluyan datos sobre la temperatura y condiciones de humedad en el momento de efectuarlas, tipo de terreno, profundidad de la medición y concentración de sales en el suelo.

- Corrientes máximas de cortocircuito a tierra: Para determinar el valor correcto de la corriente de falla a tierra, utilizada en el cálculo del sistema de tierras, se necesita:

a) Determinar el tipo de falla posible a tierra que produzca el máximo flujo de corriente entre la malla del sistema de tierras y la tierra adyacente y por lo tanto su mayor elevación de potencial y los mayores gradientes locales en el área de la sub-estación.

b) Determinar por cómputo o por analizadores, el máximo valor efectivo de la corriente simétrica de falla a tierra entre la malla de tierras y la tierra circundante en el instante de iniciarse la falla.

- Tipos de falla a tierra: son de dos tipos principalmente.

a) Falla monofásica a tierra.

b) Falla polifásica a tierra.

- Factor de seguridad por crecimiento del sistema: Resulta prudente tomar un margen adecuado para estimar los aumentos futuros de las corrientes de falla por aumento de la capacidad del sistema eléctrico o por interconexiones posteriores, pues las modificaciones posteriores a la red de tierras resultan costosas y generalmente se omiten

dando motivo a introducir inseguridad en el sistema. Este efecto puede tomarse en cuenta disminuyendo la impedancia del sistema o aplicando un factor de seguridad al valor calculado de la corriente de falla.

- Efecto de la resistencia del sistema de tierras: En la mayoría de los casos basta con calcular la corriente de falla a tierra despreciando las resistencias. Sin embargo, pueden presentarse casos en donde la resistencia predicha del sistema de tierras sea muy alta comparada con la reactivancia del sistema, lo que obliga a tomarla en cuenta. Esto implica un problema, pues mientras no este diseñado el sistema no puede conocerse su resistencia. Este círculo vicioso se puede romper, ya que una vez determinada la resistividad del terreno, la resistencia depende del área del sistema de tierra que normalmente es conocida.

La resistencia puede estimarse por:

$$R = \frac{\rho}{4 r}$$

En donde:

R = Resistencia del sistema de tierras de la sub-estación en Ohms.

$\rho$  = Resistividad media del terreno, en Ohms - metro.

r = Radio del círculo que tenga la misma área que la ocupada por el sistema de tierras, en metros.

Es importante mencionar que, en la práctica, normalmente no se realizan los cálculos de las redes de tierras. Lo que ocurre es que los responsables de su instalación las instalan de acuerdo a su experiencia.

#### 3.3.4.3. Transformador

Para la selección del transformador sólo tenemos que tomar en cuenta la tensión de la línea que es de 13.2 KV, y la tensión con la que se alimenta nuestro sistema que es de 220V y la carga máxima a la que será sometido, que es de 182 KW.

Por lo anterior se elige el siguiente transformador:

Transformador de 225 KVA

Tipo de enfriamiento: Aceite

Clase 13.2 KV a 220/117 V

### 3.3.4.4. Diagrama Unifilar.

A continuación se muestra el diagrama unifilar del sistema de iluminación de los túneles gemelos de Agua de Obispo, en este diagrama (Fig 3-10), se muestran los tableros, las protecciones, los tipos y calibres del cableado, el sistema de respaldo y emergencia, la sub-estación y el transformador.

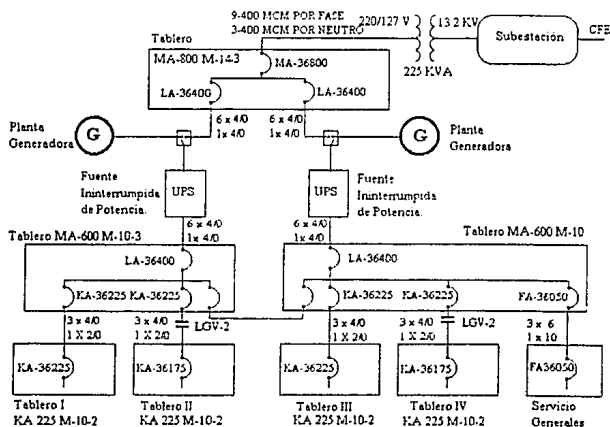


Fig 3-10 Diagrama Unifilar



Como se muestra en el diagrama unifilar, tenemos en la parte inferior del mismo los cuatro tableros correspondientes a las cuatro paredes del túnel, así como el tablero de la casa de máquinas (servicios generales). En la tabla 3-12 se señalan los tipos de tableros usados.

TABLERO	TIPO	I nom	I carga	Protección
Permanente MEX	KA-225 M-10-2	225	147.02	225
Diurno MEX	KA-225 M-10-2	225	112.00	175
Permanente ACA	KA-225 M-10-2	225	147.02	225
Diurno ACA	KA-225 M-10-2	225	112.00	175
Casa máquinas	NQO-14-4AB	225	33.85	50

Tabla 3-17 Tableros I, II, III, IV y V.

También en el diagrama unifilar, arriba de los tableros descritos en la tabla 3-12, tenemos los 2 tableros principales que controlan cada uno a un túnel, el primero el túnel dirección México y a los tableros I y II, y el segundo el túnel dirección Acapulco que comprende a los tableros III, IV y al tablero de servicios generales (casa de máquinas). Como se observa, para el caso de los tableros II y IV, o sea, los tableros de iluminación diurna, se muestran los contactores, que serán los que, conectados a la celda fotoeléctrica inversa, serán los que controlen el encendido y apagado del alumbrado diurno.

TABLERO	TIPO	I nom	I carga	Protección
Dirección México	MA-600 M-10-3	400	259.02	400
Dirección Acapulco	MA-600 M-10	400	292.87	400

Tabla 3-18 Tableros túnel México, túnel Acapulco.

Posteriormente tenemos el sistema de respaldo y emergencia, que consta de las unidades de continuidad conectadas en serie a un tablero de control, que sirve para hacer la transferencia automática entre las plantas generadoras y la alimentación de la compañía suministradora

Luego tenemos el tablero principal, con una I nominal de 800 A y protecciones de 800 A, quedando arriba de éste el transformador y su acoplamiento a la sub-estación. Para los calibres de los conductores entre tableros se eligieron simplemente por su ampacidad ya que la distancia por ser menor a 30 metros es despreciable.

### 3.4. COSTOS

A continuación se muestra un presupuesto de los equipos y materiales requeridos para el alumbrado de los túneles gemelos *Agua de Obispo*, con el fin de proporcionar una idea del costo en el que se incurre al alumbrar, de acuerdo a las recomendaciones de la S.C.T., túneles con características similares.

Partida	Concepto	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Total
1	Sub-estación Clase 15 KV. c/Módulos de medición, cuchillas de paso, interruptor fusibles y pararrayos, acoplamiento lateral a transformador.	1	Pza	58,665.00	58,665.00
2	Planta de Emergencia. 200 KW continuos, 220 KW en emergencia.	2	Pza	165,750.00	331,500.00
3	Tablero de Transferencia Automático para planta de 200 W	2	Pza	5,844.16	11,688.32
4	Tanque de Diario 250 Lts	2	Pza	336.00	672.00
5	Tanque para Diesel 1,000 Lts	2	Pza	6,650.00	13,300.00
6	Sistema de Ininterrumpido de Potencia ( UPS - On line ) 120 KW / 150 KVA	2	Pza	481,118.40	962,236.80
7	Tablero General MA-800M-14-3	1	Pza	12,510.00	12,510.00
8	Tablero Distribución KA-600M-10-3 c/int prin 400 A	2	Pza	10,150.00	20,300.00
9	Tablero Alumbrado KA-225-10-2 2 c/ int principal de 175 A	4	Pza	4,450.00	17,800.00
10	Interruptor Termo magnético 3 polos 400 A	2	Pza	4,650.00	9,300.00
11	Interruptor Termo magnético 3 polos 225 A	4	Pza	4,650.00	18,600.00
12	Interruptor Termo magnético 3 polos 50 A	1	Pza	850.00	850.00
13	Interruptor Termo magnético 3 polos 30 A	36	Pza	850.00	30,600.00

14	Contactor para cargas de alumbrado 3 polos 200 A	2	Pza	11,395.00	22,790.00
15	Tablero Servicios Generales NQQ (14 4AB - 3F 4H)	1	Pza	2,430.20	2,430.20
16	Interruptor Termo magnético 3 polos 30 A QO 330	2	Pza	350.00	700.00
17	Interruptor Termo magnético 1 polo 30 a 20 A	6	Pza	42.50	255.00
18	Luminaria 250W Vapor de sodio a alta presión Autobalastada 220 V	592	Pza	1,065.74	630,918.08
19	Celda Fotoeléctrica de alumbrado público	2	Pza	246.40	492.80
20	Tubo de asbesto cemento de 101 MM	1,860	ML	45.95	85,467.00
21	Ducto rectangular embisagrado 10x25 cm	1,825	ML	125.10	228,307.50
22	Unidad de aire acondicionado.	2	Pza	5,000.00	10,000.00
23	Cable de Cobre Aislamiento THW Calibre 400 MCM	130	ML	81.80	10,634.00
24	Cable de Cobre Aislamiento THW Calibre 4/0 AWG	700	ML	39.04	27,328.00
25	Cable de Cobre Aislamiento THW Calibre 1/0 AWG	13,900	ML	20.46	284,394.00
26	Cable de Cobre Aislamiento THW Calibre 2 AWG	17,500	ML	13.00	227,412.50
27	Cable de Cobre Aislamiento THW Calibre 4 AWG	13,600	ML	8.18	111,193.60
28	Cable de Cobre Aislamiento THW Calibre 6 AWG	400	ML	5.44	2,176.00
29	Cable de Cobre Aislamiento THW Calibre 10 AWG	1,500	ML	1.79	2,688.00
30	Cable de Cobre Aislamiento THW Calibre 12 AWG	650	ML	1.23	800.80

31	Cable de Cobre Desnudo semiduro THW Calibre 4/0 AWG	90	ML	20.09	1,807.65
32	Cable de Cobre Desnudo semiduro THW Calibre 2 AWG	45	ML	7.40	332.78
33	Varilla Copenweld de 16 mm x 3.05 mts	14	Pza	57.95	811.30
34	Carucho # 115	14	Pza	39.06	546.84
35	Carucho # 150	8	Pza	50.29	402.30
36	Carucho # 90	15	Pza	31.47	472.05
37	Carucho # 32	15	Pza	13.19	197.79
38	Poste Metálico 8 metros de altura	6	Pza	1,232.00	7,392.00
39	Tubería PVC de 51 mm	210	ML	21.65	4,546.50
40	Curva de PVC 90 grado de 51 mm	6	Pza	64.92	389.52
41	Registro de Concreto armado 60x60x60 cm	6	Pza	322.56	1,935.36
42	Concreto pobre p/cubrir tubería	25	m3	453.60	11,340.00
43	Contactador Magnético p/cargas de alumbrado 30 A	1	Pza	2,217.60	2,217.60
44	Tarima Aislante de 0.75x1.00 mts	7	Pza	418.50	2,929.50
45	Extintor de CO2 de 9 Kg	5	Pza	730.24	3,651.20
46	Pararrayos EP-D tipo dipolo	1	Pza	1,713.60	1,713.60
49	Electrodo EP-E7 de cobre electrolítico.	1	Pza	1,310.40	1,310.40
50	Cable de cobre electrolítico EP-C1	15	ML	44.36	665.40
51	Cable uso rudo 3XX 12 AWG	900	ML	7.10	6,390.00
52	Conector uso rudo	1,800	Pza	6.19	11,142.00
				Total	3,196,203.39

Los precios unitarios de este presupuesto incluyen mano de obra, materiales, equipos y costos indirectos y están calculados a precios del segundo semestre de 1993.

## **CONCLUSIONES**

## CONCLUSIONES

La firma del tratado de libre comercio, la estabilidad económica, la creciente participación en un mercado internacional muy competido, el desarrollo y evolución de México en los últimos años son un claro indicio para una nueva etapa en los cuales se entrará a nuevos niveles de desarrollo en camino a convertirnos en un país de primera línea.

En esta tesis se ha definido una metodología general para la iluminación adecuada de túneles en carreteras de alta especificación. Es evidente que en los próximos años se van a realizar grandes obras y desarrollos en México en temas de infraestructura debido al las crecientes necesidades de carreteras y vías de comunicación requeridas por el país.

Consideramos que este trabajo servirá como un apoyo técnico, a manera de guía, para los profesionales del ramo de la construcción que vayan a realizar tareas semejantes en el futuro. Como mencionamos al inicio, los planes del Gobierno Federal son muy retadores, agresivos y contemplan un crecimiento acelerado de la infraestructura carretera y en el Sector de Comunicaciones en general, por lo que decidimos desarrollar un ejemplo de una de las carreteras más importantes y completas surgidas a raíz de este plan.

A la vez, el túnel elegido en este estudio, tanto por su magnitud, localización e importancia económica desde el punto de vista turístico y comercial, es un patrón muy completo que sienta las bases y criterios generales para el cálculo de otros túneles, que, aunque presenten especificaciones distintas, requerirán de un cálculo similar. Si se siguen los criterios definidos y la metodología de cálculo, estos cambios serán sencillos y el producto será un túnel con iluminación de calidad y cumpliendo con las más exigentes normas nacionales e internacionales de iluminación.

## **BIBLIOGRAFÍA**

**Asociación de Aplicaciones de la Electricidad.**

**FUENTES DE LUZ,**  
España, Ed. Paraninfo, 1992.

**Baumeister, Theodor III, et al.**

**MANUAL DEL INGENIERO MECANICO, MARKS, 2a edición**  
México, Ed. McGraw Hill, 1982.

**Compañía de Luz y Fuerza del Centro.**

**MANUAL DE DISEÑO DE SUBESTACIONES,**  
México, Gcia. de Planeación e Ingeniería, 1975.

**Europhone.**

**LES LUMIERES,**  
Paris, Catálogo 1986-1987.

**Knowlton, A. E.**

**MANUAL "STANDARD" DEL INGENIERO ELECTRICISTA,**  
México, Ed. Labor, 1967.

**Ramírez, José.**

**LUMINOTECNIA,**  
España, Ed. CEAC, 1990.

**Secretaría de Comunicaciones y Transportes.**

**MANUAL DE ALUMBRADO VIAL**  
México, Dirección General de Servicios Técnicos, 1989.

**Secretaría de Comunicaciones y Transportes.**

**NORMAS DE SERVICIOS TÉCNICOS, Carreteras**  
México, Dirección General de Servicios Técnicos, 1984.



**Urraca Piñeiro, J. Ignacio.**  
**TRATADO DE ALUMBRADO PÚBLICO,**  
España, Ed. Donostiarra, 1988.

**Weigel, R.G.**  
**LUMINOTECNIA, Sus Principios y Aplicaciones**  
Barcelona, Ed. Gustavo Gili, 1957.

# **ANEXO A**

## **CÁLCULO DE LA SECCIÓN DE LOS CONDUCTORES SEGÚN EL MÉTODO TEÓRICO**



Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
49	216.70	0.8748	276.70	242.06
50	221.70	0.8748	281.70	246.43
51	226.70	0.8748	286.70	250.81
52	231.70	0.8748	291.70	255.18
53	236.70	0.8748	296.70	259.55
54	241.70	0.8748	301.70	263.93
55	246.70	0.8748	306.70	268.30
56	251.70	0.8748	311.70	272.68
57	256.70	0.8748	316.70	277.05
58	261.70	0.8748	321.70	281.42
59	266.70	0.8748	326.70	285.80
60	271.70	0.8748	331.70	290.17
61	276.70	0.8748	336.70	294.55
62	281.70	0.8748	341.70	298.92
63	286.70	0.8748	346.70	303.29
64	291.70	0.8748	351.70	307.67
65	296.70	0.8748	356.70	312.04

Para A4

Σ I·d 4,709.84

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
66	301.70	0.8748	361.70	316.42
67	306.70	0.8748	366.70	320.79
68	311.70	0.8748	371.70	325.16
69	316.70	0.8748	376.70	329.54
70	321.70	0.8748	381.70	333.91
71	326.70	0.8748	386.70	338.29
72	331.70	0.8748	391.70	342.66
73	336.70	0.8748	396.70	347.03
74	341.70	0.8748	401.70	351.41
75	346.70	0.8748	406.70	355.78
76	351.70	0.8748	411.70	360.16
77	356.70	0.8748	416.70	364.53
78	361.70	0.8748	421.70	368.90
79	366.70	0.8748	426.70	373.28
80	371.70	0.8748	431.70	377.65
81	376.70	0.8748	436.70	382.03
Ext 1	382.00	0.8748	442.00	386.66
Ext 2	412.00	0.8748	472.00	412.91
Ext 3	442.00	0.8748	502.00	439.15

Para A5

Σ I·d 6,826.24

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
1	1.40	0.8748	61.40	53.71
2	2.30	0.8748	62.30	54.50
3	3.20	0.8748	63.20	55.29
4	5.00	0.8748	65.00	56.86
5	5.90	0.8748	65.90	57.65
6	6.80	0.8748	66.80	58.44
7	8.60	0.8748	68.60	60.01
8	9.50	0.8748	69.50	60.80
9	10.40	0.8748	70.40	61.59
10	12.20	0.8748	72.20	63.16
11	13.10	0.8748	73.10	63.95
12	14.00	0.8748	74.00	64.74
13	15.80	0.8748	75.80	66.31
14	16.70	0.8748	76.70	67.10
15	17.60	0.8748	77.60	67.88
16	19.40	0.8748	79.40	69.46

Para A6

$\Sigma$ I·d	981.44
--------------	--------

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
17	20.30	0.8748	80.30	70.25
18	21.20	0.8748	81.20	71.03
19	23.00	0.8748	83.00	72.61
20	23.90	0.8748	83.90	73.40
21	24.80	0.8748	84.80	74.18
22	26.60	0.8748	86.60	75.76
23	27.50	0.8748	87.50	76.55
24	28.40	0.8748	88.40	77.33
25	30.20	0.8748	90.20	78.91
26	31.10	0.8748	91.10	79.69
27	32.00	0.8748	92.00	80.48
28	33.80	0.8748	93.80	82.06
29	34.70	0.8748	94.70	82.84
30	35.60	0.8748	95.60	83.63
31	37.40	0.8748	97.40	85.21
32	38.30	0.8748	98.30	85.99

Para A7

$\Sigma$ I·d	1,249.91
--------------	----------

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
33	39.20	0.8748	99.20	86.78
34	41.00	0.8748	101.00	88.35
35	41.90	0.8748	101.90	89.14
36	42.80	0.8748	102.80	89.93
37	44.60	0.8748	104.60	91.50
38	45.50	0.8748	105.50	92.29
39	46.40	0.8748	106.40	93.08
40	48.20	0.8748	108.20	94.65
41	49.10	0.8748	109.10	95.44
42	50.00	0.8748	110.00	96.23
43	51.80	0.8748	111.80	97.80
44	52.70	0.8748	112.70	98.59
45	53.60	0.8748	113.60	99.38
46	55.40	0.8748	115.40	100.95
47	56.30	0.8748	116.30	101.74
48	57.20	0.8748	117.20	102.53

Para A8

 $\Sigma I \cdot d$ 

1,518,39

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
49	59.00	0.8748	119.00	104.10
50	59.90	0.8748	119.90	104.89
51	60.80	0.8748	120.80	105.68
52	64.20	0.8748	124.20	108.65
53	69.20	0.8748	129.20	113.02
54	74.20	0.8748	134.20	117.40
55	79.20	0.8748	139.20	121.77
56	84.20	0.8748	144.20	126.15
57	89.20	0.8748	149.20	130.52
58	94.20	0.8748	154.20	134.89
59	99.20	0.8748	159.20	139.27
60	104.20	0.8748	164.20	143.64
61	109.20	0.8748	169.20	148.02
62	114.20	0.8748	174.20	152.39
63	119.20	0.8748	179.20	156.76
64	124.20	0.8748	184.20	161.14

Para A9

 $\Sigma I \cdot d$ 

2,068,29

## RESUMEN DE CIRCUITOS DE LA PARED A

Circuito	$\Sigma I \cdot d$	Sección
Para A1	1.276.82	5.98
Para A2	2.189.01	10.26
Para A3	3.445.75	16.15
Para A4	4.709.84	22.07
Para A5	6.826.24	31.99
Para A6	981.44	4.60
Para A7	1.249.91	5.86
Para A8	1.518.39	7.12
Para A9	2.068.29	9.69

## CIRCUITOS PARED B

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
1	0.50	0.8748	50.50	44.18
2	4.10	0.8748	54.10	47.53
3	7.70	0.8748	57.70	50.48
4	11.30	0.8748	61.30	53.63
5	14.90	0.8748	64.90	56.77
6	18.50	0.8748	68.50	59.92
7	22.10	0.8748	72.10	63.07
8	25.70	0.8748	75.70	66.22
9	29.30	0.8748	79.30	69.37
10	32.90	0.8748	82.90	72.52
11	36.50	0.8748	86.50	75.67
12	40.10	0.8748	90.10	78.82
13	43.70	0.8748	93.70	81.97
14	47.30	0.8748	97.30	85.12
15	50.90	0.8748	100.90	88.27
16	54.50	0.8748	104.50	91.42

Para B1

$\Sigma I \cdot d$	1,084.75
--------------------	----------

Luminaria	Distancia	I	d	I · d
#	(metros)	(Amperes)	(metros)	
17	58.10	0.8748	108.10	94.57
18	61.70	0.8748	111.70	97.72
19	66.70	0.8748	116.70	102.09
20	71.70	0.8748	121.70	106.46
21	76.70	0.8748	126.70	110.84
22	81.70	0.8748	131.70	115.21
23	86.70	0.8748	136.70	119.59
24	91.70	0.8748	141.70	123.96
25	96.70	0.8748	146.70	128.33
26	101.70	0.8748	151.70	132.71
27	106.70	0.8748	156.70	137.08
28	111.70	0.8748	161.70	141.46
29	116.70	0.8748	166.70	145.83
30	121.70	0.8748	171.70	150.20
31	126.70	0.8748	176.70	154.58
32	131.70	0.8748	181.70	158.95

Para B2

$\Sigma I \cdot d$	2,019,56
--------------------	----------

Luminaria	Distancia	I	d	I · d
#	(metros)	(Amperes)	(metros)	
33	136.70	0.8748	186.70	163.33
34	141.70	0.8748	191.70	167.70
35	146.70	0.8748	196.70	172.07
36	151.70	0.8748	201.70	176.45
37	156.70	0.8748	206.70	180.82
38	161.70	0.8748	211.70	185.20
39	166.70	0.8748	216.70	189.57
40	171.70	0.8748	221.70	193.94
41	176.70	0.8748	226.70	198.32
42	181.70	0.8748	231.70	202.69
43	186.70	0.8748	236.70	207.07
44	191.70	0.8748	241.70	211.44
45	196.70	0.8748	246.70	215.81
46	201.70	0.8748	251.70	220.19
47	206.70	0.8748	256.70	224.56
48	211.70	0.8748	261.70	228.94

Para B3

$\Sigma I \cdot d$	3,138,08
--------------------	----------



Luminaria	Distancia	I	d	I · d
#	(metros)	(Amperes)	(metros)	
49	216.70	0.8748	266.70	233.31
50	221.70	0.8748	281.70	246.43
51	226.70	0.8748	286.70	250.81
52	231.70	0.8748	291.70	255.18
53	236.70	0.8748	296.70	259.55
54	241.70	0.8748	301.70	263.93
55	246.70	0.8748	306.70	268.30
56	251.70	0.8748	311.70	272.68
57	256.70	0.8748	316.70	277.05
58	261.70	0.8748	321.70	281.42
59	266.70	0.8748	326.70	285.80
60	271.70	0.8748	331.70	290.17
61	276.70	0.8748	336.70	294.55
62	281.70	0.8748	341.70	298.92
63	286.70	0.8748	346.70	303.29
64	291.70	0.8748	351.70	307.67

Para B4

 $\Sigma I \cdot d$ 

4,389.05

Luminaria	Distancia	I	d	I · d
#	(metros)	(Amperes)	(metros)	
65	296.70	0.8748	346.70	303.29
66	301.70	0.8748	351.70	307.67
67	306.70	0.8748	356.70	312.04
68	311.70	0.8748	361.70	316.42
69	316.70	0.8748	366.70	320.79
70	321.70	0.8748	371.70	325.16
71	326.70	0.8748	376.70	329.54
72	331.70	0.8748	381.70	333.91
73	336.70	0.8748	386.70	338.29
74	341.70	0.8748	391.70	342.66
75	346.70	0.8748	396.70	347.03
76	351.70	0.8748	401.70	351.41
77	356.70	0.8748	406.70	355.78
78	361.70	0.8748	411.70	360.16
79	366.70	0.8748	416.70	364.53
80	371.70	0.8748	421.70	368.90
81	376.70	0.8748	426.70	373.28

Para B5

 $\Sigma I \cdot d$ 

5,750.85

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
1	1.40	0.8748	51.40	44.96
2	2.30	0.8748	52.30	45.75
3	3.20	0.8748	53.20	46.54
4	5.00	0.8748	55.00	48.11
5	5.90	0.8748	55.90	48.90
6	6.80	0.8748	56.80	49.69
7	8.60	0.8748	58.60	51.26
8	9.50	0.8748	59.50	52.05
9	10.40	0.8748	60.40	52.84
10	12.20	0.8748	62.20	54.41
11	13.10	0.8748	63.10	55.20
12	14.00	0.8748	64.00	55.99
13	15.80	0.8748	65.80	57.56
14	16.70	0.8748	66.70	58.35
15	17.60	0.8748	67.60	59.14
16	19.40	0.8748	69.40	60.71

Para B6

 $\Sigma I \cdot d$ 

841.47

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
17	20.30	0.8748	70.30	61.50
18	21.20	0.8748	71.20	62.29
19	23.00	0.8748	73.00	63.86
20	23.90	0.8748	73.90	64.65
21	24.80	0.8748	74.80	65.44
22	26.60	0.8748	76.60	67.01
23	27.50	0.8748	77.50	67.80
24	28.40	0.8748	78.40	68.58
25	30.20	0.8748	80.20	70.16
26	31.10	0.8748	81.10	70.95
27	32.00	0.8748	82.00	71.73
28	33.80	0.8748	83.80	73.31
29	34.70	0.8748	84.70	74.10
30	35.60	0.8748	85.60	74.88
31	37.40	0.8748	87.40	76.46
32	38.30	0.8748	88.30	77.24

Para B7

 $\Sigma I \cdot d$ 

1,109.95

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
33	39.20	0.8748	89.20	78.03
34	41.00	0.8748	91.00	79.61
35	41.90	0.8748	91.90	80.39
36	42.80	0.8748	92.80	81.18
37	44.60	0.8748	94.60	82.76
38	45.50	0.8748	95.50	83.54
39	46.40	0.8748	96.40	84.33
40	48.20	0.8748	98.20	85.91
41	49.10	0.8748	99.10	86.69
42	50.00	0.8748	100.00	87.48
43	51.80	0.8748	101.80	89.05
44	52.70	0.8748	102.70	89.84
45	53.60	0.8748	103.60	90.63
46	55.40	0.8748	105.40	92.20
47	56.30	0.8748	106.30	92.99
48	57.20	0.8748	107.20	93.78

Para B8

 $\Sigma$  I·d

1,378.42

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
49	59.00	0.8748	109.00	95.35
50	59.90	0.8748	109.90	96.14
51	60.80	0.8748	110.80	96.93
52	64.20	0.8748	114.20	99.90
53	69.20	0.8748	119.20	104.28
54	74.20	0.8748	124.20	108.65
55	79.20	0.8748	129.20	113.02
56	84.20	0.8748	134.20	117.40
57	89.20	0.8748	139.20	121.77
58	94.20	0.8748	144.20	126.15
59	99.20	0.8748	149.20	130.52
60	104.20	0.8748	154.20	134.89
61	109.20	0.8748	159.20	139.27
62	114.20	0.8748	164.20	143.64
63	119.20	0.8748	169.20	148.02
64	124.20	0.8748	174.20	152.39

Para B9

 $\Sigma$  I·d

1,928.32

## Resumen Circuitos Pared B

Circuito	$\Sigma I \cdot d$	Sección
Para B1	1,084.75	5.08
Para B2	2,019.56	9.46
Para B3	3,138.08	14.71
Para B4	4,389.05	20.57
Para B5	5,750.85	26.95
Para B6	841.47	3.94
Para B7	1,109.95	5.20
Para B8	1,378.42	6.46
Para B9	1,928.32	9.04

## CIRCUITOS PARED C

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
Ext1	5.00	0.8748	75.00	65.61
Ext2	35.00	0.8748	105.00	91.85
Ext3	65.00	0.8748	135.00	118.10
66	75.30	0.8748	145.30	127.11
67	70.30	0.8748	140.30	122.73
68	65.30	0.8748	135.30	118.36
69	60.30	0.8748	130.30	113.99
70	55.30	0.8748	125.30	109.61
71	50.30	0.8748	120.30	105.24
72	45.30	0.8748	115.30	100.86
73	40.30	0.8748	110.30	96.49
74	35.30	0.8748	105.30	92.12
75	30.30	0.8748	100.30	87.74
76	25.30	0.8748	95.30	83.37
77	20.30	0.8748	90.30	78.99
78	15.30	0.8748	85.30	74.62
79	10.30	0.8748	80.30	70.25
80	5.30	0.8748	75.30	65.87
81	0.30	0.8748	70.30	61.50

Para C1

$\Sigma I \cdot d$	1,784.42
--------------------	----------

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
51	150.30	0.8748	220.30	192.72
52	145.30	0.8748	215.30	188.34
53	140.30	0.8748	210.30	183.97
54	135.30	0.8748	205.30	179.60
55	130.30	0.8748	200.30	175.22
56	125.30	0.8748	195.30	170.85
57	120.30	0.8748	190.30	166.47
58	115.30	0.8748	185.30	162.10
59	110.30	0.8748	180.30	157.73
60	105.30	0.8748	175.30	153.35
61	100.30	0.8748	170.30	148.98
62	95.30	0.8748	165.30	144.60
63	90.30	0.8748	160.30	140.23
64	85.30	0.8748	155.30	135.86
65	80.30	0.8748	150.30	131.48
66	75.30	0.8748	145.30	127.11
67	70.30	0.8748	140.30	122.73

Para C2

 $\Sigma$  I·d

2,681.35

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
34	235.30	0.8748	305.30	267.08
35	230.30	0.8748	300.30	262.70
36	225.30	0.8748	295.30	258.33
37	220.30	0.8748	290.30	253.95
38	215.30	0.8748	285.30	249.58
39	210.30	0.8748	280.30	245.21
40	205.30	0.8748	275.30	240.83
41	200.30	0.8748	270.30	236.46
42	195.30	0.8748	265.30	232.08
43	190.30	0.8748	260.30	227.71
44	185.30	0.8748	255.30	223.34
45	180.30	0.8748	250.30	218.96
46	175.30	0.8748	245.30	214.59
47	170.30	0.8748	240.30	210.21
48	165.30	0.8748	235.30	205.84
49	160.30	0.8748	230.30	201.47
50	155.30	0.8748	225.30	197.09

Para C3

 $\Sigma$  I·d

3,945.44

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
17	318.90	0.8748	388.90	340.21
18	315.30	0.8748	385.30	337.06
19	310.30	0.8748	380.30	332.69
20	305.30	0.8748	375.30	328.31
21	300.30	0.8748	370.30	323.94
22	295.30	0.8748	365.30	319.56
23	290.30	0.8748	360.30	315.19
24	285.30	0.8748	355.30	310.82
25	280.30	0.8748	350.30	306.44
26	275.30	0.8748	345.30	302.07
27	270.30	0.8748	340.30	297.69
28	265.30	0.8748	335.30	293.32
29	260.30	0.8748	330.30	288.95
30	255.30	0.8748	325.30	284.57
31	250.30	0.8748	320.30	280.20
32	245.30	0.8748	315.30	275.82
33	240.30	0.8748	310.30	271.45

Para C4

$\Sigma$ I·d	5,208.30
--------------	----------

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
1	376.50	0.8748	446.50	390.60
2	372.90	0.8748	442.90	387.45
3	369.30	0.8748	439.30	384.30
4	365.70	0.8748	435.70	381.15
5	362.10	0.8748	432.10	378.00
6	358.50	0.8748	428.50	374.85
7	354.90	0.8748	424.90	371.70
8	351.30	0.8748	421.30	368.55
9	347.70	0.8748	417.70	365.40
10	344.10	0.8748	414.10	362.25
11	340.50	0.8748	410.50	359.11
12	336.90	0.8748	406.90	355.96
13	333.30	0.8748	403.30	352.81
14	329.70	0.8748	399.70	349.66
15	326.10	0.8748	396.10	346.51
16	322.50	0.8748	392.50	343.36
Ext 1	382.00	0.8748	452.00	395.41
Ext 2	412.00	0.8748	482.00	421.65
Ext 3	442.00	0.8748	512.00	447.90

Para C5

$\Sigma$ I·d	7,136.62
--------------	----------

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
49	318.00	0.8748	388.00	339.42
50	317.10	0.8748	387.10	338.64
51	316.20	0.8748	386.20	337.85
52	312.80	0.8748	382.80	334.87
53	307.80	0.8748	377.80	330.50
54	302.80	0.8748	372.80	326.13
55	297.80	0.8748	367.80	321.75
56	292.80	0.8748	362.80	317.38
57	287.80	0.8748	357.80	313.00
58	282.80	0.8748	352.80	308.63
59	277.80	0.8748	347.80	304.26
60	272.80	0.8748	342.80	299.88
61	267.80	0.8748	337.80	295.51
62	262.80	0.8748	332.80	291.13
63	257.80	0.8748	327.80	286.76
64	252.80	0.8748	322.80	282.39

Para C6

 $\Sigma$  I·d

5,028.09

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
33	337.80	0.8748	407.80	356.74
34	336.00	0.8748	406.00	355.17
35	335.10	0.8748	405.10	354.38
36	334.20	0.8748	404.20	353.59
37	332.40	0.8748	402.40	352.02
38	331.50	0.8748	401.50	351.23
39	330.60	0.8748	400.60	350.44
40	328.80	0.8748	398.80	348.87
41	327.90	0.8748	397.90	348.08
42	327.00	0.8748	397.00	347.30
43	325.20	0.8748	395.20	345.72
44	324.30	0.8748	394.30	344.93
45	323.40	0.8748	393.40	344.15
46	321.60	0.8748	391.60	342.57
47	320.70	0.8748	390.70	341.78
48	319.80	0.8748	389.80	341.00

Para C7

 $\Sigma$  I·d

5,577.99

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
17	356.70	0.8748	426.70	373.28
18	355.80	0.8748	425.80	372.49
19	354.00	0.8748	424.00	370.92
20	353.10	0.8748	423.10	370.13
21	352.20	0.8748	422.20	369.34
22	350.40	0.8748	420.40	367.77
23	349.50	0.8748	419.50	366.98
24	348.60	0.8748	418.60	366.19
25	346.80	0.8748	416.80	364.62
26	345.90	0.8748	415.90	363.83
27	345.00	0.8748	415.00	363.04
28	343.20	0.8748	413.20	361.47
29	342.30	0.8748	412.30	360.68
30	341.40	0.8748	411.40	359.89
31	339.60	0.8748	409.60	358.32
32	338.70	0.8748	408.70	357.53

Para C8

$\Sigma$ I·d	5,846.46
--------------	----------

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
1	375.60	0.8748	445.60	389.81
2	374.70	0.8748	444.70	389.02
3	373.80	0.8748	443.80	388.24
4	372.00	0.8748	442.00	386.66
5	371.10	0.8748	441.10	385.87
6	370.20	0.8748	440.20	385.09
7	368.40	0.8748	438.40	383.51
8	367.50	0.8748	437.50	382.73
9	366.60	0.8748	436.60	381.94
10	364.80	0.8748	434.80	380.36
11	363.90	0.8748	433.90	379.58
12	363.00	0.8748	433.00	378.79
13	361.20	0.8748	431.20	377.21
14	360.30	0.8748	430.30	376.43
15	359.40	0.8748	429.40	375.64
16	357.60	0.8748	427.60	374.06

Para C9

$\Sigma$ I·d	6,114.94
--------------	----------



## Resumen Circuitos Pared C

Circuito	$\Sigma I \cdot d$	Sección
Para C1	1.784.42	8.36
Para C2	2.681.35	12.56
Para C3	3.945.44	18.49
Para C4	5.208.30	24.41
Para C5	7.136.62	33.44
Para C6	5.028.09	23.56
Para C7	5.577.99	26.14
Para C8	5.846.46	27.40
Para C9	6.114.94	28.65

## CIRCUITOS PARED D

Luminaria	Distancia	I	d	I · d
#	(metros)	(Amperes)	(metros)	
66	75.30	0.8748	155.30	135.86
67	70.30	0.8748	150.30	131.48
68	65.30	0.8748	145.30	127.11
69	60.30	0.8748	140.30	122.73
70	55.30	0.8748	135.30	118.36
71	50.30	0.8748	130.30	113.99
72	45.30	0.8748	125.30	109.61
73	40.30	0.8748	120.30	105.24
74	35.30	0.8748	115.30	100.86
75	30.30	0.8748	110.30	96.49
76	25.30	0.8748	105.30	92.12
77	20.30	0.8748	100.30	87.74
78	15.30	0.8748	95.30	83.37
79	10.30	0.8748	90.30	78.99
80	5.30	0.8748	85.30	74.62
81	0.30	0.8748	80.30	70.25

Para D1

$\Sigma I \cdot d$	1,648,82
--------------------	----------

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
50	155.30	0.8748	235.30	205.84
51	150.30	0.8748	230.30	201.47
52	145.30	0.8748	225.30	197.09
53	140.30	0.8748	220.30	192.72
54	135.30	0.8748	215.30	188.34
55	130.30	0.8748	210.30	183.97
56	125.30	0.8748	205.30	179.60
57	120.30	0.8748	200.30	175.22
58	115.30	0.8748	195.30	170.85
59	110.30	0.8748	190.30	166.47
60	105.30	0.8748	185.30	162.10
61	100.30	0.8748	180.30	157.73
62	95.30	0.8748	175.30	153.35
63	90.30	0.8748	170.30	148.98
64	85.30	0.8748	165.30	144.60
65	80.30	0.8748	160.30	140.23

Para D2

Σ I·d 2,562.73

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
34	235.30	0.8748	315.30	275.82
35	230.30	0.8748	310.30	271.45
36	225.30	0.8748	305.30	267.08
37	220.30	0.8748	300.30	262.70
38	215.30	0.8748	295.30	258.33
39	210.30	0.8748	290.30	253.95
40	205.30	0.8748	285.30	249.58
41	200.30	0.8748	280.30	245.21
42	195.30	0.8748	275.30	240.83
43	190.30	0.8748	270.30	236.46
44	185.30	0.8748	265.30	232.08
45	180.30	0.8748	260.30	227.71
46	175.30	0.8748	255.30	223.34
47	170.30	0.8748	250.30	218.96
48	165.30	0.8748	245.30	214.59
49	160.30	0.8748	240.30	210.21

Para D3

Σ I·d 3,888.31

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
18	315.30	0.8748	395.30	345.81
19	310.30	0.8748	390.30	341.43
20	305.30	0.8748	385.30	337.06
21	300.30	0.8748	380.30	332.69
22	295.30	0.8748	375.30	328.31
23	290.30	0.8748	370.30	323.94
24	285.30	0.8748	365.30	319.56
25	280.30	0.8748	360.30	315.19
26	275.30	0.8748	355.30	310.82
27	270.30	0.8748	350.30	306.44
28	265.30	0.8748	345.30	302.07
29	260.30	0.8748	340.30	297.69
30	255.30	0.8748	335.30	293.32
31	250.30	0.8748	330.30	288.95
32	245.30	0.8748	325.30	284.57
33	240.30	0.8748	320.30	280.20

Para D4

 $\Sigma I \cdot d$ 

5,008.06

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
1	376.50	0.8748	456.50	399.35
2	372.90	0.8748	452.90	396.20
3	369.30	0.8748	449.30	393.05
4	365.70	0.8748	445.70	389.90
5	362.10	0.8748	442.10	386.75
6	358.50	0.8748	438.50	383.60
7	354.90	0.8748	434.90	380.45
8	351.30	0.8748	431.30	377.30
9	347.70	0.8748	427.70	374.15
10	344.10	0.8748	424.10	371.00
11	340.50	0.8748	420.50	367.85
12	336.90	0.8748	416.90	364.70
13	333.30	0.8748	413.30	361.55
14	329.70	0.8748	409.70	358.41
15	326.10	0.8748	406.10	355.26
16	322.50	0.8748	402.50	352.11
17	318.90	0.8748	398.90	348.96

Para D5

 $\Sigma I \cdot d$ 

6,360.58

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
49	318.00	0.8748	398.00	348.17
50	317.10	0.8748	397.10	347.38
51	316.20	0.8748	396.20	346.60
52	312.80	0.8748	392.80	343.62
53	307.80	0.8748	387.80	339.25
54	302.80	0.8748	382.80	334.87
55	297.80	0.8748	377.80	330.50
56	292.80	0.8748	372.80	326.13
57	287.80	0.8748	367.80	321.75
58	282.80	0.8748	362.80	317.38
59	277.80	0.8748	357.80	313.00
60	272.80	0.8748	352.80	308.63
61	267.80	0.8748	347.80	304.26
62	262.80	0.8748	342.80	299.88
63	257.80	0.8748	337.80	295.51
64	252.80	0.8748	332.80	291.13

Para D6

 $\Sigma$  I·d

5,168.06

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
33	337.80	0.8748	417.80	365.49
34	336.00	0.8748	416.00	363.92
35	335.10	0.8748	415.10	363.13
36	334.20	0.8748	414.20	362.34
37	332.40	0.8748	412.40	360.77
38	331.50	0.8748	411.50	359.98
39	330.60	0.8748	410.60	359.19
40	328.80	0.8748	408.80	357.62
41	327.90	0.8748	407.90	356.83
42	327.00	0.8748	407.00	356.04
43	325.20	0.8748	405.20	354.47
44	324.30	0.8748	404.30	353.68
45	323.40	0.8748	403.40	352.89
46	321.60	0.8748	401.60	351.32
47	320.70	0.8748	400.70	350.53
48	319.80	0.8748	399.80	349.75

Para D7

 $\Sigma$  I·d

5,717.96

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
17	356.70	0.8748	436.70	382.03
18	355.80	0.8748	435.80	381.24
19	354.00	0.8748	434.00	379.66
20	353.10	0.8748	433.10	378.88
21	352.20	0.8748	432.20	378.09
22	350.40	0.8748	430.40	376.51
23	349.50	0.8748	429.50	375.73
24	348.60	0.8748	428.60	374.94
25	346.80	0.8748	426.80	373.36
26	345.90	0.8748	425.90	372.58
27	345.00	0.8748	425.00	371.79
28	343.20	0.8748	423.20	370.22
29	342.30	0.8748	422.30	369.43
30	341.40	0.8748	421.40	368.64
31	339.60	0.8748	419.60	367.07
32	338.70	0.8748	418.70	366.28

Para D8

 $\Sigma$  I·d

5,986.43

Luminaria #	Distancia (metros)	I (Amperes)	d (metros)	I · d
1	375.60	0.8748	455.60	398.56
2	374.70	0.8748	454.70	397.77
3	373.80	0.8748	453.80	396.98
4	372.00	0.8748	452.00	395.41
5	371.10	0.8748	451.10	394.62
6	370.20	0.8748	450.20	393.83
7	368.40	0.8748	448.40	392.26
8	367.50	0.8748	447.50	391.47
9	366.60	0.8748	446.60	390.69
10	364.80	0.8748	444.80	389.11
11	363.90	0.8748	443.90	388.32
12	363.00	0.8748	443.00	387.54
13	361.20	0.8748	441.20	385.96
14	360.30	0.8748	440.30	385.17
15	359.40	0.8748	439.40	384.39
16	357.60	0.8748	437.60	382.81

Para D9

 $\Sigma$  I·d

6,254.91

## Resumen Circuitos Pared D

Circuito	$\Sigma I-d$	Sección
Para D1	1.648.82	7.73
Para D2	2.562.73	12.01
Para D3	3.888.31	18.22
Para D4	5.008.06	23.47
Para D5	6.360.58	29.81
Para D6	5.168.06	24.22
Para D7	5.717.96	26.79
Para D8	5.986.43	28.05
Para D9	6.254.91	29.31