

**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL**

**DE LAS AMÉRICAS**

**VICERRECTORÍA ACADÉMICA**

**Escuela de Ingeniería Electromecánica**

**DISEÑO DE ILUMINACIÓN PARA TÚNELES REALIZADO**

**CON DIFERENTES TECNOLOGÍAS**

**MODALIDAD DE TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE**

**LICENCIATURA EN**

**INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**Autor:**

**Ing. Jeyson Esquivel Chinchilla**

**SEDE ARANJUEZ, JULIO, 2019**

## Contenido

Declaración jurada .....	6
Dedicatoria .....	7
Agradecimientos .....	8
Resumen.....	9
<b>Capítulo I: Introducción.....</b>	<b>10</b>
Planteamiento del problema .....	10
Objetivo general.....	10
Objetivos específicos .....	10
Introducción.....	11
Justificación.....	12
Antecedentes.....	13
Proyecciones.....	15
<b>Capitulo II: Marco teórico.....</b>	<b>16</b>
Concepto de iluminación.....	16
Lumen .....	16
Candela.....	17
Diodo LED .....	18
Sodio de alta presión .....	20
Características.....	20
Temperatura de color .....	21
Deslumbramiento.....	22
Efecto Purkinje .....	23
Iluminancia.....	23
Luminancia .....	24
IRC.....	25
Vida media y vida útil.....	25
Eficacia luminosa.....	27
Alumbrado en túneles .....	28
Iluminación diurna .....	28

Zona de umbral .....	31
Zona de transición.....	32
Zona central .....	32
Zona de salida.....	33
LED en túneles .....	33
Iluminación nocturna .....	34
Luminancias de velo .....	35
Equipos de alumbrado.....	35
Mantenimiento.....	36
Requerimientos de un proyecto de iluminación en túneles .....	37
Caracterización de túneles cortos.....	37
Caracterización de túneles largos.....	38
Estudio en función del tráfico.....	38
Estudio en función de la cantidad de tráfico.....	38
Estudio en función de la calidad del tráfico.....	39
Estudio en función de la configuración del guiado visual .....	40
Estudio en función del confort en la conducción.....	41
Clasificación de túneles largos según sus exigencias de iluminación.....	41
Reglas de cálculo .....	42
Uniformidad longitudinal en la zona de transición .....	43
Método L20 .....	44
Cálculo del incremento de umbral .....	45
VAN y TIR.....	46
<b>Capítulo III: Marco metodológico.....</b>	<b>48</b>
Enfoque de la investigación.....	48
Método de la investigación.....	48
Fuentes de información .....	49
Variables o unidades de análisis .....	49
Instrumentos .....	49
Proceso para la recolección y análisis de datos .....	50

<b>Capítulo IV: Análisis de resultados</b> .....	<b>51</b>
Escogencia de norma .....	51
Factores importantes de la norma IESNA .....	51
Situación actual del túnel Zurquí .....	57
Sondeo de mercado para la escogencia de luminarias .....	57
Temperatura de color .....	58
Telegestión .....	58
Dimerización .....	58
Grado IP o de hermeticidad.....	59
Grado IK o grado de impacto .....	59
Conectores .....	59
Potencia, lúmenes y eficiencia de la luminaria.....	60
Análisis con luminaria LED OMNIstar y luminaria TunnelView de Philips.....	64
Diseño de iluminación con luminaria LED TunnelView de Philips .....	66
Zona Threshold o zona umbral con Luminaria Philips LED.....	69
Zona de transición N.º 1 con Luminaria Philips LED.....	70
Zona de transición N.º 2 con luminaria Philips LED.....	72
Zona interna con luminaria Philips LED.....	74
Diseño de iluminación con luminaria sodio de alta presión Tunlite de Philips .....	77
Zona Threshold o zona de umbral con luminaria Philips Tunlite de sodio de alta presión.....	79
Zona de transición N.º 1 con luminaria Philips Tunlite de sodio de alta presión.....	81
Zona de transición N.º 2 con luminaria Philips Tunlite de sodio de alta presión.....	83
Zona interior con luminaria Philips Tunlite de sodio de alta presión .....	85
Resumen de datos .....	86
Análisis lumínico en el periodo de noche.....	88
Análisis financiero .....	89
Análisis económico social.....	91
<b>Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones</b> .....	<b>93</b>
Conclusiones.....	93
Recomendaciones.....	97

Referencias.....98

**Apéndices** .....99

Entrevistas ..... 99

Cotizaciones ..... 104

Fotografías del túnel Zurquí ..... 106

Fichas técnicas de luminarias ..... 110

Imágenes de luminarias..... 114

Distribucion de luminarias..... 117

Renders y colores falsos ..... 119

## Dedicatoria

En primer lugar, a Dios, que me ha guiado y dado la fortaleza necesaria para salir victorioso en esta etapa de mi vida. A mis padres porque siempre estuvieron en el momento oportuno cuando más los necesité con sus palabras de apoyo. Gracias a ellos he llegado hasta aquí. A los profesores de la Universidad Internacional de las Américas porque tuvieron la paciencia de compartir conmigo sus conocimientos y experiencias y porque con el pasar de los años me vieron crecer como persona y como profesional. Y a todos mis amigos y colegas que con ellos libré todo tipo de lucha para alcanzar esta meta.

## Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios porque me permitió culminar con éxito esta etapa de mi vida y porque me dio las fuerzas necesarias para poder lograr mis objetivos. A mis padres Emilio Esquivel y Xiomara Chinchilla porque nunca me han fallado; siempre me han dado más de lo que yo pueda merecer. No tengo las palabras apropiadas para agradecer lo que ellos me han dado en esta vida. A mis familiares porque me apoyaron en todo momento en este largo camino. A mis compañeros de carrera porque me acompañaron durante esta travesía y poco a poco se convirtieron en colegas y amigos. A mi tutor, el Ing. José Gerardo Romero Meneses, porque me inculcó sus conocimientos y me dio las herramientas necesarias para terminar este proyecto. Además, a todos los compañeros de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz por compartir conmigo un poco de su tiempo para consultarles sobre mis dudas.

## Resumen

En este estudio se comparan dos diseños de iluminación utilizando diferentes tecnologías, la de vapor de sodio de alta presión y la tecnología LED, de las cuales se escogerá la más adecuada para su colocación en el túnel Zurquí. En la comparación se toman en cuenta normas de iluminación que por tanto son usadas en la construcción del diseño, e igualmente se muestra el procedimiento de realización de un estudio de este tipo, ya que se incluyen estudios de mercado para verificación de características técnicas de las luminarias, así como también el uso de software de apoyo para la simulación en proyectos de iluminación.

Además, en el presente estudio se contempla un análisis técnico-económico de las dos tecnologías para determinar cuál es el diseño que mejor se adapta a las necesidades del túnel Zurquí. Además, se presentará una justificación socioeconómica para respaldar la inversión en un proyecto de carácter público como este.

# Capítulo I: Introducción

## Planteamiento del problema

¿En cuanto a eficiencia y calidad, cuál de los dos diseños de iluminación que se comparan en este estudio es el más adecuado para instalar en el túnel Zurquí (ubicado en la provincia de San José, en la ruta de 32)?

## Objetivo general

- 1) Efectuar un diseño de iluminación de túneles utilizando dos tecnologías diferentes.

## Objetivos específicos

- 1) Investigar acerca de cuáles son las normativas que se aplican en el país para el diseño de un sistema de iluminación de túneles
- 2) Efectuar un sondeo de mercado acerca de las características técnicas de las luminarias de con tecnología LED y de vapor de sodio de alta presión que podrían usarse en el diseño.
- 3) Elegir un producto que represente a cada tecnología de las seleccionadas mediante sondeo y con base en las normativas vigentes o utilizadas en el país, lo mismo que determinar su costo.
- 4) Realizar un diseño del túnel Zurquí utilizando las luminarias escogidas y mediante simulaciones hechas en un software de iluminación, como el DIALux Evo.
- 5) Efectuar una comparación técnica de ventajas y desventajas de las tecnologías de vapor de sodio de alta presión y la de tecnología LED, con base en el diseño de iluminación anterior
- 6) Efectuar una comparación económica de las tecnologías de vapor de sodio de alta presión y las de tecnología LED, con base en el diseño de iluminación indicado anteriormente.
- 7) Escoger una tecnología basada en los datos técnicos y económicos obtenidos en la investigación.
- 8) Realizar un análisis socioeconómico para visualizar el impacto que tendría un proyecto de este tipo.

## Introducción

El Zurquí es un túnel montañoso para el paso de vehículos automotores que está localizado en la ruta 32 de Costa Rica. Atraviesa el cerro Hondura y su longitud es de 597,5 metros y es de 12 metros de ancho y de 10 de alto. Su construcción tuvo lugar en 1983 y se inauguró el 14 de setiembre de 1984. Posteriormente se le instalaron luces en su interior.

La iluminación de los túneles ha llegado a ser un factor muy importante en el ámbito de la seguridad vial, ya que una mala iluminación puede provocar un accidente de tránsito que puede acabar con la vida de personas. Por ejemplo, si el conductor de un vehículo cualquiera procede de un ambiente totalmente abierto, como en una carretera en donde el cielo abierto puede tener una iluminación de 100 mil luxes, al ingresar al túnel mal iluminado puede tener un efecto de ceguera, lo cual es muy peligroso porque el contraste es muy alto. El objetivo es reducir el contraste de la luz que hay entre el exterior y el interior del túnel. Afortunadamente, el mercado de hoy en día ofrece una cantidad infinita de opciones de luminarias para poder llegar a cumplir con los niveles necesarios y poder evitar lo que sería un accidente que ocasione lesiones y pérdida de vidas o bienes materiales.

Algunas de esas tecnologías son las luces LED (diodo emisor de luz), que son unas de las más recientes y que por su vida útil, niveles de iluminación y bajos consumos ofrecidos se sobreponen a luminarias de otros tipos de tecnología. Aun así, varios diseñadores prefieren usar otro tipo de tecnología por tener luces más cálidas a menor precio con igualdad de condiciones de las luminarias del tipo LED. Un ejemplo de esto son las luces de vapor de sodio de alta presión. Estas dos tecnologías son usadas hoy en día en la industria de la iluminación para iluminar calles, parques, túneles, hogares, estaciones de trabajo, hospitales, etc. Estas tecnologías siempre van de la mano con un buen diseño que se adapte a las necesidades que se presentan en los diferentes proyectos.

## Justificación

El presente trabajo de investigación tiene como propósito diseñar un sistema de iluminación para el túnel Zurquí. El que está en servicio es de vapor de sodio de alta presión y también el nuevo contará con esa misma tecnología (vapor de sodio de alta presión) pero moderna. Este nuevo diseño será comparado con otro de tecnología LED, el cual deberá contar con las temperaturas de color que sean adecuadas para no ocasionar encandilamiento, y con luminarias que se adecuen al ambiente húmedo de lugares como el mencionado.

Actualmente se sabe que la tecnología LED tiene una vida útil mayor que la de otras tecnologías de iluminación; sin embargo, el costo de estos tipos de tecnologías de iluminación son mayores que los de las demás tecnologías. Por lo tanto, se realiza este estudio para saber si el costo mayor provoca un alto impacto en un proyecto de este tipo, o si sus beneficios no pueden justificar la diferencia de precio con otros tipos de luminarias. Se requiere saber si en realidad la tecnología LED es la mejor opción del mercado para casos de túneles.

Además de lo anterior, el túnel debe tener una buena iluminación ya que la 32 es una ruta nacional con tránsito muy denso y bajo las condiciones de oscuridad, humedad y neblina que presenta la zona circundante al túnel Zurquí. Se debe garantizar una buena luminaria que llene todas las necesidades que se presenten en un diseño como este para poder evitar accidentes de tránsito por falta de luz, o, en casos contrarios, accidentes por causa de deslumbramiento por un mal diseño. Con los resultados de este estudio y los análisis económicos que se realizarán se hará una comparación técnico-económica para poder escoger la mejor luminaria para el proyecto. Además de lo expuesto anteriormente, se revisarán normas internacionales relacionadas con la iluminación de túneles y documentación que puedan aportar conocimiento aplicable al proyecto.

## Antecedentes

**Título: Diseño de iluminación con luminarias tipo led basado en el concepto de eficiencia energética y confort visual, implementación de estructura para pruebas**

**Autores: Miguel Paul Castro Guaman, Norman Christos Posligua Murillo**

**Año: 2015**

Institución: Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil.

Los autores de este proyecto realizaron estudios de diferentes tipos de luminarias según su ambiente de trabajo para un confort visual del espectador. Por ejemplo, realizaron análisis fotométricos con datos teóricos, simulados y reales, por medio del software Dialux, los cuales se emplearán como referencia en esta investigación.

En este estudio se analizan varias opciones para determinar cuál sería la mejor para ayudar académicamente en la enseñanza de los profesores y el aprendizaje de los estudiantes. De acuerdo con esto se escogió la opción de instalar una estructura para realizar pruebas de luminarias ya que se tenía mucho desconocimiento del tema.

Hablan de que el humano es un ser capaz de adaptarse a su entorno, y de que la luz influye grandemente en la capacidad de las personas; esto porque es necesario apreciar la forma, el color y la perspectiva de los objetos que se ven en la vida diaria. También hablan de que para diferentes trabajos se necesitan diferentes niveles de iluminación, e igualmente señalan que siempre se debe tener confort visual para evitar el cansancio o la fatiga en los diferentes centros de trabajo.

Básicamente, el estudio consiste en diseñar una estructura dinámico-didáctica para realizar pruebas de luminarias LED con voltajes de 120 Vac. Por lo tanto, este estudio ofrece valiosa información sobre las

consecuencias de una mala iluminación y conceptos importantes que podrán ser usados en la presente investigación.

**Título: Optimización de los niveles de iluminación en los túneles de Colombia mediante el diseño de un sistema de control automático con el fin de disminuir los consumos de energía eléctrica**

**Autores: Andrés Zahir Campo Vargas, Angie Gineth Gómez Hernández**

**Año: 2015**

**Institución: Universidad Distrital Francisco José De Caldas**

Este trabajo de grado tiene como finalidad crear un sistema de control automático para la optimización de los niveles de iluminación en los túneles de Colombia. Esto con el fin de disminuir los consumos de energía eléctrica. El trabajo tiene como base una amplia investigación del estado del arte de los últimos años, que contiene el desarrollo del área hasta el día de hoy. De este modo es posible conocer los avances tecnológicos que se han venido presentando en los últimos años en cuanto a esquemas de control para sistemas de iluminación. De acuerdo con esto se establecen los parámetros y requisitos de diseño que se deben aplicar a un sistema de iluminación de túneles. Mediante el uso del software Tunnel V3.0 de libre uso, el Schröder, se diseñará un sistema de iluminación de túneles en el que se cumpla con los requerimientos establecidos en la normatividad vigente -RETILAP-. Este, a su vez, permite establecer las variables de entrada que deben considerarse para el desarrollo de un esquema de control inteligente, mediante lógica difusa para la iluminación de túneles que permita contribuir con el PRO-URE. Igualmente habla de sistemas de control moderno y de que la tecnología juega un papel importante en la iluminación de túneles. Se habla también de que se puede tener un mejor control con estos sensores para poder tener los niveles de iluminación adecuados con respecto a los factores que considere la persona que está a cargo del proyecto. También se habla de sistemas inteligentes lo cual resulta muy importante, ya

que con señales de entrada se puede lograr una automatización completa del sistema, sin interacción del hombre y, aun así, se puede monitorear para poder determinar un posible error en el sistema. Esto último resulta enriquecedor ya puede dar ideas e información para que el diseño de interés sea el adecuado y tenga las tecnologías adecuadas para su aplicación.

## Proyecciones

El estudio incluye fichas técnicas de diferentes luminarias para escoger una que se adecue a la aplicación que se desea. Se hará también un estudio de mercado para determinar qué se puede obtener de un producto de teste tipo. Además de esto, cuando se tengan las luminarias seleccionadas para el proyecto se hará un diseño de ellas por medio de algún programa de simulación de iluminación. En este caso se usará Dialux para poder obtener una simulación lo más cercana posible a lo que se obtendría en la realidad.

Finalmente se entregará un dispositivo de almacenamiento con todas las memorias de cálculo, las simulaciones y la información recopilada que sustentó la escogencia de la tecnología escogida para el proyecto.

## Capítulo II: Marco teórico

### Concepto de iluminación

La iluminación es la acción o efecto de iluminar. En la técnica se refiere al conjunto de dispositivos que se instalan para producir ciertos efectos luminosos, tanto prácticos como decorativos. Con la iluminación se pretende, en primer lugar, conseguir un nivel de iluminación -interior o exterior- o iluminancia adecuada al uso que se quiere dar al espacio iluminado, nivel que dependerá de la tarea que los usuarios hayan de realizar. (FREMAP, 1997)

### Lumen

El lumen (símbolo: lm) es la unidad del Sistema Internacional de Medidas para medir el flujo luminoso, una medida de la potencia luminosa emitida por la fuente. El flujo luminoso se diferencia del flujo radiante en que el primero contempla la sensibilidad variable del ojo humano a las diferentes longitudes de onda de la luz, y el último involucra toda la radiación electromagnética emitida por la fuente según las leyes de Wien y las de Stefan-Boltzmann, sin considerar si tal radiación es visible o no. (Ilutop, 2018)

El lumen es definido en su relación con la unidad de intensidad luminosa, la candela (cd) y la unidad de ángulo sólido el estereorradián (sr), así:

$$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr}$$

Your Old Lamp	LED Replacement	Lumen Value
100W	16 - 20W	1300 Lumens
60W	6 - 8W	700 Lumens
40W	4 - 5W	400 Lumens
25W	3W	200 Lumens

Figura N.º 1. Ejemplo de cálculo rápido de lúmenes.

Fuente: Venoptix

## Candela

La candela (símbolo: cd) es la unidad básica del sistema internacional que mide la intensidad luminosa. Se define como la intensidad luminosa en una dirección dada, de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  hercios y de la cual la intensidad radiada en esa dirección es de  $1/683$  vatios por estereorradián.<sup>1</sup>

Esta cantidad es equivalente a la que en 1948, en la Conferencia General de Pesas y Medidas, se definió como una sexagésima parte de la luz emitida por un centímetro cuadrado de platino puro en estado sólido a la temperatura de su punto de fusión (2046 K). (Bricos, 2013)

## Diodo LED

Un diodo emisor de luz o led (también conocido por la sigla LED, del inglés *Light-emitting diode*), es una fuente de luz constituida por un material semiconductor dotado de dos terminales. Se trata de un diodo de unión p-n que emite luz cuando está activado. Si se aplica una tensión adecuada a las terminales los electrones se recombinan con los huecos en la región de la unión p-n del dispositivo y liberan energía en forma de fotones. Este efecto se denomina electroluminiscencia, y el color de la luz generada (que depende de la energía de los fotones emitidos) viene determinado por la anchura de la banda prohibida del semiconductor. Los ledes son normalmente pequeños (menos de 1 mm<sup>2</sup>) y se les asocia con algunos componentes ópticos para configurar un patrón de radiación.

Los primeros ledes fueron fabricados como componentes electrónicos para su uso práctico en 1962 y emitían luz infrarroja de baja intensidad. Estos led infrarrojos se siguen empleando como elementos transmisores en circuitos de control remoto, como son los mandos a distancia utilizados dentro de una amplia variedad de productos de electrónica de consumo. Los primeros ledes de luz visible también eran de baja intensidad y se limitaban al espectro rojo. Los ledes modernos pueden abarcar longitudes de onda dentro de los espectros visible, ultravioleta e infrarrojo, y alcanzar luminosidades muy elevadas.

Los primeros ledes se emplearon en los equipos electrónicos como lámparas indicadoras en sustitución de las bombillas incandescentes. Pronto se asociaron con las presentaciones numéricas en forma de indicadores alfanuméricos de siete segmentos, al mismo tiempo que se incorporaron en los relojes digitales. Los recientes desarrollos ya permiten emplear los ledes para la iluminación ambiental en sus diferentes aplicaciones. Los ledes han permitido el desarrollo de nuevas pantallas de visualización y sensores, y sus altas velocidades de conmutación permiten utilizarlos también para tecnologías avanzadas de comunicaciones.

Hoy en día los ledes ofrecen muchas ventajas sobre las fuentes convencionales de luces incandescentes o fluorescentes, dentro de lo cual destacan un menor consumo de energía, una vida útil más larga, una robustez física mejorada, un tamaño más pequeño, así como la posibilidad de fabricarlos en muy diversos colores del espectro visible de manera mucho más definida y controlada; en el caso de ledes multicolores, con una frecuencia de conmutación rápida.

Estos diodos se utilizan ahora en aplicaciones muy variadas y en todas las áreas tecnológicas actuales, desde la bioingeniería, la medicina y la sanidad; pasando por la nanotecnología y la computación cuántica, los dispositivos electrónicos o la iluminación en la ingeniería de minas. Entre los más populares están las pantallas QLed de los televisores y los dispositivos móviles, la luz de navegación de los aviones, los faros delanteros de los vehículos, los anuncios publicitarios, la iluminación en general; los semáforos, las lámparas de destellos y los papeles luminosos de pared. Desde el comienzo de 2017 las lámparas led para la iluminación de las viviendas son tan baratas o más que las lámparas fluorescentes compactas, de comportamiento similar al de los ledes. También son más eficientes energéticamente y, posiblemente, su eliminación como desecho provoque menos problemas ambientales. (2018, Área Tecnología)

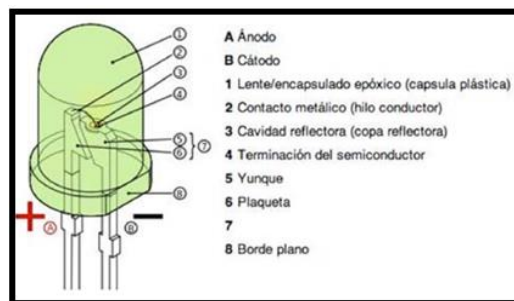


Figura N.º 2. Imagen de un led y sus partes.

Fuente: Wikipedia

## Sodio de alta presión

La lámpara de vapor de sodio es un tipo de lámpara de descarga de gas que usa vapor de sodio para producir luz. Es una de las fuentes de iluminación actualmente más eficientes, ya que proporcionan gran cantidad de lúmenes por vatio. El color de la luz que producen es amarillo brillante.

### **Características**

El foco de vapor de sodio está compuesto de un tubo de descarga de cerámica translúcida; esto con el fin de soportar la alta corrosión del sodio y las altas temperaturas que se generan. En los extremos tiene dos electrodos que suministran la tensión eléctrica necesaria para que el vapor de sodio encienda.

Para operar estas lámparas se requieren un balastro y un ignitor. Generalmente se le agrega un capacitor, pero su función es únicamente mejorar el factor de potencia o coseno de  $F_i$  del conjunto, el cual puede descartarse con el consiguiente aumento de la corriente, lo cual puede verse midiéndola con una pinza voltiamperométrica).

Para su encendido requiere alrededor de 4-6 minutos y para el reencendido de 4 a 5 minutos.

El tiempo de vida de estas lámparas es muy largo ya que es cercano a 24.000 horas y su rendimiento está entre 80 y 115 lum/W, las de VSAP, y entre 135 y 175 lum/W las SBP.

### Usos

- Si bien son de elevado rendimiento luminoso, el hecho de que tengan una luz monocromática hace que sus aplicaciones se vean reducidas.
- Se usa preferentemente en alumbrado urbano vial: calles y avenidas urbanas; accesos y salidas de grandes ciudades; carreteras y autopistas; túneles urbanos y de carretera; depósitos y almacenes; garajes de camiones; etc.

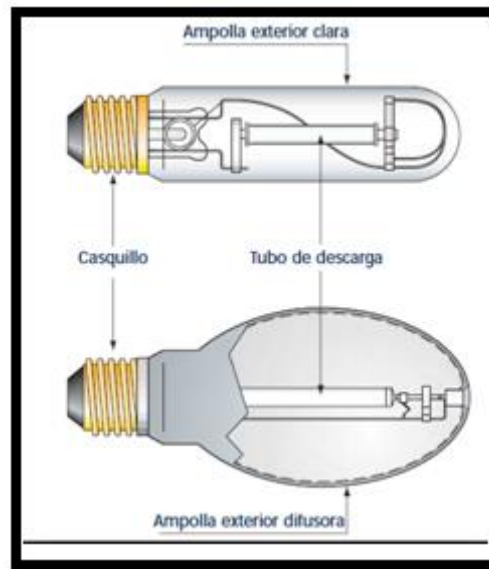


Figura N.º 3. Lámpara de vapor de sodio de alta presión

Fuente: Efimarket

## Temperatura de color

La temperatura de color podría definirse como “el predominio de alguno de los colores del espectro lumínico en las luces blancas”, que alteran el color blanco con tendencia a tonos cálidos (ámbar) o a tonos fríos (azul) en el espectro.

La temperatura de color se mide en grados Kelvin y solo se aplica a las luces blancas. Si se tiene una fuente de luz de cualquier color, como azul o verde, no se podría medir su temperatura de color. Hay varios tipos de dominantes de color, pero los más destacados son el color anaranjado o ámbar y los de tonalidades azules.

Las luces blancas que tengan dominante de color ámbar son las llamadas luces cálidas, porque el efecto que se ve en la iluminación de una habitación da una sensación cálida.

Las luces blancas con dominante de color azul son luces frías. El efecto psicológico que vemos en una habitación iluminada con este tipo de luces da la sensación de encontrarse en un lugar frío.

La temperatura de color nada tiene que ver con que la fuente de luz produzca o no calor. Se habla de la reacción psicológica producida en el cerebro al encontrar un ambiente iluminado por esta tonalidad. La temperatura de color nunca es totalmente exacta al existir factores que pueden producir cambios en la iluminación (2012, Efimarket)

## Deslumbramiento

El UGR (índice de deslumbramiento unificado) es una forma de evaluar y comparar el deslumbramiento que producen las diferentes fuentes de luz.

Este índice es fundamental para diseñar iluminación adecuada para las actividades que se van a realizar en el espacio. Es fácil de entender que las necesidades lumínicas y el confort visual de un pasillo no son las mismas que las de un aula o las de un quirófano.

Antes de entrar a definir un detalle del UGR es conveniente revisar qué se entiende por deslumbramiento, cuáles son sus causas, y definir sus efectos.

El deslumbramiento es la turbación de la vista por luz excesiva o repentina. En definitiva, no es más que una disminución de la capacidad de distinguir objetos provocada por aumento, normalmente brusco, de la luz.

## Efecto Purkinje

Se da en el periodo nocturno. El ojo humano se adapta a la situación y los brillos aparecen diferentes. Ante una pérdida de luz la retina reacciona reduciendo su sensibilidad a altas longitudes de onda, lo que compensa con una sensibilidad creciente de las altas frecuencias. En consecuencia, mientras que en condiciones de buena iluminación el color que el humano aprecia con más brillo es el rojo, cuando no hay luz suficiente el color más brillante es el azul.

La retina se ha conformado con dos células receptoras diferentes: conos, más sensibles a la luz amarilla, y bastones, menos especializados, que se dedican a la percepción de la luz en general. En ausencia de luz suficiente los bastones son más competentes por inhibición fisiológica de los conos. La retina no presenta adaptaciones correctas a visiones intermedias entre las descritas, de ahí que al atardecer y al anochecer el ojo humano esté en situación de desventaja frente a iluminaciones más extremas. La adaptación natural de la retina en esos casos se reduce a esperar lo que por experiencia sabe que ocurrirá: amanecerá o anochecerá.

## Iluminancia

La iluminancia es, en Física, la magnitud que expresa el flujo luminoso que incide en la unidad de superficie. Su unidad en el Sistema Internacional es el lux". Se trata de una forma de repartir el flujo luminoso en una determinada superficie. Dado que las unidades del flujo luminoso son los lúmenes y las de superficie los metros cuadrados (en el SI2), un lux puede definirse como la proporción uno a uno entre las dos magnitudes consideradas (2015, Fenercom), es decir:

$$1 \text{ lux} = \frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ m}^2}$$

## Luminancia

Luminancia es un término relativo a la luz que llega al ojo. Es el reparto de la intensidad luminosa disponible entre la superficie aparente que aprecia el órgano visual dedicado en la dirección de observación. Así, sus unidades han de ser las candelas, por la intensidad luminosa, y los metros cuadrados por la superficie observada. Se expresa matemáticamente como:

$$L = \frac{I}{S_{\text{aparente}}}$$

Donde L es la luminancia en cd/m<sup>2</sup>; I es la intensidad luminosa en candelas (cd); y S aparente es la superficie aparente que percibe el ojo que observa en una determinada dirección.

Se encuentran otras unidades fuera del SI3 como el nit (nt) o el stilb (sb), que se refieren a:

$$1\text{nt} = \frac{1\text{cd}}{1\text{m}^2} \quad \text{y} \quad 1\text{sb} = \frac{1\text{cd}}{1\text{cm}^2}$$

La superficie aparente es la proyección de la superficie afectada de la dirección perpendicular de observación; por tanto, su cálculo se realiza desde aquella contando con el coseno del ángulo de proyección. Seguidamente se muestran la relación matemática y una ilustración aclaratoria:

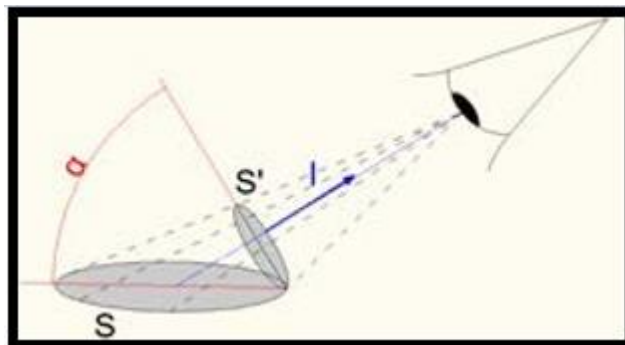


Figura N.º 4. Superficie aparente

Fuente: FENERCOM

## IRC

IRC es la sigla que se corresponde con el índice de reproducción cromática, concepto relacionado con la calidad en iluminación. Se establece una escala porcentual en la que se le concede el 100 a la luz natural. De este modo se entiende que cuanto más cercano a 100 es el IRC más naturales se aprecian los colores y la luz parece menos artificial.

Las lámparas LED de calidad ofrecen entre 85 y 95 de IRC. Las lámparas con las que se consigue un mejor índice son, precisamente, las que presentan una menor eficiencia: halógenas e incandescentes. Aunque es deseable el mayor IRC posible, un 80 es suficiente para la mayoría de las aplicaciones:

Lámpara	IRC
Incandescentes	100
Halógenas	100
Fluorescentes	65-85
Bajo consumo	15-85
VPSB	0
VSAP	0-70
Vapor de mercurio	25-60
Halogenuro metálico	65-90
Inducción	79
LED	65-90

*Tabla N.º 1. Tipos de lámpara con sus IRC*

*Fuente: FENERCOM*

## Vida media y vida útil

Se interpreta como la media estadística de la vida útil de una lámpara según su uso. Resulta

complicado, por su propia definición, determinar la vida media de una lámpara, ya que para ello debieran manejarse datos suficientes sobre cada tipo de puesta en servicio.

El periodo de medición de la vida útil comienza cuando la lámpara se pone en servicio y concluye cuando la cantidad de luz queda en 70% de la nominal. Un seguimiento de la vida útil permite descubrir su “no linealidad”.

Haciendo referencia a la vida útil, que responde a las pruebas normativas que cada fabricante realiza sobre sus lámparas, las tecnologías LED ofrecen vidas útiles de unas 50.000 horas frente a otras, como las halógenas, que se aproximan a las 2.000 horas. Los parámetros que influyen en la vida útil de una lámpara son: la temperatura, la intensidad, la calidad de los elementos constitutivos y los defectos implícitos.

La temperatura en servicio de la lámpara resulta esencial para alcanzar vidas medias destacables.

En todas las lámparas resulta fundamental la temperatura ambiente; pero, además, en algunas tipologías ganan importancia también las temperaturas internas del sistema que compone la lámpara. En el caso de las tecnologías LED la temperatura de la unión puede resultar crítica, con valores de esta muy elevados que pueden suponer reducir la vida útil a más de la mitad. Para el control de este parámetro crítico se disponen disipadores de calor en la zona trasera de la lámpara LED. De su correcto diseño depende, en gran medida, que la unidad alcance la vida útil esperada. Intensidades luminosas por encima de las de diseño recomendadas por el fabricante reducen sensiblemente la vida útil, aparte de afectar la eficiencia luminosa del sistema. Trabajar con lámparas que disponen de un sistema electrónico de control de la intensidad garantiza una influencia negativa menor de este aspecto.

Las pruebas realizadas en laboratorio por normativa se hacen en condiciones óptimas, cuestión imposible en una aplicación real, en especial en túneles, en los que la temperatura ambiente es muy variable estacionalmente (más en túneles cortos) y en los cuales los niveles de contaminación

del aire son superiores con respecto al exterior.

La calidad de los materiales con los que se construye una lámpara es esencial. En LED esta se traduce en una máxima exigencia de la pureza de los semiconductores empleados en su configuración. Los semiconductores de mayor calidad se destinan a los equipos electrónicos de más alta tecnología, aunque entre ellos podrían considerarse las lámparas LED. En estas se montan semiconductores de alta pureza, no tanto como en equipos electrónicos robóticos y otros, como la refrigeración de ordenadores de alta capacidad y otros. La calidad escogida es suficiente; sin embargo, esta resulta una de las más claras diferencias entre los LED de calidad y el resto.

### Eficacia luminosa

Es el concepto que resulta del reparto matemático del flujo luminoso emitido por la fuente luminosa entre la potencia consumida. Habitualmente se expresa en lúmenes por vatio ( $\text{lm/W}$ ). De la tabla expuesta a continuación se deduce que la mayor eficacia luminosa se corresponde con las LED y que eso se apoya en su menor consumo de potencia eléctrica:

Lumenes	Potencia consumida			
	LED	Incandescentes	Halógenas	CFL* y fluorescentes
50/80	1,3	10	-	-
110/120	3,5	15	10	5
250/440	5	25	20	7
550/650	9	40	35	9
650/800	11	60	50	11
800/1500	15	75	70	18
1500/1800	18	100	100	20
2500/2800	25	150	150	30
2600/2800	30	200	200	40

*Tabla N.º 2. Potencia consumida según flujo luminoso.*

*Fuente: FENERCOM*

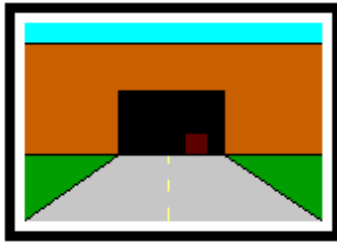
## Alumbrado en túneles

En la iluminación de túneles, y en general de cualquier tramo de vía cubierta, se busca proporcionar unas condiciones de seguridad, visibilidad, economía y fluidez adecuadas para el tráfico rodado. En túneles cortos, de menos de 100 m, no será necesario iluminar, salvo de noche o en circunstancias de poca visibilidad. En los largos será necesario un estudio individualizado de cada caso. Para ello es necesario analizar los problemas que representan los túneles para los vehículos en condiciones de día o de noche, el mantenimiento necesario y las características de los equipos de alumbrado por instalar.

## Iluminación diurna

Cuando se está cerca de un túnel de día, la primera dificultad que se encuentra es el llamado efecto del agujero negro. En él la entrada se presenta como una mancha oscura en cuyo interior no se puede

distinguir nada. Este problema, que se presenta cuando se está a una distancia considerable del túnel, se debe a que la luminancia ambiental en el exterior es mucho mayor que la de la entrada. Es el fenómeno de la inducción.

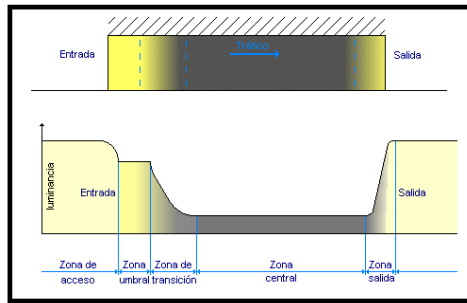


*Figura N.º 5. Efecto del agujero negro*

*Fuente: Recursos Citcea*

A medida que va llegando a la entrada esta va ocupando una mayor porción del campo visual y los ojos de la persona se van adaptando progresivamente al nivel de iluminación de su interior. Pero si la transición es muy rápida comparada con la diferencia entre las luminancias exterior e interior, se sufre una ceguera momentánea con visión borrosa hasta llegar a un nuevo estado de adaptación visual. Es lo mismo que ocurre cuando, en un día soleado, se entra en un portal oscuro y durante unos instantes no se ve con claridad. Es el fenómeno de la adaptación.

Se trata, por lo tanto, de un problema de diferencia de niveles de luminancia entre el exterior (3000-8000  $\text{cd/m}^2$ ) y el interior del túnel (5-10  $\text{cd/m}^2$ ). Podría pensarse que manteniendo un valor de luminancia próximo al del exterior en toda su longitud se habría resuelto el problema; pero esta solución es antieconómica. Lo que se hace en túneles largos con densidad de tráfico elevada o cualquier otra circunstancia que dificulte la visión es reducir progresivamente el nivel de luminancia desde la entrada hasta la zona central. En la salida no hay que preocuparse de esto pues al pasar de niveles bajos a altos esta es muy rápida. Así pues, se pueden dividir los túneles en varias zonas según los requerimientos luminosos:



*Figura N.º 6, Niveles de luminancia requeridos en un túnel de tráfico unidireccional*

*Fuente: Recursos Citcea*

Antes de establecer la iluminación necesaria en la entrada del túnel se debe determinar el nivel medio de luminancia en la zona de acceso o luminancia externa de adaptación. Esta magnitud se calcula a partir de las luminancias de los elementos del campo visual del observador, como pueden ser: el cielo, los edificios, las montañas, los árboles, la carretera, etc., y su valor oscila entre 3 000 y 10 000 cd/m<sup>2</sup>.



*Figura N.º. Zona llana y descubierta*



*Figura N.º 8. Zona edificada*



*Figura N.º 9. Zona montañosa*

*Fuente: Recursos Citcea*

En zonas llanas y descubiertas en donde el cielo ocupa la mayor parte del campo visual se puede tomar un valor máximo de 8 000 cd/m<sup>2</sup>, mientras que en las zonas montañosas o edificadas en donde cobran mayor importancia las luminancias de los edificios, las montañas, la carretera o los árboles se adopta un valor de 10 000 cd/m<sup>2</sup>.

Sin embargo, estos valores orientativos no excluyen de hacer un cálculo más riguroso de la luminancia de la zona de acceso, siguiendo las recomendaciones y normas vigentes.

### Zona de umbral

Para proporcionar al conductor una información visual adecuada en la entrada del túnel la iluminación debe ser por lo menos 10% de la luminancia de la zona de acceso en un tramo de longitud aproximadamente igual a la distancia de frenado del vehículo (de entre 40 y 80m para velocidades comprendidas entre 50 y 100 km/h). Como aun así la luminancia necesaria es muy alta y supone un consumo importante de energía, se puede intentar rebajarla aplicando medidas especiales.

La primera de esas medidas es rebajar el límite de velocidad en el túnel y hacer que los vehículos usen sus propias luces. De esta manera se facilita el proceso de adaptación y se reduce la distancia de frenado y, por tanto, la longitud de la zona de umbral. Asimismo, conviene emplear materiales no reflectantes oscuros en calzada y fachadas en la zona de acceso para rebajar la luminosidad y otros claros con propiedades reflectantes de la zona de umbral para maximizarla. También es conveniente evitar que la luz directa del sol actúe como fondo de la entrada del túnel. A tal efecto, conviene cuidar la orientación geográfica, maximizar el tamaño de la entrada, plantar árboles y arbustos que den sombra sobre la calzada, usar paralúmenes, etc. En estos últimos casos hay que tener cuidado en regiones frías porque en invierno pueden favorecer la aparición de hielo en la calzada, además de otros problemas. Por último, es posible

crear una zona iluminada con faroles antes de la entrada para favorecer la orientación visual y atraer la mirada del conductor hacia el túnel.

### Zona de transición

Como al llegar al final de la zona de umbral el nivel de luminancia es todavía demasiado alto, se impone la necesidad de reducirlo hasta los niveles de la zona central. Para evitar los problemas de adaptación esta disminución se efectúa de forma gradual según un gradiente de reducción o, en su defecto, una curva escalonada con relaciones de 3 a 1 entre luminancias. Estas curvas, obtenidas empíricamente, dependen de la velocidad de los vehículos y de la diferencia entre las luminancias de las zonas umbral e interior.

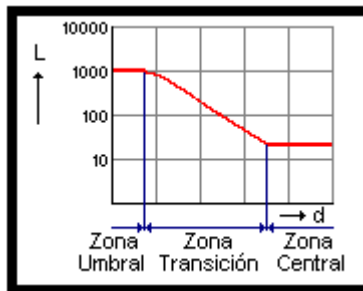


Figura N.º 10. Curva de reducción de la luminancia

Fuente: Recursos Citcea

### Zona central

En la sección central de los túneles el nivel de luminancia se mantiene constante en valores bajos de entre 5 y 20 cd/m<sup>2</sup> según la velocidad máxima permitida y la densidad de tráfico existente. Es conveniente, además, que las paredes tengan una luminancia por lo menos igual a la de la calzada para mejorar la iluminación en el interior del túnel.

## Zona de salida

En la salida las condiciones de iluminación son menos críticas pues la visión se adapta muy de prisa al pasar de ambientes oscuros a claros. Los vehículos u otros obstáculos se distinguen con facilidad porque sus siluetas se recortan claramente sobre el fondo luminoso que forma la salida. Esto se acentúa, además, si las paredes tienen una reflectancia alta. En estas condiciones, la iluminación sirve más como referencia y basta, en la mayoría de los casos, con unos 20 cd/m<sup>2</sup> para obtener buenos resultados.

## LED en túneles

La tecnología LED aporta muchas novedades frente a las tradicionales para la inmensa mayoría de las aplicaciones en iluminación y no es diferente para el servicio en túneles. Su gran competidor para completar los sistemas de iluminación en túneles son las lámparas de vapor de sodio de alta presión, muy empleadas en túneles tradicionalmente; sin embargo, los diodos para la emisión de luz presentan mejoras sustanciales.

Las tres grandes diferencias entre las lámparas de VSAP y las LED son:

- Temperatura del color.
- Mantenimiento de la instalación.
- Control y regulación.



*Figura N.º 11. Comparación entre LED y vapor de sodio de alta presión*

*Fuente. FENERCOM*

### **Illuminación nocturna**

En ausencia de luz diurna, iluminar un túnel resulta mucho más sencillo. Basta con reducir el nivel de luminancia en el interior del túnel hasta el valor de la iluminación de la carretera en la que se encuentra, o, si esta no está iluminada, que la relación entre las luminancias interior y exterior no pase de 3 a 1 para evitar problemas de adaptación. En este último caso se recomienda un valor aproximado de entre 2 y 5 cd/m<sup>2</sup>. Hay que tener en cuenta que aunque no se presente el efecto del agujero negro en la entrada sí se puede dar en la salida. Por ello es recomendable iluminar la carretera a partir de la salida durante un mínimo de 200 m para ayudar a la adaptación visual.

## Luminancias de velo

La percepción de los objetos está relacionada con su luminancia. Si la seguridad vial requiere la apreciación y diferenciación de paredes del túnel, del fondo, de la calzada y de los objetos que pueden aparecer de manera inesperada, cada uno de ellos debe presentar una luminancia diferente. Se denomina luminancia del velo floveal (o de Fry) a la luz parásita que queda en el ojo del conductor; luminancia del parabrisas a la luz que los fenómenos de reflexión sobre su superficie permiten observar, y luminancia atmosférica a la que en el momento considerado permite el estado del entorno de transmisión de la luz.

## Equipos de alumbrado

Las lámparas utilizadas en los túneles se caracterizan por una elevada eficiencia luminosa y larga vida útil. Por ello se utilizan lámparas fluorescentes o de vapor de sodio a baja presión dispuestas en filas continuas en paredes o techos. En la entrada, en donde los requerimientos luminosos son mayores se instalan lámparas de halogenuros metálicos o de vapor de sodio a alta presión.

En el caso de las luminarias, estas deben ser robustas, herméticas, resistentes a las agresiones de los gases de escape y de los productos de limpieza. Además, son de fácil instalación, acceso y mantenimiento. Debido a los gases de escape y partículas en suspensión es conveniente una limpieza periódica. Este momento se puede aprovechar para sustituir las lámparas fundidas aunque conviene también establecer un plan de sustitución periódica de todas las lámparas a la vez, según el ciclo de vida de ellas para garantizar un nivel de iluminación óptimo.

La distribución de las luminarias es muy importante; ha de garantizar una distribución uniforme de la luz sobre la calzada, el control del deslumbramiento, el nivel de luminancia, etc. Pero, además, los túneles presentan dos dificultades añadidas: el efecto cebra y el efecto del parpadeo o *flicker*. El efecto cebra se

produce por la aparición sucesiva de zonas claras y oscuras ante el conductor, que puede llegar a sentir una sensación de molestia e incluso mareo debido a una baja uniformidad de las luminancias en el túnel. El efecto de parpadeo o *flicker* se produce por cambios periódicos de los niveles de luminancia (unos reflejos, unas lámparas) en el campo visual según unas frecuencias críticas (de entre 2,5 y 15 ciclos/segundo), que provocan incomodidad y mareos lo cual se evita colocando los aparatos en filas continuas o con una separación adecuada.

Como las condiciones de iluminación en el exterior varían con la climatología y con las horas del día es conveniente instalar un sistema de regulación automática de la iluminación interior. Esta se hace gradualmente, con variaciones entre los estados inicial y finales inferiores a 3 a 1. Para simplificar, se distingue entre tres niveles de iluminación: diurno, nocturno y crepuscular para los días nublados.

Es necesario disponer también de un sistema de alumbrado de emergencia que garantice unos niveles mínimos de iluminación en caso de apagón. En este sentido hay que garantizar por lo menos el funcionamiento de una de cada tres luminarias.

## Mantenimiento

Para mantener en buenas condiciones el sistema de iluminación del túnel y conservar unos niveles óptimos es necesario realizar una serie de operaciones periódicamente, como la sustitución de las lámparas o la limpieza de las luminarias, paredes y calzada. Además se debe contar con un sistema de ventilación eficaz que evacue los humos, gases de escape y partículas en suspensión que dispersan la luz. Asimismo, para maximizar la iluminación en el interior del túnel conviene que el techo, las paredes y la calzada sean de materiales con alta reflectancia, pero sin brillos, fáciles de limpiar y resistentes a los maltratos.

## Requerimientos de un proyecto de iluminación en túneles

Para elaborar un proyecto de iluminación de un túnel deben registrarse con claridad los siguientes parámetros:

- Sección y longitud del túnel.
- Orientación.
- Velocidad.
- Intensidad del tráfico: por hora y carril. En caso de tener registro de IMD se estima en 1/8 de este valor por carril de circulación.
- Tipo de circulación: uno o dos sentidos.
- Análisis de las bocas de entrada: % de cielo, calzada, roca, praderas.
- Tipo de asfalto empleado (clase R3, normalmente): tipo de paredes y techo con sus valores de reflexividad calculados a nivel de proyecto.
- Condiciones meteorológicas de la zona: para la elección de la calzada en húmedo o seco.
- Sistema de iluminación previsto: simétrico o a contraflujo.

Con estos parámetros definidos las diferentes normas indican diferentes métodos de cálculo de la luminancia en el interior del túnel (zonas: umbral, transición, interior y salida). (2015, Fenercom)

## Caracterización de túneles cortos

Los túneles cortos son aquellos en los que se puede contar con la luz solar diurna para que su penetración contribuya, parcial o completamente, a la iluminación del túnel.

Los de menor longitud se estudian por debajo del parámetro de 25 metros de longitud. Estos no requieren sistemas de iluminación diurnos y en ellos suele ser visible la salida desde una distancia a la boca de entrada igual a la distancia de frenado (DS). Para otras longitudes de túneles se diseñan sistemas de iluminación diurnos que pueden estar en servicio durante todas las horas del día (alumbrado completo), algunas de ellas parcialmente (alumbrado limitado) o responder a exigencias

equivalentes en iluminación a la de los túneles largos.

### Caracterización de los túneles largos

En los túneles largos el conductor tarda en apreciar la luz a través del túnel. No puede observarla una vez superada la zona umbral de entrada. Una vez clasificado como largo el túnel se diferencia en clases en función de tres grandes grupos:

- Confort o comodidad visual.
- Configuración del guiado visual.
- El tráfico.

### Estudio en función del tráfico

Acometer el estudio de iluminación en túneles largos en función del tráfico permite realizar un análisis según las siguientes variables:

- Cantidad del tráfico.
- Intensidad del tráfico rodado.
- Velocidad de circulación vial.
- Calidad del tráfico.

### Estudio en función de la cantidad de tráfico

El aumento de la luminancia en el túnel puede paliar, en parte, la relación exponencial entre la intensidad del tráfico y el riesgo de accidente vial. Por lo general la primera variable afectada es la distancia de seguridad. El caso es similar al del aumento de la velocidad del tráfico fluido con menor intensidad, porque afecta de la misma manera a la distancia de seguridad. Cabe actuar sobre una mejora del periodo de percepción y eso se consigue aumentando la iluminancia de la zona del túnel afectada.

Se definen pesos o factores de ponderación según la intensidad del tráfico en número de vehículos por hora, medido en cada carril [nº de vehículos/h. carril]. Se diferencia entre uno y dos sentidos del tráfico en la misma dirección.

Pesos en función de la cantidad de tráfico		
Un sentido	Dos sentidos	Peso
Intensidad		
<60	<30	0
60-100	30-60	1
100-180	60-100	2
180-350	100-180	3
350-650	180-350	4
650-1.200	350-650	5
>1.200	650-1.200	6
	>1.200	7

*Cuadro N.º 1. Pesos en función de la cantidad de tráfico*

*Fuente: Guía de iluminación en túneles e infraestructuras subterráneas*

## Estudio en función de la calidad del tráfico

La heterogeneidad del tráfico afecta la conducción y su seguridad. La presencia relativa de camiones, motocicletas, autobuses y coches de diferentes pesos y características de diseño (berlinas, monovolúmenes, todo-caminos, todoterrenos, deportivos, etc.) aconseja introducir en el análisis de iluminación del túnel diferentes pesos, según la tabla adjunta. Se debe tener en cuenta, además, la posible presencia (o no, en caso de estar prohibido en la vía o el túnel) de vehículos de transporte de mercancías peligrosas.

Mayor heterogeneidad significa mayor dificultad visual y menor seguridad vial. Es importante valorar la gravedad de posibles accidentes, que alcanza su mayor potencial cuando en la variedad del tráfico

se incluye mezcla de vehículos motorizados con no motorizados, por ejemplo vehículos pesados con bicicletas. Las diferencias entre pesos máximos y mínimos de los vehículos en el tráfico mixto (camiones o autobuses con motocicletas) o la presencia del elemento más débil del tráfico vial, el peatón, conducen, del mismo modo, a condiciones extremas de aplicación de estos pesos.

Pesos en función de la calidad del tráfico	
Tráfico motorizado	0
Tráfico motorizado (pesados >15%)	1
Tráfico mixto	2
Tráfico mixto (presencia no motorizados) *	3

*Tabla N.º 3. Pesos en función de la calidad del tráfico*

*Fuente: Guía de iluminación en túneles e infraestructuras subterráneas*

### Estudio en función de la configuración del guiado visual

La percepción que del túnel tenga el conductor es la clave de su conducción guiada dentro de este. Para facilitar la correcta orientación del vehículo es una buena práctica de diseño guiar por contrastes longitudinales paralelos al eje mayor de la vía enterrada. Un techo oscuro y unas paredes claras pueden ser una solución correcta.

Esta variable de diseño goza de mayor importancia cuanto más baja es la baliza en altura del túnel y en los momentos de aproximación del vehículo al túnel.

Un guiado visual bien diseñado supone un menor esfuerzo de diseño y gasto energético y de material en iluminación. La comparación de pesos sugiere un peso de valor 2 relativo al peso cero que se asocia con un buen guiado longitudinal.

No solo es importante la mejora de la percepción del camino correcto en el túnel (eje longitudinal) sino también que en el paso por él resulten claramente apreciables y diferenciables las señales verticales y horizontales.

Entre los instrumentos de guiado visual empleados en los túneles se encuentran los hitos, captar-faros, catadióptricos, reflectantes, etcétera. En las clases de mayor exigencia lumínica aparecerán señales horizontales en el suelo (por ejemplo retro-reflectantes), que también pueden disponerse en las paredes.

Pesos según guiado visual	
Guiado	Peso
Bueno	0
Pobre	2

*Tabla N.º 4. Pesos según el guiado visual*  
*Fuente: Guía de iluminación en túneles e infraestructuras subterráneas*

### Estudio en función del confort en la conducción

En un túnel bien iluminado el conductor no tiene que realizar ningún esfuerzo para adaptar su conducción a la vía con luz natural.

Se trata de una meta difícil de alcanzar, pero los pesos en este apartado se otorgan según la clasificación de los túneles en función del confort visual del diseño requerido por el conductor.

Pesos en función de la comodidad en la conducción	
Confort requerido	Peso
Bajo	0
Medio	2
Alto	4

*Tabla N.º 5. Pesos en función de la comodidad en la conducción*  
*Fuente: Guía de iluminación en túneles e infraestructuras subterráneas*

### Clasificación de túneles largos según sus exigencias de iluminación

Las clases de túneles en función de sus exigencias de alumbrado se consiguen otorgando un peso a cada una de ellas y ordenándolas según este número, que se obtiene de la suma aritmética directa de

los pesos definidos para el confort requerido en el campo visual, la cantidad, su calidad y el guiado visual. Se obtiene la siguiente relación:

Clase de túneles largos por requerimientos de iluminación	
$P_I+P_T+P_G+P_c$	Clase
0 a 3	1
4 a 5	2
6 a 7	3
8 a 9	4
10 a 11	5
12 a 13	6
14 a 15	7

*Tabla N.º 6. Clase de túneles largos por requerimientos de iluminación.*

*Fuente: Guía de iluminación en túneles e infraestructuras subterráneas*

## Reglas de cálculo

En el anejo de cálculo luminotécnico<sup>8</sup> de un proyecto de iluminación se deben incluir los cálculos correspondientes a la determinación de los parámetros luminotécnicos necesarios según las publicaciones 189:2010 y 140:2000 de la CIE, que son los siguientes:

- Luminancia de la superficie de la calzada.
- Iluminancia de la superficie de la calzada.
- Luminancia de pared  $L_W$  en ambas paredes (hasta una altura de 2 m).
- Iluminancia de pared  $E_W$  (vector normal al plano de la superficie de la pared) en ambas paredes.
- Iluminancia vertical  $E_V$  (vector normal del plano de evaluación vertical paralelo al eje longitudinal de la calzada y dirigido hacia el conductor) a una altura de 10 cm. sobre la superficie de la calzada.

Los cálculos de luminancias pueden dividirse en dos:

- Luminancia media en calzada y paredes; entiéndase en las zonas con nivel constante: primera parte de la zona umbral y zona interior.
- Media transversal de la luminancia en calzada y de las paredes en cada eje de cálculo transversal en las zonas con nivel variable: segunda parte de la zona umbral, zona de transición y zona de salida.

Para la depuración esperada de cálculos no existen datos suficientes de reflexión para dos direcciones para las superficies que componen el túnel. Se dispone de los datos de reflexión de la calzada en una dirección derivada de un grado por debajo de la horizontal, y para las paredes apenas se conocen datos aislados para la elaboración de tablas de referencia con alto nivel de resolución y fiabilidad.

No hay tablas normativas para las reflexiones bi-direccionales ni están estandarizados los cálculos de luminancia de paredes e inter-reflexiones en estas. La mayoría de los cálculos evaluados que se han estimado en la elaboración de proyectos no resultan realistas una vez puesto en servicio el sistema. Comparado este con la luminancia procedente de las luminarias, las inter-reflexiones de calzada y paredes resultan de varios órdenes de magnitud menor, y así se descarta el valor crítico de estas variables. Aunque pudiera haber casos en los que se supusiera un ahorro destacable, no es el caso general de las instalaciones que se realizan en la actualidad. Tal vez cuando los cálculos se depuren se termine adaptando la infraestructura a sus efectos con el fin de un máximo ahorro y eficiencia.

### Uniformidad longitudinal en la zona de transición

La publicación CIE 140-2000 da lugar a un concepto formal de uniformidad longitudinal; sin embargo, esta solo resulta aplicable en secciones con valores de luminancia constantes en la dirección de conducción, como en la primera parte de la zona de umbral y en la zona interior. En estas zonas, la uniformidad de luminancia longitudinal es calculada como en carreteras a cielo

abierto, de acuerdo con la citada publicación. El cálculo de la uniformidad longitudinal en las zonas con luminancia variable no es significativo. Esto ocurre en la segunda parte de la zona umbral y en la de transición, en donde la iluminancia depende de la distancia desde la boca de entrada hasta alcanzarlas.

### Método L20

La luminancia L20 en la zona de acceso es definida como la media de valores de luminancia medidos en campo de visión cónico, que subtiende un ángulo de  $20^\circ$  ( $2 \times 10^\circ$ ) por un observador situado en el punto de referencia, mirando hacia un punto centrado a una altura igual a una cuarta parte de la altura de la abertura del túnel. (2004, CIE)

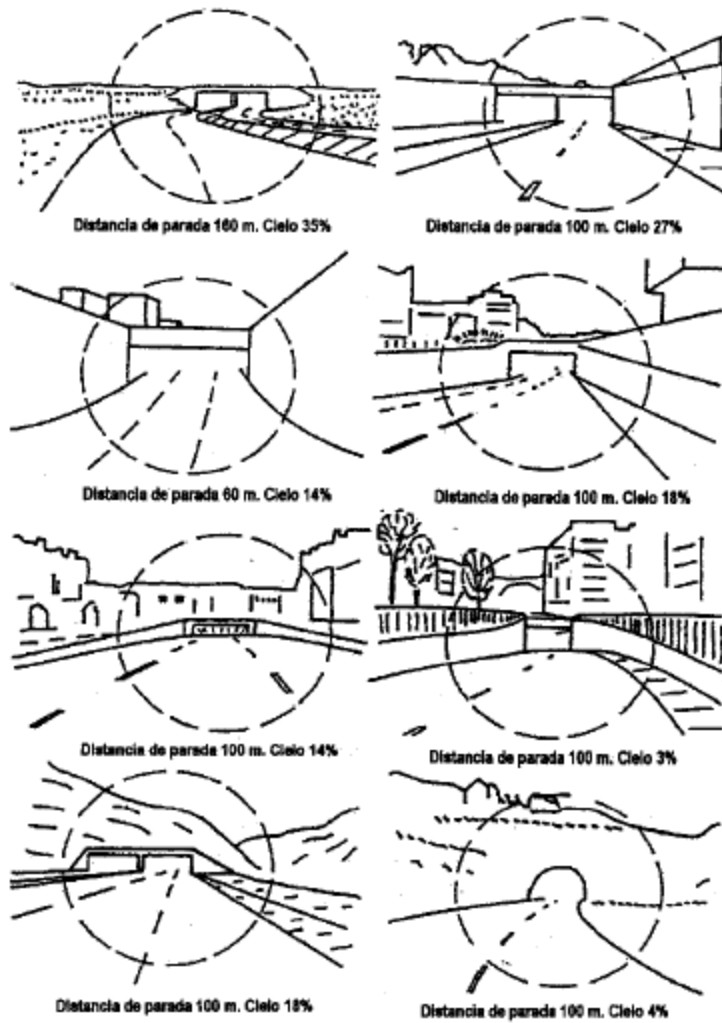


Figura N.º 12. Porcentajes de cielo para diferentes configuraciones

Fuente: CIE\_2004

### Cálculo del incremento de umbral

El cálculo desde la luminaria más próxima situada a 20° sobre el observador a la posición del punto para la luminancia de calzada a 60 metros resulta difícilmente aplicable; esto por falta de longitud suficiente en la zona umbral y en la de transición. Se calcula el incremento de umbral en esas zonas. Este debe realizarse desde cada punto de observación longitudinal de la cuadrícula de

cálculo para un observador en movimiento.

En las zonas con luminancia constante a lo largo del tramo se aplican los mismos cálculos que en las vías a cielo abierto.

## VAN y TIR

El valor actual neto, también conocido como valor actualizado neto o valor presente neto (en inglés *net present value*), cuyo acrónimo es VAN (en inglés, NPV), es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. La metodología consiste en descontar al momento actual (es decir, actualizar mediante una tasa) todos los flujos de caja (en inglés *cash-flow*) futuros, o en determinar la equivalencia en el tiempo 0 de los flujos de efectivo futuros que genera un proyecto y comparar esta equivalencia con el desembolso inicial. Dicha tasa de actualización ( $k$ ) o de descuento ( $d$ ) es el resultado del producto entre el costo medio ponderado de capital (CMPC) y la tasa de inflación del periodo. Cuando dicha equivalencia es mayor que el desembolso inicial entonces es recomendable que el proyecto sea aceptado.

En las transacciones internacionales es necesario aplicar una tasa de inflación particular, tanto para las entradas (cobros) como para las salidas de flujos (pagos). La condición que maximiza el margen de los flujos es que la economía exportadora posea un IPC inferior a la importadora, y viceversa.

La fórmula que permite calcular el valor actual neto es:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1+k)} + \frac{F_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+k)^n}$$

Donde:

$VAN$  Valor actual neto

$F_t$  Son los flujos de dinero en cada periodo  $t$

$I_0$  Es la inversión realiza en el momento inicial ( $t = 0$ )

$n$  Es el número de periodos

$k$  Es el tipo de descuento o tipo de interés exigido a la inversión

Si el proyecto no tiene riesgo se tomará como referencia el tipo de la renta fija, de tal manera que con el VAN se estimará si la inversión es mejor que invertir en algo seguro, sin riesgo específico. En otros casos se utilizará el costo de oportunidad.

## Capítulo III: Marco metodológico

### Enfoque de la investigación

El método deductivo infiere los hechos observados con base en la ley general (a diferencia del inductivo, en el cual se formulan leyes a partir de hechos observados).

La metodología cualitativa, como lo indica su propia denominación, tiene como objetivo la descripción de las cualidades de un fenómeno. En investigaciones cualitativas se debe hablar de entendimiento en profundidad en lugar de exactitud, pues se trata de obtener un entendimiento lo más profundo posible.

La metodología cuantitativa es aquella que permite examinar los datos de manera numérica, especialmente en el campo de la estadística.

El presente estudio se considera deductivo, ya que en él se deben seguir las normas presentes. También es un estudio cualitativo y cuantitativo debido a que se deben seleccionar las mejores características de los equipos y proponer diferentes números y porcentajes para desarrollar un buen diseño. Por lo tanto, tiene una metodología mixta.

### Método de la investigación

Para esta investigación se realizará un análisis de normas que se puedan adecuar a las necesidades que se tengan, esto debido a la falta de normas de iluminación de túneles en el país, después de una escogencia de una norma para ser usada en el proyecto.

Después de la escogencia de una norma se hará una escogencia de luminarias de diseño según las características que se requieran y según la norma que se escogió anteriormente; además, las luminarias

electas tendrán que cumplir con grados de hermeticidad y resistencias al impacto específicos. Seguidamente se realizará un diseño con luminarias de diferentes tecnologías para después escoger el diseño que mejor se adecue a las necesidades. Para ello no solo se tomarán en cuenta los costos sino también las especificaciones técnicas y otros puntos importantes que pudieran surgir durante la investigación.

### Fuentes de información

Para realizar el presente estudio se consultarán distintas fuentes de información, entre ellas normas de iluminación. También se recabará información de empresas particulares y se recabarán datos de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz), de internet y en general de documentos sobre iluminación de túneles.

De las normas sobre iluminación mencionadas anteriormente se usará la de IESA, la cual es extranjera. Esto por no contarse en el país con este tipo de normas, las de iluminación de túneles.

### Variables o unidades de análisis

En este proyecto se contemplan varias variables que son de suma importancia para la decisión final de escogencia de tecnología lumínica, las cuales serían los niveles de iluminación resultantes de cada diseño, características propias de cada tecnología o luminaria, costos y, además de esto, tiempo que pudiesen seguir en el mercado dichas tecnologías.

### Instrumentos

Para la elaboración del proyecto se utilizarán herramientas de recopilación de datos tales como entrevistas a personal de empresas de iluminación y a personal de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz, lo mismo que mediante Internet, correo electrónico, estudios anteriores, luxómetros para tomar medidas de luz actuales y programas de simulación de iluminación.

## Proceso para la recolección y el análisis de datos

Para la recolección de datos se leerán normas de iluminación y se interpretarán sus requerimientos para aplicarlas en el país. También se harán entrevistas y simulaciones de iluminación como apoyo para la comparación de las diferentes tecnologías, y posteriormente se hará la escogencia o descarte de cualquiera de las tecnologías.

## Capítulo IV: Análisis de resultados

### Escogencia de norma

En primera instancia se hizo un análisis para encontrar alguna norma de iluminación que se ajustara a los requerimientos de iluminación en un túnel. En ausencia de dicha norma se decidió usar la norma IESNA, la cual es extranjera pero se tratará de ajustarla a los requerimientos del país y a las condiciones especiales del túnel Zurquí (se trata de tropicalizar la norma).

Se escogió esta norma de acuerdo con entrevistas que se incluyen en apéndices que suministraron funcionarios de la CNFL, por experiencia propia en el área de iluminación y por mayor entendimiento de dicha norma.

### Factores importantes de la norma IESNA

Como se mencionó anteriormente, se usará la norma IESNA para establecer los parámetros de iluminación que se usarán en los diseños que se realizarán con las luminarias seleccionadas.

Todos los puntos que se mencionarán a continuación se encuentran en la norma IESNA, en el apartado 3.4 acerca de túneles.

El túnel del que se realiza el diseño mide alrededor de 597,5 m de largo. Por lo tanto, según la norma se considera que es largo, ya que desde la entrada no es posible ver la salida. Lo siguiente que se menciona en la norma es la necesidad de establecer una velocidad de diseño para futuros cálculos. La velocidad permitida en el túnel Zurquí es de 40 km/h, pero se sabe que en algunos casos los conductores transitan a mayores velocidades, por lo cual la velocidad que se usará será de 80 km/h; esto para que el diseño quede en condiciones un poco más extremas y pueda adaptarse a cualquier velocidad de tránsito.

Lo siguiente es establecer la distancia de visión de parada segura o, como se menciona en la norma, el “safe stopping sight distance“ (SSSD), para lo cual se usa la siguiente tabla:

Traffic Speed		Minimum Safe Stopping Sight Distance (SSSD)†	
Kilometers per Hour	Miles Per Hour	Meters	Feet
48	30	60	200
64	40	90	300
80	50	140	450
88	55	165	540
96	60	200	650
104	65	220	720

*Tabla N.º 7. Tabla de SSSD*

*Fuente: Norma IESNA*

Según la tabla que indica la norma, a una velocidad de 80 km/h se tiene una SSSD de 140 m.

El túnel se encuentra dentro de la categoría de túnel largo por lo cual se divide en varias zonas de cálculo diferentes. La primera es la Threshold o zona umbral, que corresponde a la zona de entrada del túnel, la siguiente es la zona de transición, que se dividirá en dos partes iguales y, por último, está la zona interna. Como el túnel es bidireccional se llega a la zona interna y se sigue por transición y umbral, respectivamente, hasta la salida del túnel. Por medio de la norma se van a definir las distancias correspondientes a estas zonas.

Según la norma, la Threshold o zona umbral corresponde a 15 metros menos que la SSSD, por lo que si la SSSD es de 140 m, la zona umbral sería de 125 m.

La norma no menciona nada sobre la distancia que se debería tomar para la zona de transición y por eso se considera que una distancia para una buena adaptación del ojo a la luminosidad antes de la llegada a la zona interior es de unos 80 m, los cuales se parten a la mitad, y se obtienen dos zonas de transición antes

de la llegada a la interior, para reducir la luminosidad de manera más suave y para que la adaptación sea más fácil.

Ahora, si ya se tienen los valores de distancia de zona de Threshold o umbral y las de transición, se puede establecer el sobrante como la zona interior del túnel.

Es importante recordar que hay dos zonas de umbral y dos zonas de transición que a su vez se dividen en dos más de transición cada una; por lo tanto, si se tienen dos zonas umbral de 125 m cada una y dos zonas de transición de 80m cada una, se tiene un equivalente en distancia a 410 m. Ahora que se tiene la distancia equivalente de estas zonas se le restan a la distancia total del túnel, que es de 597,5 m, y se obtienen 187,5 m de zona interior.

La norma exige un valor en candelas por metro cuadrado ( $cd/m^2$ ) según la velocidad del diseño y el tráfico en la zona. Para esto se hará uso del documento emitido por el MOPT con nombre de “Anuario de Información de Tránsito 2017”, el cual indicará la cantidad de tránsito por zona del túnel Zurquí.

RUTA	SECCION	TRAMO	ESTACION	UBICACION
22	10870	BRASIL,SANTA ANA(R.27)-LTE CANT.SANTA ANA/MORA(QUEB.MUERTE)	662	ENTRADA A CIUDAD COLÓN, RÍO PACACUA
23	60610	BARRANCA(R.1)-BOCA RIO BARRANCA (RÍO BARRANCA)(LIMITE CANTONAL)	781	CEMENTERIO DEL ROBLE
23	60840	BOCA DE BARRANCA (RÍO BARRANCA)(LTE CANTONAL) - PUERTO CALDERA (CASETA ENTRADA MUELLE)	782	PLAZA DE CALDERA
32	19011	BARRIO TOURNON S/FCO GOICOECHEA (R. 108) - LLORENTE (QUEB. RIVERA)(LTE. CANTONAL)	0	DEBAJO DEL PUENTE SOBRE LA R.100
32	19012	LLORENTE (QUEB. RIVERA)(LTE. CANTONAL) - SAN JUAN DE TIBAS (RÍO VIRILLA)(LTE PROV)	173	100 M DESPUÉS DEL PASO ELEVADO DE LA R.101 A LLORENTE
32	40500	SAN JUAN DE TIBAS (RÍO VIRILLA)(LTE PROV) - CALLE YERBA BUENA (LTE. CANT)	174	PUENTE RÍO VIRILLA (0+200 M DESPUÉS DEL PASO ELEVADO R.102)
32	40550	CALLE YERBABUENA (LTE CANT) - STA ELENA (LTE PROV)(R PARA BLANCO)	174	PUENTE RÍO VIRILLA (0+200 M DESPUÉS DEL PASO ELEVADO R.102)
32	10950	STA ELENA (LTE PROV)(R. PARA BLANCO) - RIO ZURQUI (LTE. CANT)	14	SANTA ELENA DE SAN ISIDRO
32	10990	RIO ZURQUI (LTE. CANTONAL) - CARRILLO (RIO SUCIO)(LTE PROVINCIAL)	14	SANTA ELENA DE SAN ISIDRO
32	70160	LTE PROVINCIAL (RÍO SUCIO) -LA Y GRIEGA(R.4)	14	SANTA ELENA DE SAN ISIDRO
32	70150	LA Y GRIEGA(R.4)-GUÁPILES(R.247)(CALLE EMILIA)	0	300 M DESPUÉS DEL CRUCE A LA R.4
32	70150	LA Y GRIEGA(R.4)-GUÁPILES(R.247)(CALLE EMILIA)	328	1 KM DESPUÉS DEL INICIO DE LA R.4, PUENTE RÍO CORINTO
32	70490	GUÁPILES(R.247)(CALLE EMILIA)-JIMENEZ (RÍO JIMENEZ)(LTE CANTONAL)	753	RÍO FOX HALL
32	70142	JIMENEZ (RÍO JIMENEZ)(LTE CANTONAL)- GUÁCIMO(R.248)	753	RÍO FOX HALL
32	70141	GUÁCIMO(R.248)-POCORA(RÍO DESTIERRO)(LTE CANTONAL)	703	SALIDA DE GUÁCIMO A SIQUIRRES, RÍO GUÁCIMO

Cuadro N.º 2. Estaciones temporales

Fuente: MOPT

Como se puede apreciar, este cuadro indica la sección en donde se puede localizar el número de vehículos que transitan por dicha zona. Por ello se usa un segundo cuadro del mismo documento en el que se encuentra este dato.

RUTA	SECCION	ESTACION	AÑO	TPD	LIVIANO	CAR_LIV	BUS	C2E	C3E	C4E	C5E	C6E
21	60761	245	2015	2717	62,25	25,91	1,46	8,07	1,4	0,06	0,36	0,49
21	60762	246	2015	1289	58,06	30,28	3,8	7,08	0,52	0,26	0	0
21	60780	0	2015	851	54,56	31,15	4,37	8,93	0,2	0,79	0	0
21	60780	0	2006	206	49,29	38,03	2,82	9,86	0	0	0	0
22	10870	0	2015	14628	74,68	16,42	2,07	5,04	0,97	0,44	0,28	0,1
22	10870	662	2015	19496	80,87	12	2,9	3,32	0,54	0,25	0,1	0,02
23	60610	781	2015	19794	56,45	16,22	0,99	8,22	1,36	3,73	6,26	6,77
23	60840	782	2015	10708	53,61	22,41	4,05	6,48	1,57	0,2	8,14	3,54
32	19011	0	2017	35483	73,99	14,3	1,99	3,84	1,08	0,1	4,7	0
32	19012	173	2015	36768	78,17	11,16	2,83	2,55	0,74	0,45	2,16	1,94
32	40500	174	2015	33711	75,6	12,34	3,12	2,9	0,7	0,47	2,67	2,2
32	40550	174	2015	33711	75,6	12,34	3,12	2,9	0,7	0,47	2,67	2,2
32	10950	14	2015	13173	53,03	18,6	3,28	6,29	1,84	1,33	8,49	7,14
32	10990	14	2015	13173	53,03	18,6	3,28	6,29	1,84	1,33	8,49	7,14
32	70160	14	2015	13173	53,03	18,6	3,28	6,29	1,84	1,33	8,49	7,14
32	70150	0	2007	10304	42,75	19,15	4,73	10,31	4,14	0	18,92	0
32	70150	328	2015	11890	50,17	21,41	2,24	7,78	2,38	0,9	8,35	6,77
32	70490	753	2015	14073	54,04	21,36	1,84	10,48	1,2	0,77	6,65	3,66
32	70142	753	2015	14073	54,04	21,36	1,84	10,48	1,2	0,77	6,65	3,66
32	70141	703	2015	11943	49,84	20,22	2,76	11,09	1,66	0,29	9	5,14
32	70141	0	2010	8472	41,88	19,55	4,21	8,03	3,29	0	23,04	0
32	70130	0	2015	12506	52,55	27,19	1,73	6,01	2,74	0,2	4,82	4,76
32	70090	0	2015	8946	49,69	17,17	2,98	8,01	1,88	0,9	11,98	7,39
32	70472	0	2015	8911	42,68	18,11	2,8	6,66	2,83	0,51	14,34	12,07
32	70472	0	2007	6791	34,77	19,78	3,07	8,72	2,57	0	31,09	0
32	70471	247	2013	8135	43,84	19,52	3,71	8,31	2,61	0	22,01	0
32	70471	13	2015	9448	49,98	13,67	1,83	5,64	2,02	1,02	14,18	11,66

Cuadro N.º 3. Estaciones temporales

Fuente: MOPT

Se tiene un valor de 13 173 vehículos por día. Con este valor se vuelve a la norma IESNA, que muestra un valor en candelas por metro cuadrado y que surge de los valores mencionados anteriormente.

Characteristics of Tunnel	Traffic Speed		Traffic Volume AADT*			
	Kilometers per Hour	Miles per Hour	< 25,000	25–89,999	90–150,000	> 150,000
Mountain tunnels, gradual slopes where snow can accumulate or river tunnels with few surrounding buildings. East/west tunnel orientation	≥ 81	50	210	250	290	330
	61–80	38–49	180	220	260	300
	≤ 60	37	140	185	230	270
Mountain tunnels with steep, dark slopes or climate conditions where snow cannot accumulate. Portal surroundings have medium brightness year round.	≥ 81	50	145	175	205	235
	61–80	38–49	130	160	190	220
	≤ 60	37	105	140	170	200
Concealed portals, dark surfaces, or buildings surrounding entrance. Artificial measures taken to reduce exterior brightnesses. North/south orientation.	≥ 81	50	80	100	115	130
	61–80	38–49	70	90	105	120
	≤ 60	37	60	80	95	110

Cuadro N.º 4. Valor de candelas en Threshold

Fuente: Norma IESNA

Como se obtiene un valor menor de 25 000 vehículos se tiene un valor de  $130 \text{ cd/m}^2$  para la zona de Threshold o zona umbral, que es la zona de la entrada al túnel. A partir de esta zona se obtienen los valores de las zonas siguientes.

Según la norma IESNA, el valor de la siguiente zona después de la zona umbral corresponde a la zona de transición, y la norma dicta que no debe ser menor de 25% del valor de luminosidad que se tiene en la zona umbral; por lo tanto, de  $130 \text{ cd/m}^2 \times 25\%$  se obtiene un valor de  $32.5 \text{ cd/m}^2$  para la primera zona de transición o zona de transición N.º 1.


Para la zona de transición N.º 2 la norma menciona que no debe ser menor de 33% de valor de la zona de transición N.º 1, por lo que se procede a multiplicar  $32.5 \text{ cd/m}^2 \times 33\%$  lo cual genera un valor de  $10,725 \text{ cd/m}^2$  para la zona de transición N.º 2.

Ahora, para la zona interior la norma da un valor no mayor a  $5 \text{ cd/m}^2$ , esto debido a que es la zona más oscura del túnel y después de ella vienen de nuevo las zonas de transición y, por consiguiente, la zona umbral. Por lo tanto, el cambio debe ser lo más suave posible para que el conductor no perciba de manera brusca el cambio de luz.

Una vez establecidos todos los valores requeridos para el diseño se pasa a la escogencia de luminarias mediante la evaluación de ciertos criterios que se mencionarán más adelante.

### Situación actual del túnel Zurquí

En estos momentos la situación actual del túnel en niveles de iluminación resulta muy deficiente, porque son muy bajos según las medidas tomadas con el luxómetro (ver la figura N.º 13) en el túnel Zurquí, precisamente en la zona de Threshold o umbral, en donde se requiere más iluminación. El túnel en estos momentos tiene una cantidad de luz de  $74 \text{ cd/m}^2$ , lo que sugiere urgentemente una mejora. A continuación, se muestran las mediciones tomadas a distintas distancias, desde la entrada del túnel.



Distancia en metros	Nivel de $\text{cd/m}^2$
30	74
60	31
115	21,6
166	1,6

Figura N.º 13. Medidas tomadas con luxómetro en el túnel Zurquí

*Fuente propia*

### Sondeo de mercado para la escogencia de luminarias

Para realizar la escogencia de esta luminaria se van a tomar ciertos criterios que indiscutiblemente son de gran importancia para la selección adecuada; esto debido a la importancia de la ruta en donde se encuentra el túnel, en especial por las condiciones tan adversas que presenta el túnel Zurquí.

## Temperatura de color

Como primer punto se recomienda seleccionar una luminaria con una temperatura de color no mayor de 3500°K. Generalmente para un diseño de iluminación de túneles la norma IESNA no menciona ninguna temperatura de color. Mayormente, en túneles se encuentran temperaturas de color de 4000°K lo cual es muy normal. Se toma una temperatura mayor de 3500°K por la neblina que se presenta ahí. Esto debido a que cuanto más temperatura de color se tenga la luz será más blanca, lo que se podría reflejar en la neblina, que está formada por partículas de agua en el aire las cuales provocan un encandilamiento no deseado en los conductores. Por lo tanto, se solicita una temperatura más cálida, que en este caso es de un rango de entre 3000°K y 3500°K.

Se coloca ese rango porque arriba de los 3500° K provocará encandilamiento y por debajo de los 3000°K la eficiencia de la luminaria baja a niveles no deseados.

## Telegestión

Se define la telegestión como un punto de suma importancia ya que la comunicación con estos dispositivos se hace muy relevante en el momento del control de fallas. Ya que se realizará una inversión de tal magnitud se debe aprovechar y proporcionar la telegestión para poder monitorear y controlar las luminarias. Por lo tanto, la luminaria seleccionada deberá tener salida de telegestión.

## Dimerización

La dimerización puede parecer un factor poco importante si solo se plantea un diseño de iluminación para el día, pero el presente contempla que las luminarias operarán día y noche porque es para un túnel catalogado de largo según la norma IESNA. Por lo tanto, se deben bajar los niveles de iluminación durante la noche para no provocar efectos no deseados, como accidentes por encandilamiento o gastos innecesarios de luz y energía.

## Grado IP o de hermeticidad

El grado IP o de hermeticidad representa un valor muy importante para el diseño ya que se conocen las condiciones de extrema humedad en el túnel Zurquí. En los apéndices se podrán encontrar algunas fotografías que permiten tener una idea más clara de la cantidad de agua presente en el área de diseño. Por lo tanto, se tiene que asegurar que la luminaria y sus componentes internos siempre estén libres de toda humedad para su buen funcionamiento y desempeño.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, bajo las condiciones de diseño y según el estudio de mercado que se realizó se decide usar un grado de hermeticidad IP 66, el cual no permite la entrada de polvo bajo ninguna circunstancia, y tampoco debe entrar el agua arrojada a chorros (desde cualquier ángulo) por medio de una boquilla de 12,5 mm de diámetro; todo a un promedio de 100 litros por minuto y a una presión de 100 kN/m<sup>2</sup> durante no menos de 3 minutos, y a una distancia que no sea menor de 3 metros. Con esto se asegura la integridad del diseño y se sabe que el mercado ofrece dichos grados de hermeticidad.

## Grado IK o grado de impacto

El grado IK o de impacto es un punto importante debido al posible vandalismo que se puede presentar en un lugar como el túnel Zurquí, por lo cual, de acuerdo con diseños anteriores, experiencia en alumbrado público y estudios de mercado que permitan dicho nivel de impacto, se usará un grado IK 08 que equivale a una energía de 5 Joule. Esto es como el efecto de dejar caer una masa de 1.7 Kg de una altura de 29.5 cm a la parte más débil de la luminaria.

## Conectores

El diseño se hará con luminarias que tengan o se les puedan instalar conectores de alimentación de fácil conexión; esto debido a que el mantenimiento en un área tan hostil e incómoda se puede dificultar

debido a empalmes o conectores fijos; por lo tanto, la luminaria escogida deberá tener una fácil conexión y desconexión.

### Potencia, lúmenes y eficiencia de la luminaria

Con base en proyectos de túneles y entrevistas realizadas a personal de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz se recomiendan potencias de entre 350 W y 450 W, ya que potencias menores no serán capaces de suministrar un buen flujo luminoso, y potencias muy altas se salen del rango y podrán aportar más lúmenes, pero serán poco eficientes. Por ese motivo este rango de potencias se valora adecuado para un buen diseño. Así, además de la potencia se tiene que tener en cuenta que para alcanzar los valores dictados por la norma IESNA sin abusar del número de luminarias se debería tener una luminaria de entre 35000 y 45000 lúmenes. Además de esto, una eficiencia recomendable es la de 100 Lm/w

A continuación, se comparan ambas tecnologías para poder escoger la luminaria más adecuada para el diseño lo cual se hace con base en datos de SICOP. También se hace para información sobre los principales oferentes de luminarias de la CNFL. En la escogencia se prefirió a los principales influyentes en experiencia y tecnología, los cuales ofrecen luminarias con los últimos avances tecnológicos.

Debido a que algunas de las cotizaciones se hacen en euros, dólares o colones, se establecerá el tipo de cambio del viernes 5 de julio del 2019 para cada moneda a fin de trasladar todo a colones, y este tipo de cambio se usará en todos los cálculos económicos para no afectar y no confundir con montos diferentes en distintas monedas.

Tipo de cambio del dólar: 588 colones

Tipo de cambio del euro: 653 colones.

A continuación se presenta un cuadro con el detalle de las luminarias de unas de las mejores marcas y empresas que hay en Costa Rica.

**Cuadro con luminarias LED de selección**

Marca Luminaria	Schröder	Philips	Sylvania	Celsa
Familia	Omnistar	TunnelView	ULTRAFLAT LED	QUASARLED
Modelo	OMNISTAR 2259 Symmetrical 144 Cree XPL HD 1000mA NW Flat, Glass Extra Clear, Smooth, Flat, Glass Extra Clear, Smooth 35268S	FTU Tunnel Underpass - Large, 160 LED's, 3000K CCT, TYPE R2M OPTIC,	GC626d-LED200HT-5700M60/220	QUASARLED
Empresa representante en el país	CODELEC	Energys	Sylvania	CELSA
Temperatura de color (°K)	3000	3000	5700	3000
Tele gestión	✓	✓	✓	✓
Dimeable	✓	✓	✓	✓
Potencia (W)	461	351.5	200	278
Lúmenes L	48894	38408	18030	36128
Eficiencia Lm/w	106.1	109.3	90.2	129.95
Tecnología	LED	LED	LED	LED
Grado IP	66	66	66	66
Grado IK	08	08	08	9
Conectores	Fácil conexión	Fácil conexión	Fácil conexión	Fácil conexión
Precio unitario en colones	954188	933744	✗	✗
Aporta ficha técnica	✓	✓	✓	✓
Aporta fotometría de luminaria	✓	✓	✗	✗
Vida Útil	10 años	10 años	10 años	10 años

Cuadro N.º 5. Luminarias LED de selección

*Fuente propia.*

Como se puede apreciar en el cuadro comparativo anterior, las luminarias ofrecidas para zonas tan específicas como los túneles son muy similares entre sí. Son pocas las variaciones que se perciben en los mejores modelos de estas empresas. La mayoría de las luminarias cumplen con los requerimientos comentados anteriormente, por lo cual se descartarán por puntos específicos de incumplimiento o falta de información de parte del proveedor. A continuación se explican los puntos de descarte.

La ofrecida por Sylvania es una buena luminaria pero no será de utilidad para el proyecto debido a la baja potencia que ofrece. No se pueden obtener los niveles de iluminación requeridos por la norma IESNA. Además, se tienen que tomar en cuenta la alta temperatura de color que ofrecen, pues esto sería perjudicial por el problema de encandilamiento ya mencionado anteriormente. Otro factor determinante para su descarte es que no se proporcionó un precio en el tiempo establecido para la investigación, porque no fue posible cuantificar la inversión en luminarias.

Por otra parte, está la luminaria de CELSA que sin duda es una luminaria con alto flujo luminoso. Se tiene una buena eficiencia mayor a la de las luminarias de comparación, pero su descarte radica en que no se entregaron precio ni fichas fotométricas, por lo tanto el análisis económico y la parte de simulación no se podrían realizar, por lo tanto la luminaria de CELSA también será descartada para el análisis.

Por último se tienen las luminarias de Philips y Schreder, que sin duda son las mejores por sus altos flujos luminosos y eficiencia. Además, estas son muy parecidas en precio, por lo tanto se comparan ambas entre sí para escoger la más adecuada.

En cuanto a la selección de luminarias de sodio de alta presión, el proyecto se ve limitado a la escogencia de la luminaria Tunlite de Philips, ya que es la única luminaria con la que se cuenta en el archivo fotométrico y es indispensable para simulaciones y diseño de iluminación.

A continuación se muestra un cuadro de luminarias de sodio de alta presión de las cuales se logró conseguir información.

Marca Luminaria	Philips	Celsa
Familia	Tunlite	ALON
Modelo	Philips Tunlite CRX204 ROT 1xSON-TPP400W CON T3	Alon 400w Sodio de alta presión
Empresa representante en el país	Philips	Celsa
Temperatura de color (°K)	3000	3000
Tele gestión	X	X
Dimeable	X	X
Potencia (W)	430	400
Lúmenes L	56500	X
Eficiencia Lm/w	131,3953488	X
Tecnología	Sodio A/P	Sodio A/P
Grado IP	66	66
Grado IK	09	08
Conectores	Fácil conexión	Fácil conexión
Precio unitario en colones	544441	X
Aporta ficha técnica	X	✓
Aporta fotometría de luminaria	✓	X
Vida Útil	X	X

*Cuadro N.º 6. Luminarias VSAP de selección*

*Fuente propia*

## Análisis de la luminaria LED OMNIstar y la luminaria TunnelView de Philips

Para empezar el análisis se retomarán varios datos obtenidos del proyecto basado en la norma IESNA vista anteriormente.

Para empezar el análisis de cada zona en el simulador de iluminación es esencial el aporte de la fotometría de luminaria, el cual es un archivo tipo IES que contiene todos los datos de la luminaria para poder simularla. Este archivo lo proporciona el fabricante y siempre hay que verificarlo contra la ficha técnica para verificar que los datos sean correctos y la fotometría no está alterada.

Una vez hecha la revisión de la luminaria se empieza a realizar distintas distribuciones de iluminación en el software para lograr llegar a un diseño óptimo con el mínimo de luminarias y el cumplimiento de la norma seleccionada.

Actualmente el túnel Zurquí cuenta con una única fila de luminarias. Se piensa hacer este diseño en dos filas de luminarias paralelas entre sí para mejorar la distribución de la luz y, además, para que cada fila de luminarias tenga asignada la iluminación de cada carril de tránsito. Un punto pensado en este diseño es el de las labores de mantenimiento, ya que se vuelven peligrosas al estar las luminarias en el centro del túnel, porque si se cierra un carril y la canasta de la grúa está dándole mantenimiento a una línea central de luminarias, los furgones, camiones y buses pasan sumamente cerca de la canasta de la grúa, por lo cual esas labores de mantenimiento se tornan complicadas y peligrosas. Esto según comentan colaboradores del área de mantenimiento de alumbrado público de la CNFL.

En los estudios que se realizarán para obtener el diseño adecuado se hará uso del software Dialux en sus versiones 4.12 y Dialux Evo, que es su versión más reciente. Básicamente, difieren en estética de dibujo, ya que Dialux Evo es una versión más moderna, pero su versión anterior realiza un cálculo más rápido y por eso es un poco más adecuado para estas comparaciones de diseños.

A continuación se muestran los cuadros en los que se podrá encontrar un resumen de los datos lumínicos arrojados por Dialux.

Philips LED TunnelView					
Zonas	Separaciones Luminarias (m)	Niveles obtenidos cd/m2	Saliente de calzada (m)	Niveles requeridos cd/m2	Largo de zona
Threshold	1,9	136,82	1,5	130	125
Transición #1	6	43,37		32,5	40
Transición #2	16	16,28		10,725	40
Zona interior	20	13,05		5	187,5

*Cuadro N.º 7. Resumen Luminaria Philips LED TunnelView*

*Fuente propia*

OMNISTAR 2259 Symmetrical LED					
Zonas	Separaciones Luminarias (m)	Niveles obtenidos cd/m2	Saliente de calzada (m)	Niveles requeridos cd/m2	Largo de zona
Threshold	1,3	138,79	2,7	130	125
Transición #1	5	36,1		32,5	40
Transición #2	14	12,95		10,725	40
Zona interior	20	9,15		5	187,5

*Cuadro N.º 8. Resumen de luminarias Philips LED OMNISTAR 2259 Symmetrical*

*Fuente propia*

En estos cuadros comparativos se observa que la luminaria TunnelView de Philips se comporta mucho mejor en cuanto a niveles de iluminación promedio, dado que a mayor distancia entre luminarias se mantienen o se superan los niveles de iluminación que ofrece la OMNIstar de Sceder. Con esto se puede decir que se tendrán que usar menos luminarias en el diseño y que se mantendrán los niveles requeridos, por cual la luminaria de Philips será la que se usará en el diseño de iluminación.

### Diseño de iluminación con luminaria LED TunnelView de Philips

Como primer punto se deben definir las distancias de separación entre luminarias y la ubicación de las dos filas de luminarias en la calle. Se reitera que el diseño se realizará en dos filas de luminarias paralelas con disposición bilateral frente a frente; esto por una cuestión de mantener una buena uniformidad.

Para mayor entendimiento, a continuación se muestra una imagen de una distribución bilateral frente a frente.

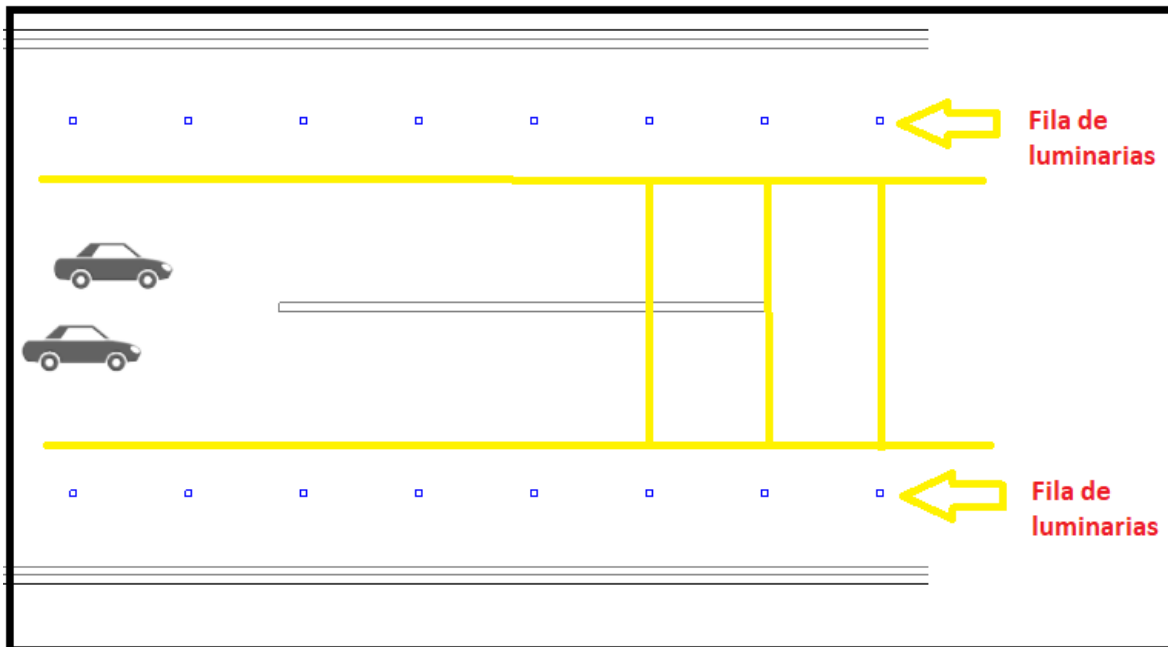
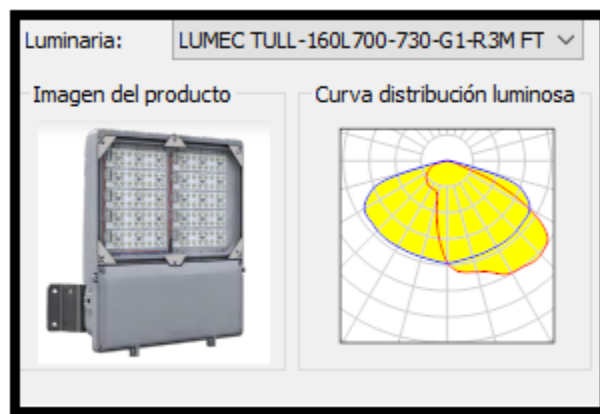


Figura N.º 14. Distribución de luminarias bilateral frente a frente.

*Fuente propia*

Se realizaron distintas simulaciones de diferentes separaciones de la orilla de la carretera para determinar a cuántos metros se debían separar las luminarias de la orilla de la carretera. El tipo de distribución asimétrica de la luminaria Philips permitió una separación mínima de la orilla de la calzada, lo cual beneficia el diseño, ya que las luminarias estarán alejadas del centro. Por lo tanto, si se tuviera que dar un mantenimiento se puede dar en una fila de luminarias a la vez, y así no se expone la canasta de la grúa a una posible colisión con un furgón o autobús que circule por el carril contrario en el cual se está trabajando. A continuación, una imagen de la distribución fotométrica de la luminaria Philips TunnelView tomada de Dialux.



*Figura N.º 15. Distribución fotométrica de luminaria LED Philips*

*Fuente: Dialux*

Se considera una distancia de 1,5m de separación de la orilla de la calzada para que la luminaria obtenga sus mayores niveles de iluminación. A continuación se muestran las pruebas realizadas. (Ver la figura N.º 52 en los apéndices)

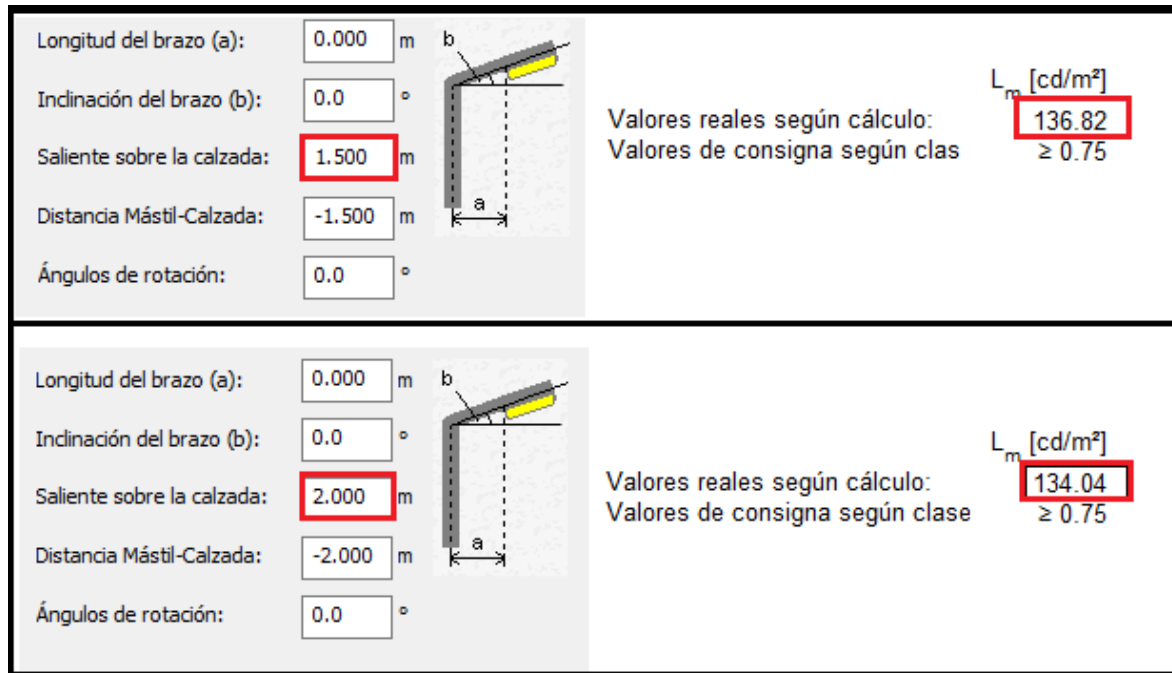


Figura N.º 16. Pruebas de distancia de saliente sobre la calzada. Luminaria TunnelView

Fuente propia

Como se puede apreciar, a mayor distancia de separación o saliente sobre la calzada los niveles de iluminación disminuyen; debido a la distribución asimétrica particular de la luminaria. Esto quiere decir que cuanto más lejos del centro de la calle estén las filas de luminarias, la luminaria se comporta de mejor manera. Pero se tiene una limitante, que es la forma curva del túnel, por lo cual no es posible acercarse más de 1,5 metros a la pared del túnel, ya que su forma curva no lo permite. Debido a esto la distancia será de 1,5 metros de saliente sobre la calzada con una separación entre las filas de luminarias de aproximadamente 6 metros, instaladas a una altura permitida de 6,5 metros. Para una mayor ilustración ver figura N.º 53 en los apéndices.

Seguidamente se presentan las distancias entre luminarias en cada una de las zonas para obtener los valores requeridos por la norma. Es importante resaltar que estos valores se obtienen con prueba y error hasta llegar a los valores lumínicos necesarios.

### Zona Threshold o zona umbral con luminaria Philips LED

Esta zona corresponde a la zona de entrada al túnel, en donde se requieren los niveles más altos de iluminación y, por lo tanto, una separación mínima entre luminarias para lograr los niveles requeridos. A continuación se presentan los análisis de esta zona:

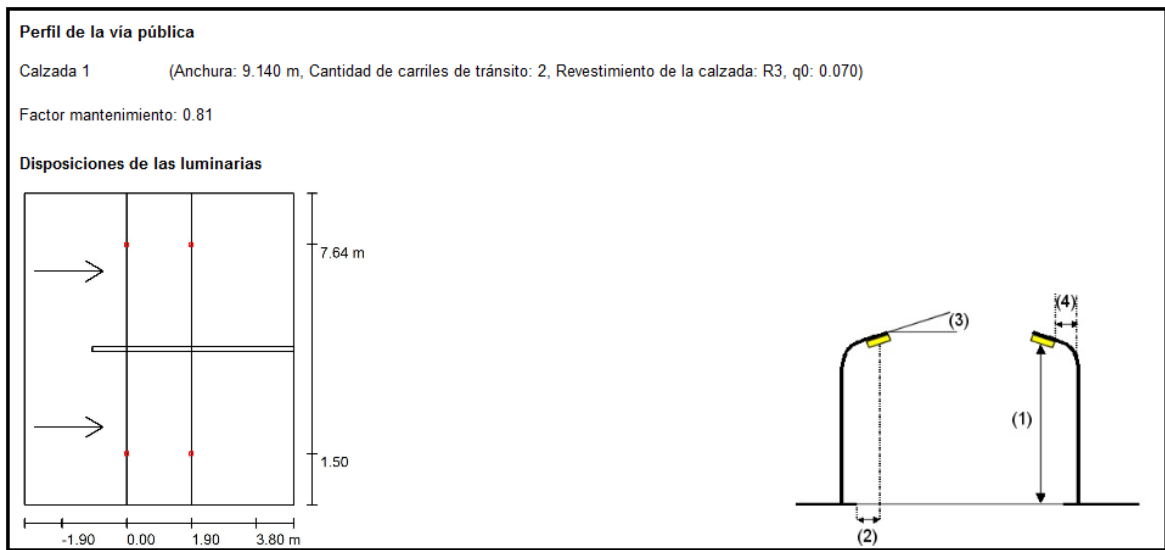


Figura N.º 17. Datos de planificación de la zona umbral

Fuente propia

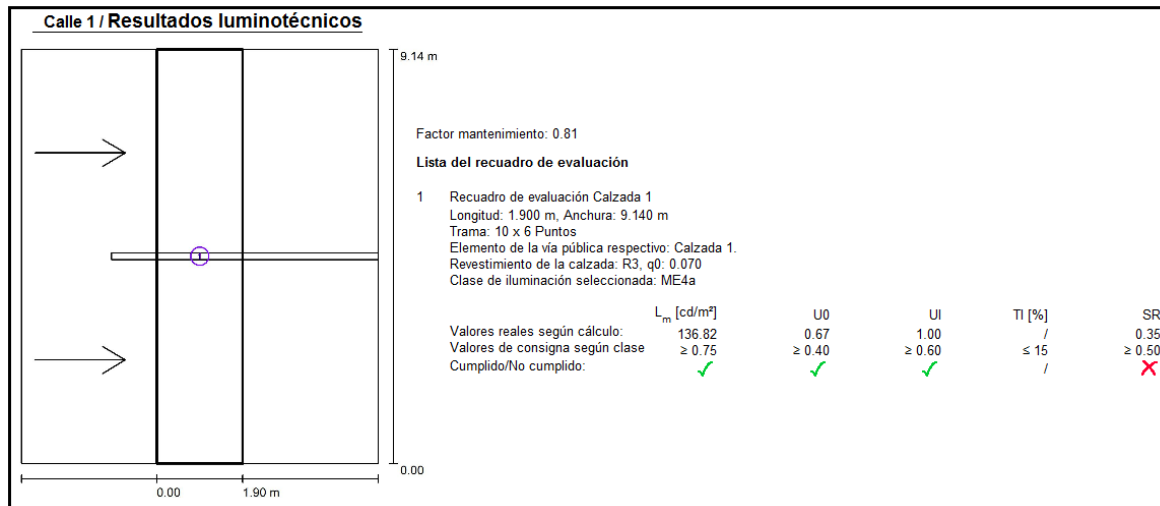


Figura N.º 18. Resultados luminotécnicos de la zona umbral

Fuente propia

Según la norma se necesitan  $130 \text{ cd/m}^2$  y se está logrando obtener  $136,82 \text{ cd/m}^2$  a una separación entre luminarias de 1,9 m y una saliente sobre la calzada de 1,5 m para cada fila de luminarias.

También se está obteniendo una uniformidad global U0 de 67% y una uniformidad longitudinal UI de 100%; además, un SR (factor de borde o relación de entorno) de 35%. Este último dato corresponde a la relación de lúmenes de la zona de diseño con el entorno.

### Zona de transición N.º 1 con luminaria Philips LED

La zona de transición corresponde a la zona siguiente de la zona umbral. En esta zona se lleva un cambio suave de cantidad de luz si se prepara al conductor para la zona interna, que es donde se tiene menos cantidad de luz. A continuación los cálculos y el análisis de esta zona:

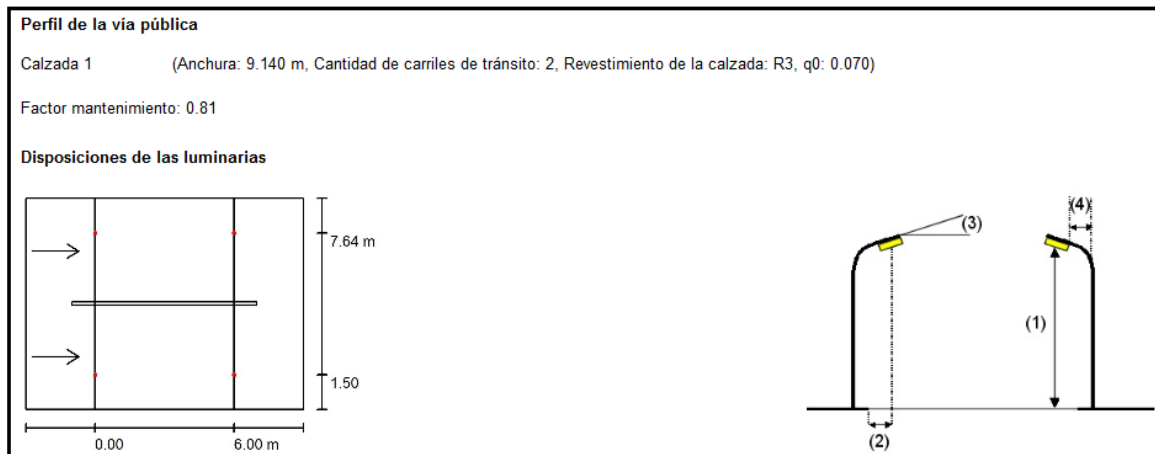


Figura N.º 19. Datos de planificación de la zona de transición N.º 1

Fuente propia

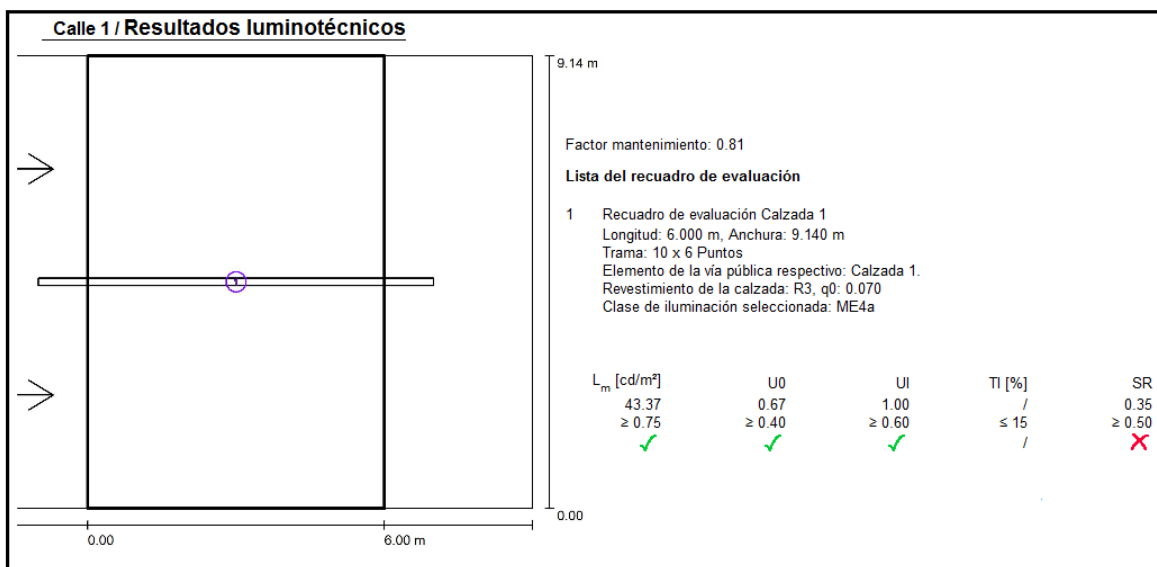


Figura N.º 20: Resultados luminotécnicos zona de transición N.º 1

Fuente propia

En el análisis se puede apreciar que se obtienen  $43,37 \text{ cd/m}^2$  con una separación entre luminarias de 6 metros y lo requerido es  $32.5 \text{ cd/m}^2$ , que es 25% de lo solicitado en la zona de Threshold o zona umbral. Además, se obtiene una uniformidad global de 67% y una uniformidad longitudinal de 100%.

### Zona de transición N.º 2 con luminaria Philips LED

Esta zona corresponde a la adyacente a la zona de transición N.º 1 y hace que la transición sea aun más suave. Esta es la zona más cercana a la zona interna, que es la que tiene los menores niveles de iluminación. A continuación los resultados de la zona de transición N.º 2:

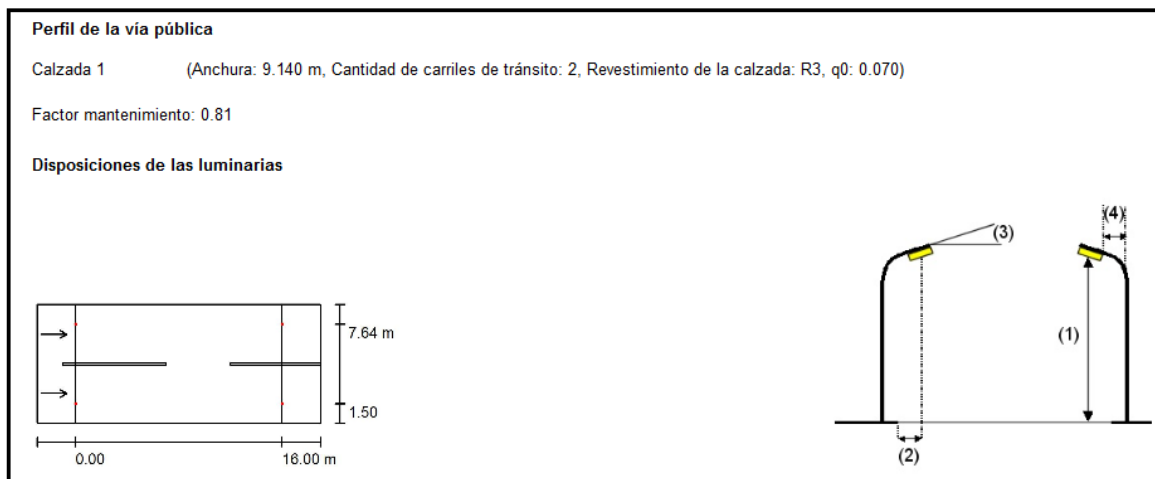


Figura N.º 21. Datos de planificación de la zona de transición N.º 2

Fuente propia

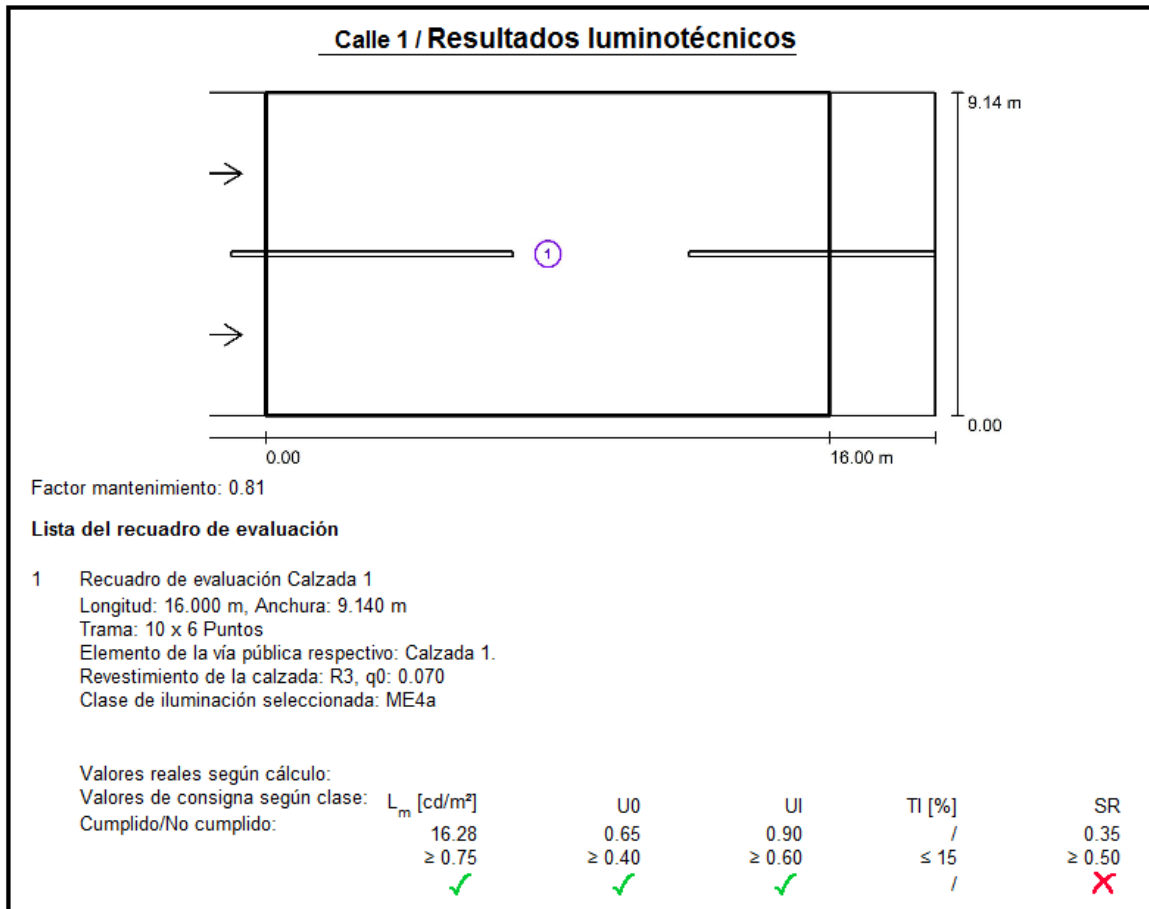


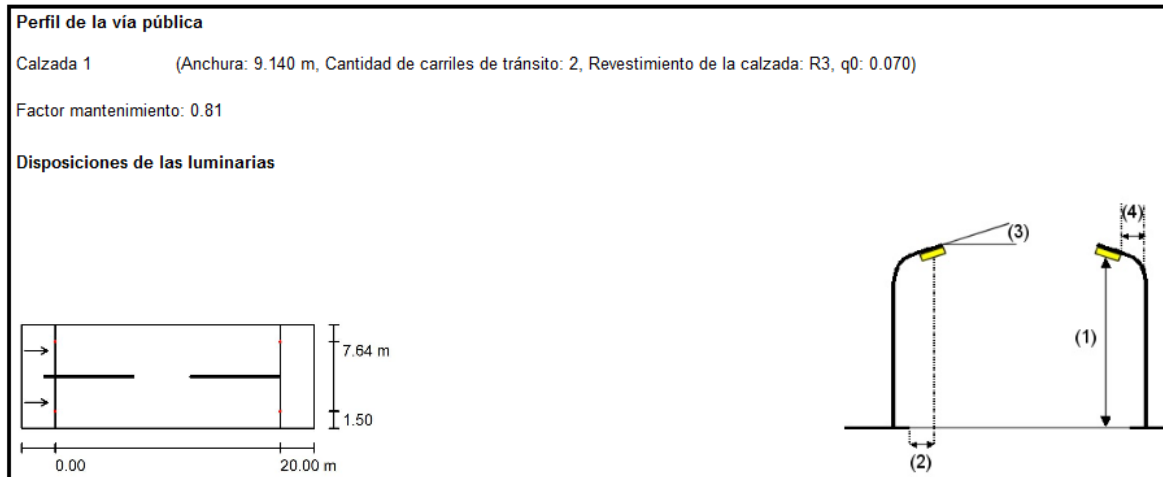
Figura N.º 22: Resultados luminotécnicos zona de transición N.º 2

Fuente propia

Como se puede apreciar, en las simulaciones se obtiene una cantidad de  $16,28 \text{ cd/m}^2$  con una distancia de separación entre luminarias de 16 metros y se requiere en esta zona una cantidad de  $10,72 \text{ cd/m}^2$ , que corresponde a 33% de la cantidad solicitada en la zona de transición N.º 1. Se puede observar que la uniformidad global bajó 2% con respecto a la zona de transición N.º 1, al igual que la uniformidad longitudinal, que bajó 10%. Esto se debe a que las distancias de separación entre luminarias afecta proporcionalmente su uniformidad y la cantidad de lúmenes promedio que pueden entregar.

## Zona interna con luminaria Philips LED

En esta zona se podrán encontrar los niveles de iluminación más bajos de todo el diseño debido a que, como lo dice su nombre es la zona que se encuentra en lo más profundo del túnel. A continuación los resultados de las simulaciones de la zona interior del túnel.



*Figura N.º 23: Datos de planificación Zona interior*

*Fuente propia*

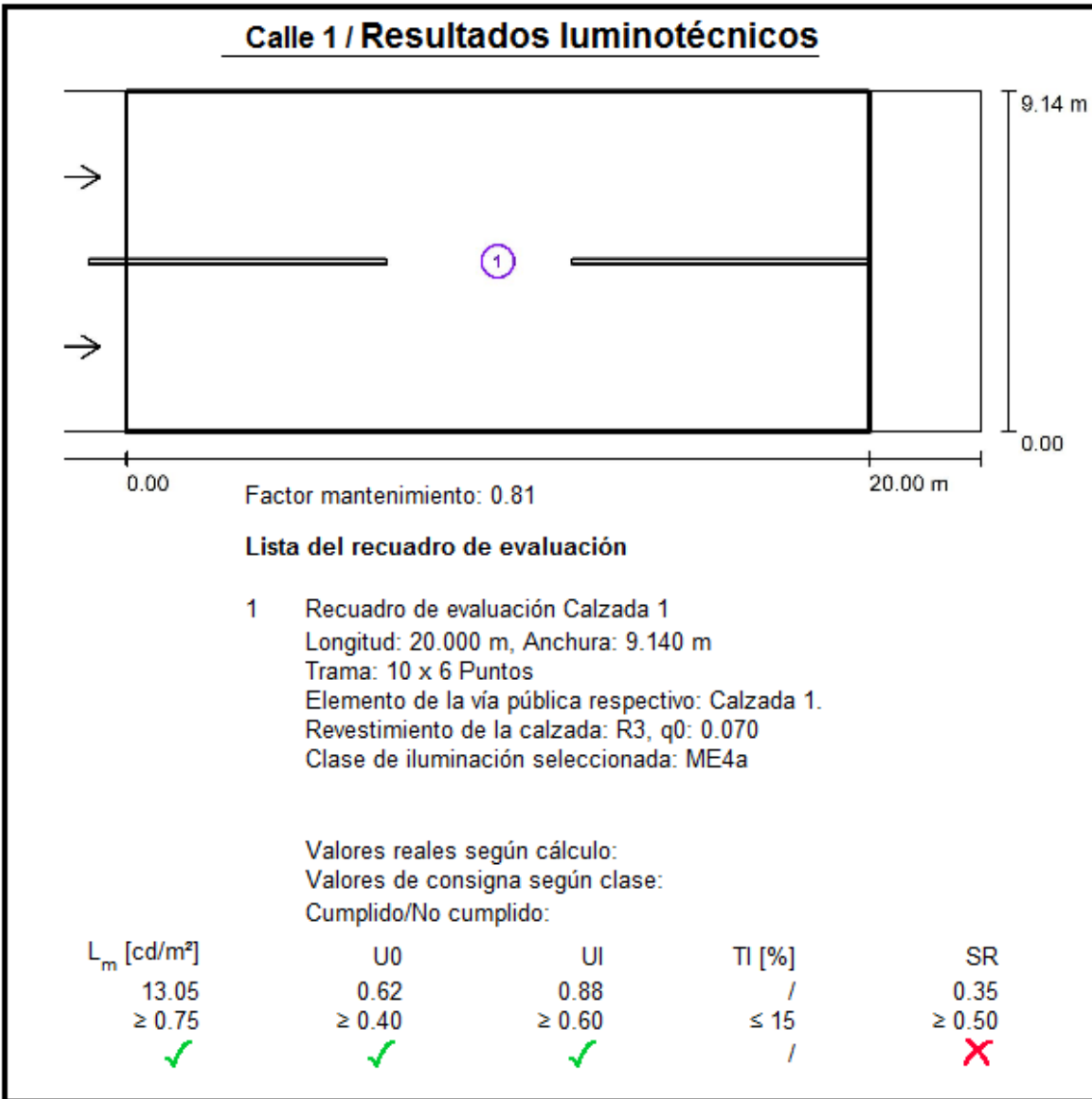


Figura N.º 24. Resultados luminotécnicos zona interior

*Fuente propia*

Se puede apreciar una cantidad de lúmenes promedio de  $13,05 \text{ cd/m}^2$ , valor que es superior al solicitado por la norma, que es de  $5 \text{ cd/m}^2$ . Además, se obtiene uniformidades similares a las de las zonas anteriores, con 62% para uniformidad global y 88% para uniformidad longitudinal, y un factor de borde o relación de entorno igual a los de los demás casos, de 35%.

A continuación se presenta un cuadro-resumen con todos los valores obtenidos y número de luminarias que se necesitarían para el diseño con la luminaria TunnelView LED de Philips.

Philips LED TunnelView						
Zonas	Separaciones Luminarias (m)	Niveles obtenidos cd/m2	Saliente de calzada (m)	Niveles requeridos cd/m2	Largo de zona	Cantidad de Luminarias
Threshold	1,9	136,82	1,5	130	125	263,157895
Transición #1	6	43,37		32,5	40	26,6666667
Transición #2	16	16,28		10,725	40	10
Zona interior	20	13,05		5	187,5	18,75
Total						318,574561

Cuadro N.º 9. Resumen de datos luminaria TunnelView

Fuente propia

Para obtener el número de luminarias se debe tomar la longitud de cada zona y dividirla entre la distancia a que estarán separadas entre sí las luminarias, y ese valor multiplicarlo por 4, ya que son dos filas, y del otro lado del túnel también hay una zona igual. Por lo tanto, son el doble de luminarias, excepto en la zona interior, que es una zona única. Para esta zona solo se multiplica el valor dado por dos correspondiente a las dos filas de luminarias. Para este diseño se obtiene una cantidad 319 luminarias para lograr obtener los niveles de iluminación requeridos, e incluso para mejorarlos un poco en cada zona.

## Diseño de iluminación con luminaria de sodio de alta presión Tunlite de Philips

El diseño con la tecnología de sodio de alta presión se realizará con la luminaria Tunlite de Philips dado que fue la única que se tuvo acceso en un archivo fotométrico y se tiene un precio estimado del costo de cada luminaria. Todas las simulaciones se realizarán con las medidas tomadas para el diseño anterior para realizar una comparación en afectación de uniformidades y niveles de iluminación. A continuación se presentan todos los datos de la luminaria usada para esta simulación.



Figura N.º 25: Datos importantes de la luminaria Tunlite Sodio A/P

*Fuente propia*

Se efectuó una simulación para verificar la saliente sobre la calzada de cada fila de luminarias y para poder obtener los niveles óptimos de iluminación sin acercarse mucho al centro de la calle. Los análisis indican que con una saliente de 2,7 m de la calzada y de 3,7 m de distancia entre filas de luminarias encuentran niveles de iluminación muy buenos. Además, esta no se mantiene en el centro de la calzada, y

la altura de diseño se mantiene en 6,5 m. Para una mayor ilustración ver la figura 52 en los apéndices. A continuación se muestran las simulaciones para determinar la saliente de la calzada:

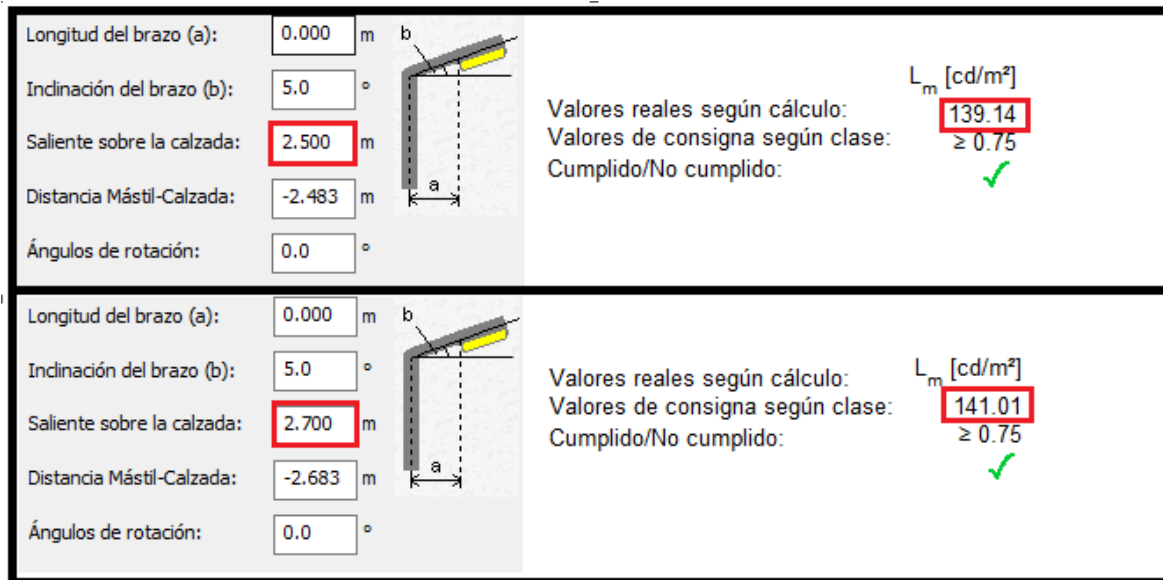


Figura N.º 26: Pruebas de distancia de saliente sobre la calzada Luminaria Tunlite

Fuente propia

Se puede apreciar que a una distancia menor se disminuyen los valores de lúmenes promedio de la luminaria, y se definió un límite de acercamiento desde los bordes de la calle hasta el centro de 2,7m. La luminaria tiene una distancia de saliente sobre la calzada mayor que la luminaria del diseño anterior y se le debe colocar un ángulo de inclinación de 5° debido a su distribución simétrica. A continuación se presenta la distribución fotométrica de la luminaria Tunlite:



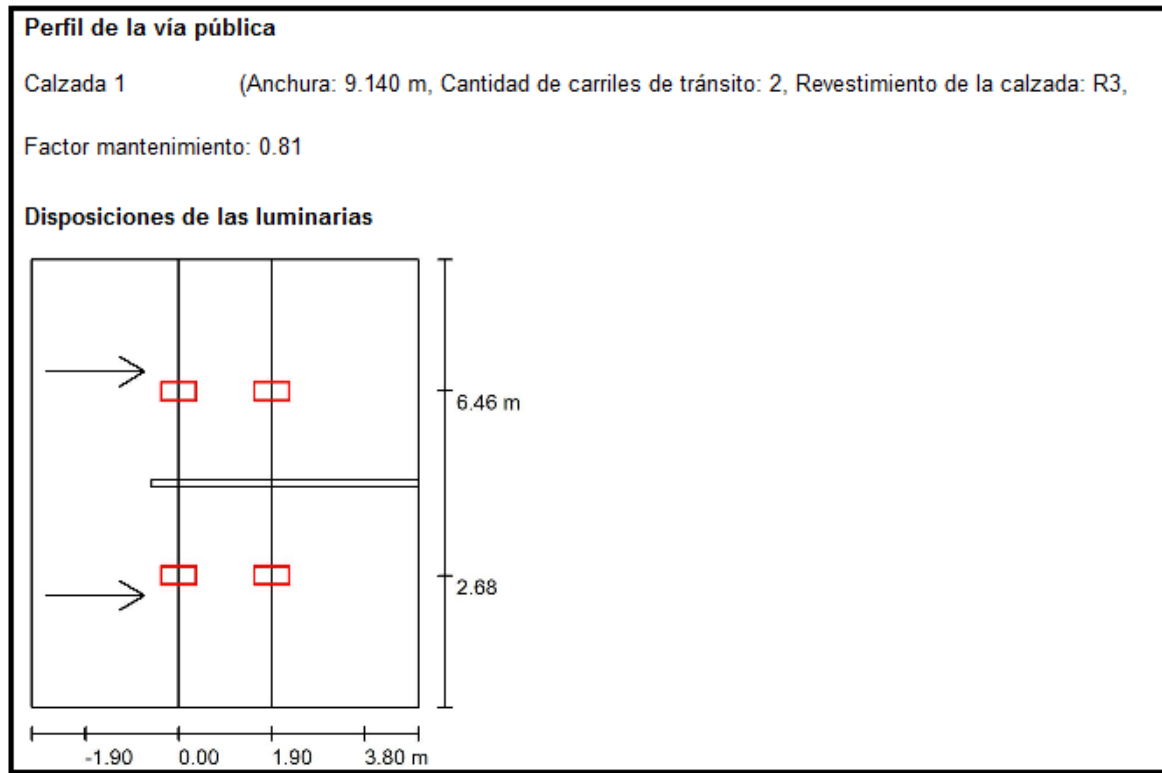
*Figura N.º 27: Distribución fotométrica de luminaria Tunlite Sodio A/P*

*Fuente: Dialux*

Seguidamente se hará el análisis por cada zona de igual manera que en el caso anterior, con esta luminaria de sodio de alta presión, para realizar la comparación entre tecnologías al final de la investigación.

### Zona Threshold o zona umbral con luminaria Philips Tunlite de sodio de alta presión

A continuación se presentan los datos de planificación para la zona Threshold o umbral de lo realizado con la luminaria Tunlite de sodio de alta presión de Philips. Cabe recalcar que todas las distribuciones de luminarias para este caso se están haciendo con una saliente de calzada de 2,7 metros y una altura de 6,5 m en todas las zonas.



*Figura N.º 28: Datos de planificación Luminaria Tunlite Sodio de Alta Presión (VSAP)*

*Fuente propia*

En la imagen se puede observar la separación de 1,9 m entre luminarias y una separación de la orilla de la calzada o saliente sobre la calzada de 2,7 m, aproximadamente.

Seguidamente se proporcionan los datos luminotécnicos aportados por el programa de simulación Dialux:

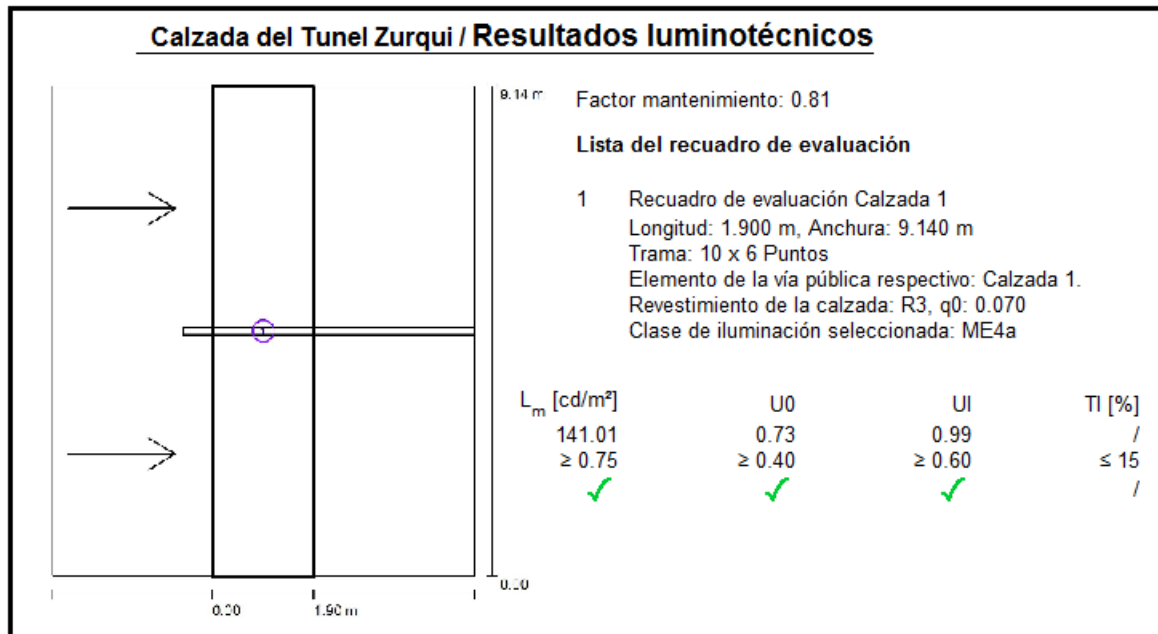


Figura N.º 29. Resultados luminotécnicos zona umbral

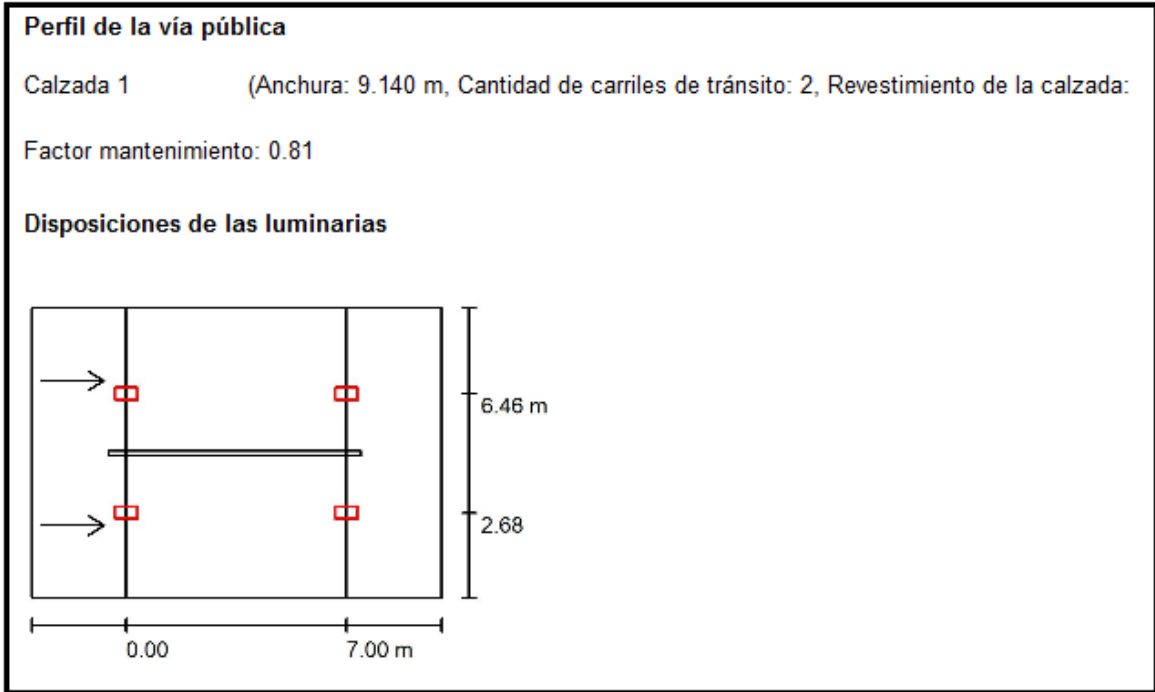
Luminaria Tunlite Sodio de Alta Presión (VSAP)

Fuente propia

En la figura adjunta se muestran los datos obtenidos para la zona umbral con 141.01  $\text{cd/m}^2$ , una U0 de 73% y una uniformidad longitudinal de 99%. Estos resultados son muy similares a los obtenidos con la luminaria LED TunnelView.

### Zona de transición N.º 1 con Luminaria Philips Tunlite de sodio de alta presión

Ahora se presentarán los datos de planificación y los resultados luminotécnicos de la zona de transición N.º 1 para la luminaria Tunlite de Philips.



*Figura N.º 30: Datos de planificación zona de transición*

*Luminaria Tunlite Sodio de Alta Presión (VSAP)*

*Fuente propia*

En la figura se puede apreciar la distribución de las luminarias con una separación entre ellas de 6 metros y una separación entre filas de 3,7 metros, aproximadamente.

### Calzada del Tunel Zurqui / Resultados luminotécnicos

#### Lista del recuadro de evaluación

- 1 Recuadro de evaluación Calzada 1  
Longitud: 6.000 m, Anchura: 9.140 m  
Trama: 10 x 6 Puntos  
Elemento de la vía pública respectivo: Calzada 1.  
Revestimiento de la calzada: R3, q0: 0.070  
Clase de iluminación seleccionada: ME4a

	$L_m$ [cd/m <sup>2</sup> ]	U0	UI	TI [%]	SR
Valores reales según cálculo:	44.70	0.72	0.98	/	0.35
Valores de consigna según cl	≥ 0.75	≥ 0.40	≥ 0.60	≤ 15	≥ 0.50
Cumplido/No cumplido:	✓	✓	✓	/	✗

Figura N.º 31: Resultados luminotécnicos de la zona transición N.º 1

Luminaria Tunlite Sodio de Alta Presión (VSAP)

Fuente propia

Los resultados de la simulación arrojan una cantidad de  $38,31 \text{ cd/m}^2$  y unas uniformidades globales y longitudinales de 72% y 98%, respectivamente, además un SR de 35%.

### Zona de transición N.º 2 con luminaria Philips Tunlite de sodio de alta presión

Debido a que es un proceso repetitivo de simulación y a que solo se está efectuando un cambio de distancia entre luminarias, se presentarán los valores que están siendo modificados por el cambio de distancia. Para este caso se tiene una separación entre luminarias de 16 metros.

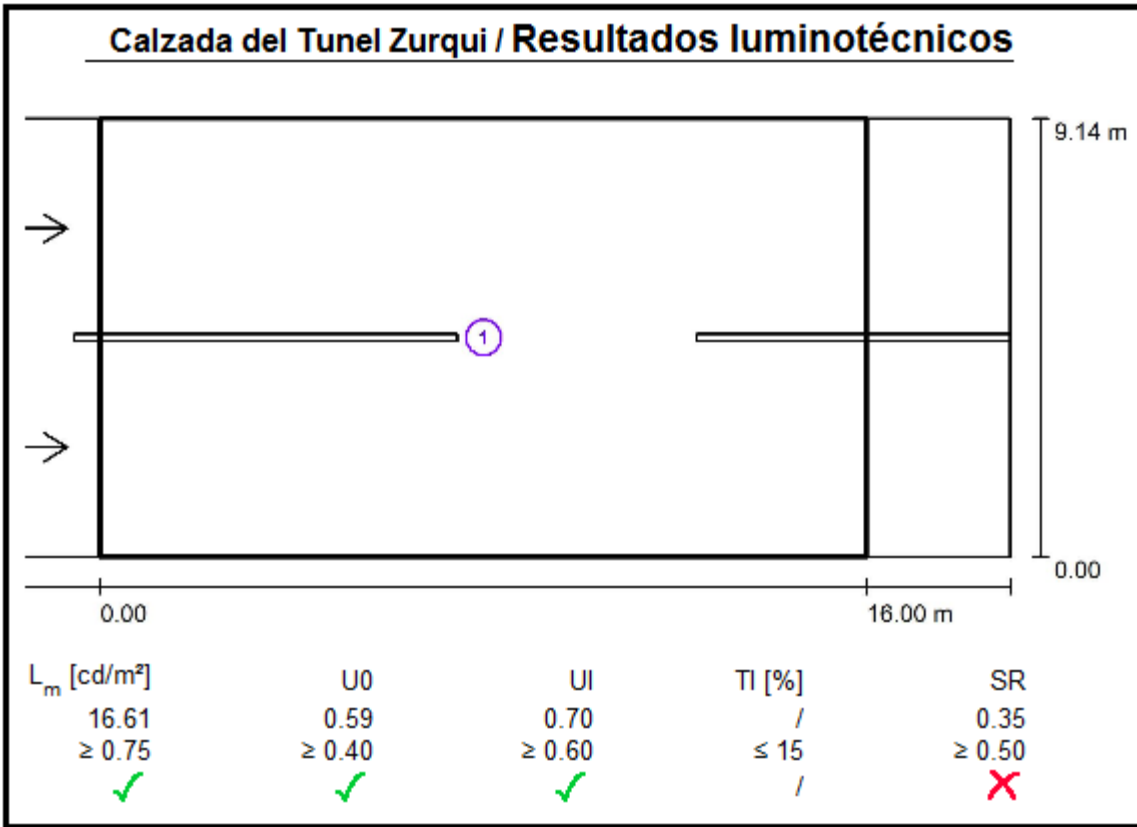


Figura N.º 32: Resultados luminotécnicos de la zona transición N.º 2

Luminaria Tunlite Sodio de Alta Presión (VSAP)

Fuente propia

En la imagen anterior se pueden apreciar los valores de lúmenes promedio, uniformidad global y uniformidad longitudinal, que corresponden a 16,61 38,31 cd/m<sup>2</sup>, 59% y 70%, respectivamente.

## Zona interior con luminaria Philips Tunlite de sodio de alta presión

A continuación serán presentados los datos de la zona interior usando la luminaria Tunlite de sodio de alta presión marca Philips. Para la simulación de la iluminación de esta zona se consideró una distancia de separación entre luminarias de 20 metros.

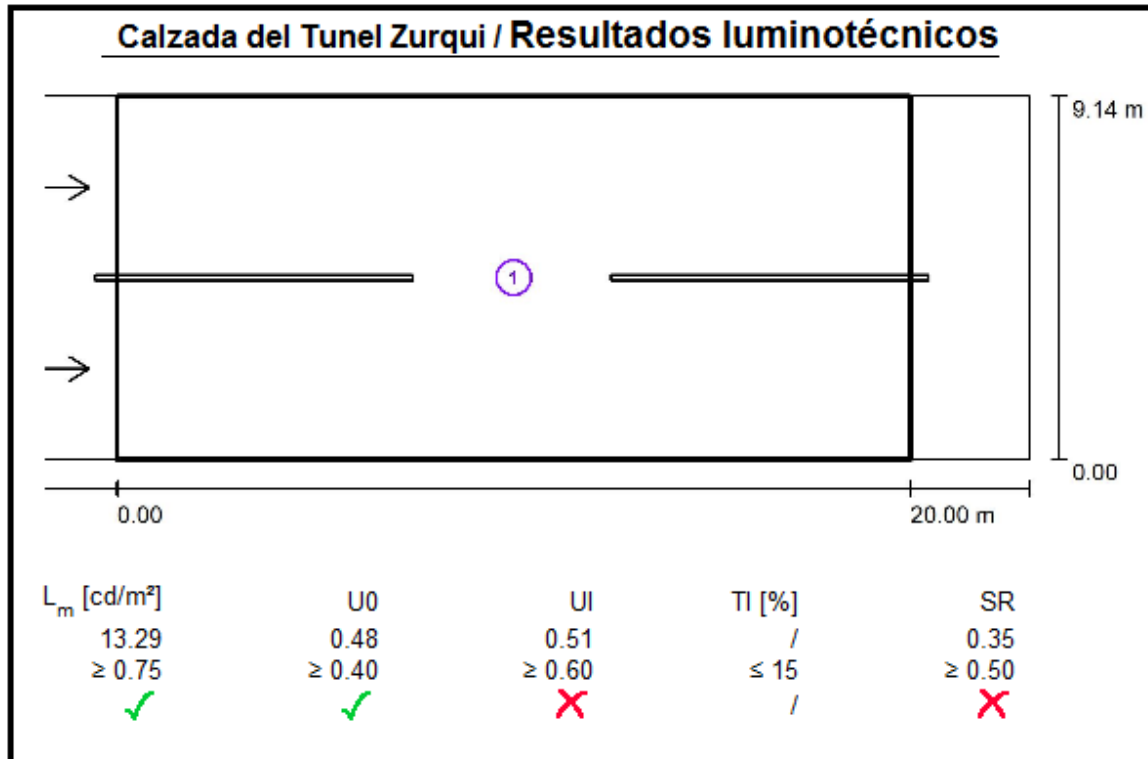


Figura N.º 33: Resultados luminotécnicos zona interna

Luminaria Tunlite Sodio de Alta Presión (VSAP)

Fuente propia

Con una distancia de 20 metros entre luminarias se logra obtener una cantidad de lúmenes de 13.29 cd/m<sup>2</sup>, además, una uniformidad global de 48% y una uniformidad longitudinal de 51%, la uniformidad longitudinal está por debajo de 60%.

A continuación se presentan la cantidad de luminarias por zona y los totales según los datos obtenidos de la simulación.

Philips Vapor de sodio de alta Presión Tunlite						
Zonas	Separaciones Luminarias (m)	Niveles obtenidos cd/m2	Saliente de calzada (m)	Niveles requeridos cd/m2	Largo de zona	Cantidad de Luminarias
Threshold	1,9	141,01	2,7	130	125	263,157895
Transición #1	6	44,7		32,5	40	26,6666667
Transición #2	16	16,61		10,725	40	10
Zona interior	20	13,29		5	187,5	18,75
Total						318,574561

*Cuadro N.º 10: Resumen de datos luminaria Tunlite VSPA*

*Fuente propia*

Se logra obtener un valor de número de luminarias de 319, número igual al caso anterior ya que se usaron las mismas distancias que en el diseño con la luminaria TunnelView. La diferencia entre estas dos luminarias se logrará ver en los datos lumínicos y los costos.

### Resumen de datos

A continuación se presentan los resúmenes de los datos más relevantes en las simulaciones de iluminación con ambas luminarias.

Cuadro de comparación lumínica			
Zonas	Philips LED TunnelView en $cd/m^2$	Philips Vapor de sodio de alta presión Tunlite en $cd/m^2$	Valores requeridos $cd/m^2$
Threshold	136,82	141,01	130
Transición #1	43,37	44,7	32,5
Transición #2	16,28	16,61	10,725
Zona interior	13,05	13,29	5

*Cuadro N.º 11. Cuadro de comparación lumínica*

*Fuente propia*

Con este cuadro se pueden apreciar las diferencias mínimas en cuando a valores lumínicos entre la luminaria TunnelView de tecnología LED y la luminaria Tunlite de tecnología de vapor de sodio de alta presión. Las simulaciones están realizadas a la misma distancia de separación de luminarias para poder evaluar únicamente valores lumínicos.

Se puede apreciar que la tecnología de vapor de sodio supera en poco los valores lumínicos de la tecnología LED.

Cuadro de comparación Lumínica				
Zonas	Philips LED TunnelView		Philips Vapor de sodio de alta Presión Tunlite	
	U0	UI	U0	UI
Threshold	67%	100%	73%	99%
Transición #1	67%	100%	72%	98%
Transición #2	65%	90%	59%	70%
Zona interior	62%	88%	48%	51%

*Cuadro N.º 12. Cuadro de comparación de uniformidades entre tecnologías*

*Fuente propia*

Se puede observar un cambio brusco en la uniformidad global de la luminaria de vapor de sodio en la zona de transición N.º 2 y, aunque la norma no menciona nada de uniformidades, lo recomendable -según la CNFL- es que no baje de 60%.

### Análisis lumínico en horas de la noche

Todos los cálculos lumínicos de los diseños anteriores son para la condición con más luz, que por obvias razones es de día. Ahora, para el periodo de la noche no se pueden conservar los mismos valores lumínicos, ya que el choque de ir en la oscuridad por la calzada y entrar al túnel con más de  $130 \text{ cd/m}^2$  provocaría un efecto no deseado en la vista de los conductores (encandilamiento por cambio brusco de luz); por lo tanto, la norma dicta un valor de  $2,5 \text{ cd/m}^2$  a lo largo de todo el túnel.

Por lo dicho se entra en un proceso de dimerización de luminarias para poder bajar los valores lumínicos sin afectar las uniformidades de cada zona.

Este proceso solo se llevará a cabo con la luminaria LED ya que es la única que permite la dimerización. La luminaria de vapor de sodio de alta presión no permite este proceso debido a sus componentes internos.

Debido a que el análisis es el mismo se mostrará un cuadro-resumen con los valores de dimerización y lúmenes requeridos para que el túnel opere de noche. Es importante destacar que las uniformidades se mantienen y los únicos que se afecta son los valores lumínicos.

Philips LED TunnelView (Noche)					
Zonas	Cantidad de lúmenes	Niveles obtenidos cd/m2	Porcentaje de dimerización	Niveles requeridos cd/m2	Lúmenes totales Lm
Threshold	752,46	2,73	2%	2,5	37623
Transicion #1	2257,38	2,6	6%	2,5	
Transicion #2	6019,68	2,6	16%	2,5	
Zona interior	7524,6	2,61	20%	2,5	

*Cuadro N.º 13. Cuadro Resumen, datos obtenidos para iluminación nocturna*

*Fuente propia*

### **Análisis financiero**

En este apartado se hace una comparación de tipo económico de los diseños en los que se utilizaron la tecnología LED y la tecnología de vapor de sodio de alta presión. Para ello se utilizarán las cotizaciones que se incluyen en los apéndices. Como no se logró obtener una cotización de la luminaria Philips Tunlite se hará una estimación de precio unitario con base en presupuestos existentes en la CNFL.

A continuación se presenta la captura de una parte del presupuesto hecho por una empresa particular para la CNFL a fin de evaluar el cambio de las luminarias manteniendo la tecnología de vapor de sodio de alta

presión. Por motivos de confidencialidad no se mencionan el nombre de la empresa que suministró la información ni el año de realización:

<b>INSTALACION DE LUMINARIA CON BALASTRO, LAMPARA Y FUSE PARA CADA LUMINARIA Y EL SEMAFORO</b>	
LUMINARIA 400w TIPO PROYECTOR IP66 IK10 CLASE II CON FUSE, IGUAL O SIMILAR A LA ORION DE ATP	¢478 587.00
BALASTRO 400w DE DOBLE NIVEL DE POTENCIA 240V 60HZ CON CAPACITANCIA Y CAPACITANCIA COMPLEMENTARIA, 2P DE ELT O SIMILAR	¢65 854.00
LAMPARA 400w DE VAPOR DE SODIO ALTA PRESION DE DOBLE TUBO ARCO, Gold Light StandBy DE SYLVANIA O SIMILAR	¢284 584.00
LUMINARIA 250w TIPO PROYECTOR IP66 IK10 CLASE II CON FUSE, IGUAL O SIMILAR A LA ORION DE ATP	¢421 548.00
BALASTRO 250w DE DOBLE NIVEL DE POTENCIA 240V 60HZ CON CAPACITANCIA Y CAPACITANCIA COMPLEMENTARIA, 2P DE ELT O SIMILAR	¢65 854.00
LAMPARA 250w DE VAPOR DE SODIO ALTA PRESION DE DOBLE TUBO ARCO, Gold Light StandBy DE SYLVANIA O SIMILAR	¢221 544.00
LUMINARIA 150w TIPO PROYECTOR IP66 IK10 CLASE II CON FUSE, IGUAL O SIMILAR A LA ORION DE ATP	¢452 658.00
BALASTRO 150w DE DOBLE NIVEL DE POTENCIA 240V 60HZ CON CAPACITANCIA Y CAPACITANCIA COMPLEMENTARIA, 2P DE ELT O SIMILAR	¢65 854.00
LAMPARA 250w DE VAPOR DE SODIO ALTA PRESION DE DOBLE TUBO ARCO, Gold Light StandBy DE SYLVANIA O SIMILAR	¢221 544.00
SEMAFORO INTERMITENTE DE UN FOCO COLOR AMARILLO	¢174 877.00
CONTACTOR 240 VAC MAXI. CORRIENTE INDUCTIVA 9A, RESISTIVA 20A D-Line NEMA A600 DE Telemecanique o SIMILAR	¢32 565
LUMINARIA 400w TIPO PROYECTOR IP66 IK10 CLASE II CON FUSE, IGUAL O SIMILAR A LA ORION DE ATP	¢478 587.00
BALASTRO 400w DE DOBLE NIVEL DE POTENCIA 240V 60HZ CON CAPACITANCIA Y CAPACITANCIA COMPLEMENTARIA, 2P DE ELT O SIMILAR	¢65 854.00
LAMPARA 400w DE VAPOR DE SODIO ALTA PRESION DE DOBLE TUBO ARCO, Gold Light StandBy DE SYLVANIA O SIMILAR	¢284 584.00
LUMINARIA 250w TIPO PROYECTOR IP66 IK10 CLASE II CON FUSE, IGUAL O SIMILAR A LA ORION DE ATP	¢421 548.00
BALASTRO 250w DE DOBLE NIVEL DE POTENCIA 240V 60HZ CON CAPACITANCIA Y CAPACITANCIA COMPLEMENTARIA, 2P DE ELT O SIMILAR	¢65 854.00
LAMPARA 250w DE VAPOR DE SODIO ALTA PRESION DE DOBLE TUBO ARCO, Gold Light StandBy DE SYLVANIA O SIMILAR	¢221 544.00
LUMINARIA 150w TIPO PROYECTOR IP66 IK10 CLASE II CON FUSE, IGUAL O SIMILAR A LA ORION DE ATP	¢452 658.00
BALASTRO 150w DE DOBLE NIVEL DE POTENCIA 240V 60HZ CON CAPACITANCIA Y CAPACITANCIA COMPLEMENTARIA, 2P DE ELT O SIMILAR	¢65 854.00
LAMPARA 250w DE VAPOR DE SODIO ALTA PRESION DE DOBLE TUBO ARCO, Gold Light StandBy DE SYLVANIA O SIMILAR	¢221 544.00

*Tabla 8. Presupuesto de empresa particular para cambio de luminarias VSAP*

*Fuente privada*

Este presupuesto muestra un valor para una luminaria de vapor de sodio de alta presión de 478.587 colones, y un precio de 65.854 colones para el balastro de la luminaria, para un total de 544.441 colones de precio unitario de las luminarias.

Según los estudios luminotécnicos para alcanzar los niveles de iluminación se necesitan 319 luminarias de sodio de alta presión de la familia Tunlite de Philips, por lo cual si se multiplican 319 luminarias por el precio unitario de 544.441 colones se obtiene un total de 173.676.679 colones, aproximadamente, para la compra de las luminarias.

Para el diseño con tecnología LED sí se cuenta con el precio unitario proporcionado por la empresa Enersys, que es representante de Philips en el país. Dicha cotización reporta un precio de 1 588 dólares. Utilizando el tipo de cambio del dólar ya mencionado anteriormente de 588 se obtiene un equivalente de

933.744 colones para la luminaria TunnelView. Ahora solo se multiplica este valor por 319 luminarias y un total de 297.864.336 colones.

Las luminarias de sodio de alta presión son más baratas que las luminarias de tecnología LED con una diferencia en compra de luminarias de 124.187.657 colones.

### Análisis económico social

El proyecto estudiado en este documento no es financieramente rentable debido a que no hay forma de saber cómo recuperar la inversión necesaria para instalar nuevas luminarias en el túnel Zurquí. Este proyecto es de orden público por lo cual se debe analizar como un proyecto económico-social. Se debe conocer el impacto de mantener luminarias deterioradas en el túnel, mantenimientos muy seguidos dentro del túnel o, en un caso extremo, el túnel sin luz. Por lo tanto, se procede a analizar las posibles consecuencias de una mala iluminación del túnel o iluminación nula dentro de él.

En primer lugar se encuentra el resguardo de la vida humana, por lo que es de suma importancia que el túnel tenga una iluminación adecuada para el tránsito de las personas, ya que si se tuviera una iluminación defectuosa o nula el túnel sería un lugar muy propenso a accidentes debido a los cambios de luz extremos que se dan en la boca del túnel. Estos accidentes podrían provocar daños materiales y hasta pérdida de vidas humanas en posibles accidentes dentro del túnel.

En la parte económica, el sector transporte y las ventas se pueden ver sumamente afectadas. Como se constató en la información del periódico La Nación, durante la huelga del pasado 1° de julio del 2019 ocho cámaras ligadas al sector exportador denunciaron pérdidas de 10.000.000 de dólares diarios por bloqueos en esa ruta (en la que se encuentra el túnel Zurquí). Además, se reportaron pérdidas de productos perecederos y se aseguró que esta huelga comprometió el trabajo de más de 300.000 personas de forma directa, ya que el puerto de Moín, situado en la provincia de Limón, es de donde sale 65% de las exportaciones nacionales. De ello se deduce que si se tuviera que cerrar la vía por defectos en la

iluminación o por mantenimientos frecuentes y prolongados se podrían dar grandes afectaciones tanto sociales como económicas.

## Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

- 1) Al investigar sobre las normas se determinó que la parte de normativa sobre iluminación de alumbrado público es inexistente. Además, tampoco existe una normativa para el uso de exteriores como parqueos, parques y túneles, por lo cual las personas o empresas que se dedican al diseño de sistemas de iluminación en exteriores deben basarse en normas extranjeras y, además de esto, tratar de adaptarlas ya que las condiciones son totalmente diferentes. En el caso de la investigación correspondiente a este documento se usó la norma IESNA la cual se adaptó a las necesidades del país y se logró así obtener criterios y valores importantes para la realización del diseño. Por lo tanto, la norma IESNA es una buena opción, no solo para túneles sino para diseño de iluminación exterior, puesto que es muy accesible y fácil de comprender.
- 2) Con respecto al sondeo de mercado se logró encontrar enorme variedad de variables técnicas que se deben contemplar para un diseño de iluminación de este tipo, pues diferentes fabricantes ofrecen diferentes beneficios en sus productos, aunque se logró apreciar una gran similitud en los productos de los grandes fabricantes de luminarias ubicados en el país. Algunas de las empresas tienen toda la información y lograron aportar toda la información a tiempo para la evaluación de sus respectivos productos. Esto para los productos de tecnología LED pero para la tecnología de vapor de sodio de alta presión la información fue casi nula. Para poder evaluar una luminaria de sodio de alta presión se necesitó una fotometría de un proyecto anterior de la CNFL y estimar el costo de dicha luminaria. Esto porque ningún oferente aportó fotometría de luminarias de sodio de alta presión pues es una tecnología que se considera que quedará obsoleta en poco tiempo. Esto por lo difícil y complicado que fue obtener información de este tipo de luminarias. Según las respuestas dadas por personal de la CNFL y vendedores de empresas fabricadoras de esas

luminarias es una tecnología que cuyo uso se disminuido, tanto que las empresas ya no ofrecen esta tecnología.

- 3) Se pudo apreciar que las mejores luminarias de tecnología LED de cada empresa que se evaluó cuentan con precios y características técnicas y lumínicas muy similares, por lo cual el descarte de estas luminarias se dio, en primer lugar, por falta de información. En segundo lugar, aunque se contaba con toda la información para su diseño se hizo una prueba lumínica en la que se vio que la luminaria TunnelView de Philips ofrece los mejores niveles de iluminación y gracias a su distribución también ofrece buenas características lumínicas para el diseño. En cuanto a la tecnología de vapor de sodio de alta presión no se pudo realizar una comparación efectiva por falta de información no suministrada por los oferentes de esas luminarias.
- 4) Un software de simulación de iluminación es una herramienta muy útil para realizar un diseño de iluminación, porque ofrece valores aproximados a la realidad sin tener que caer en ningún tipo de gasto. Con solo las fichas fotométricas de una luminaria, algunas medidas y condiciones del terreno se puede plantear un diseño de cero. Esta es una herramienta que cualquier ingeniero diseñador de obras lumínicas debería tener para que el proceso de diseño sea más correcto y ágil.
- 5) Técnicamente hablando, la luminaria con tecnología de vapor de sodio de alta presión es superior a la luminaria de tecnología LED en algunos puntos, como se demuestra en los datos luminotécnicos obtenidos (estos datos se pueden encontrar en el resumen de datos de los análisis lumínicos efectuados a las luminarias en el cuadro N.º 11 y en el cuadro N.º 12). Ahí se muestran las diferencias de luminosidad a pesar de que se usó la misma distancia en ambas. La luminaria de vapor de sodio de alta presión arroja mejores valores lumínicos si se sacrifica un poco la uniformidad, claro está. Además, en cuanto a aplicaciones, como en un túnel, la luminaria de vapor de sodio de alta presión presenta una luz amarillenta, con una temperatura ya de fábrica, de 3000°K. Por eso es perfecta para no provocar el encandilamiento en los conductores, mientras que

a la luminaria de tecnología LED hay que hacerle ciertas modificaciones para bajar su eficiencia y obtener una temperatura de color más baja, para no que la luz no sea tan blanca dentro del túnel. Pero la luminaria de vapor de sodio no es solo beneficios puesto que tiene fuertes desventajas técnicas que en cierto momento podrían llevarla a ser obsoleta. Uno de estos puntos de desventaja es que no tiene salidas de telegestión. Por lo tanto, no puede ser controlada o monitoreada remotamente. Esta es una gran desventaja competitiva con respecto a la tecnología LED, ya que todo apunta a una industria controlada por telegestión, sin tener personal que se tenga que trasladar hasta el punto por cuestiones de ahorro y para evitar posibles riesgos en el traslado. Otro punto importante de desventaja es la dimerización. La luminaria de sodio de alta presión, al tener un balastro que en realidad es un transformador, eso permite la dimerización solo si se poseen derivaciones (varias salidas del bobinado). Quiere decir que limita que la luminaria pueda tener tal control en un valor de 0,1% a 100%. Esto se puede apreciar en las luminarias de sodio de alta presión del estudio ubicadas en el cuadro N.º 6, en el que se muestra que ninguna tiene dimerización.

En conclusión, las luminarias de vapor de sodio de alta presión son superiores en varios aspectos pero al no tener puntos tan importantes como la dimerización o tele gestión empieza a parecer una tecnología con un destino marcado a la discontinuación.

La tecnología LED tiene muchos implementos tecnológicos que son de gran ayuda y, además, sus valores lumínicos no son muy inferiores a los de la luminaria de vapor de sodio (ver el cuadro N.º 11) de alta presión. También se muestran unas mejores uniformidades en relación con la distancia.

- 6) En cuanto al punto económico no hay comparación en precio ya que la luminaria de sodio de alta presión es mucho más barata que la luminaria de tecnología LED. La diferencia es de 124.187.657 colones en la inversión inicial y la inversión en compra de luminarias de vapor de sodio de alta presión es cercana a 173.676.679 colones, mientras que la compra de luminarias de tecnología

LED llega a 297.864.336 colones. Esto puede ser por las altas garantías de hasta 10 años que ofrecen los fabricantes de luminarias LED y por los grandes avances técnicos que tienen estas luminarias.

- 7) En cuanto a precio, no hay duda de que la tecnología de vapor de sodio de alta presión sería la favorita por mucho. No hay duda de que las dos tecnologías son muy buenas en cuanto a niveles lumínicos y eficiencias energéticas; sin embargo, hay factores importantes, como son garantías del equipo, garantías sobre repuestos, dimerización, telegestión, etc., que hacen que las luminarias de vapor de sodio de alta presión no califiquen para un proyecto como este, puesto que no se puede asegurar que la luminaria permanezca mucho más tiempo en el mercado. Además, según experiencias expresadas en la entrevista por Marlon Fernández (ver la entrevista en los apéndices), estas luminarias de vapor de sodio no duran más de cinco años en uso antes de volver al taller de alumbrado público. Por lo tanto, se decide que la tecnología de luminarias LED es la más adecuada para un proyecto como este, debido a su vida útil y a aspectos técnicos que la caracterizan como la luminaria con la tecnología más competitiva en el mercado.

## Recomendaciones

- 1) Se recomienda el uso de luminarias con tecnología LED por todos lo expuesto.
- 2) Si el proyecto llegara a ejecutarse se debería colocar un sistema de monitoreo para controlar las luminarias por medio de su salida de telegestión.
- 3) Se recomienda, en el momento de compra de luminarias, solicitar estudios de laboratorio y certificados que avalen todos los requerimientos solicitados de grado de hermeticidad, grado de impacto, parámetros eléctricos y fotométricos, lo mismo que cartas de garantía de luminarias con un mínimo de diez años después de la venta, y de igual manera que se garantice la venta de repuestos durante diez años, como mínimo.

## Referencias

<https://blog.ledbox.es/informacion-led/temperatura-de-color-en-las-luces-led>. (s.f.).

<https://recursos.citcea.upc.edu/llum/exterio/tunel.html>. (s.f.).

<https://www.efectoled.com/blog/ugr-indice-deslumbramiento-unificado/>. (s.f.).

<https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-de-iluminacion-en-tuneles-e-infraestructuras-subterraneas-fenercom-2015.pdf>. (s.f.).

<https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-de-iluminacion-en-tuneles-e-infraestructuras-subterraneas-fenercom-2015.pdf>. (s.f.).

<https://www.mopt.go.cr/wps/wcm/connect/1464ac83-902a-4688-8287-1893dde634bd/AnuarioTransito2017.pdf?MOD=AJPERES>. (s.f.).

<https://www.nacion.com/economia/sector-exportador-teme-perdidas-diarias-por-1/73ZHAQ2BYVDLLF56IHSFVH2M7Y/story/>. (s.f.).

<https://www.slideshare.net/wienropinzon/iesna-lighting-handbook-62151168>. (s.f.).

# Apéndices

## Entrevistas

### Entrevista a Mario Morales

#### (Funcionario del área de diseño y construcción de alumbrado público de la CNFL)

Objetivo de la entrevista: El objetivo de esta entrevista fue conocer algunos fundamentos para poder hacer una evaluación adecuada de luminarias y normas vigentes en el país.

- 1) Se le pregunta a Mario sobre las normas de iluminación usadas en la CNFL

Respuesta: Jeyson, en estos momentos no hay normas de iluminación para exteriores en Costa Rica, la que se encuentra vigente es INTECO pero solo funciona para interiores, lo cual no nos sirve para nada en nuestra área.

- 2) Se le pregunta a Mario de dónde se toman los valores y criterios de diseño para exteriores.

Respuesta: Como le decía, no existen normas para exteriores, por lo que nosotros nos valemos de distintas normas para justificar los valores que imponemos en los diseños de iluminación exterior, ya sea en vías públicas, parques o en este caso túneles.

- 3) Se le pregunta sobre las tecnologías de iluminación usadas en la CNFL.

Respuesta: Jeyson en estos momentos solo se está comprando tecnología LED y solo se está instalando tecnología LED.

- 4) Se le pregunta a Mario por qué solo se está comprando LED, si es por modernizar, por ahorro energético o por alguna razón en especial.

Respuesta: Jeyson, en realidad por todas las razones anteriores que usted menciona y además una fundamental, que es que la tecnología de lámparas de vapor de sodio de alta presión es una tecnología que

va de salida. En este momento las empresas ya no dan garantías de repuestos durante 10 años como solicitamos. a diario nos mencionan que son tecnologías obsoletas o en un dado momento todo tiene que pasarse a tecnología LED. Yo sé que usted está con su tesis para comparar estas dos tecnologías pero en estos momentos conseguir fotometrías para diseño de tecnología de sodio está muy difícil, ya que no se están vendiendo más.

- 5) Se le pregunta a Mario sobre cuáles criterios se deberían tomar en cuenta para la escogencia de una luminaria de este tipo.

Jeyson, hay muchos criterios de los cuales hay que darle prioridad a las eficiencias y lúmenes de la luminaria; esto debido a que sin esto la luminaria no estaría cumpliendo con la norma. Para una aplicación tan específica como lo es el túnel Zurquí yo recomendaría un rango de lúmenes de entre 30 000 y 50 000 lúmenes y una eficiencia ojalá mayor de 99 Lm/w, ya que son condiciones que sí podrá encontrar en el mercado, y luminarias bajo estas condiciones no se adaptan a un proyecto de este tipo.

### **Entrevista a vendedor y diseñador (anónimo)**

#### **(Colaborador de empresa fabricante de luminarias Sylvania)**

Objetivo de la entrevista: El objetivo de esta entrevista fue conocer el mercado por medio de una empresa fabricante de luminarias para poder verificar la existencia las tecnologías led y vapor de sodio de alta presión

- 1) Se le pregunta si se tienen luminarias para túneles en Sylvania.

Respuesta: Buenas tardes, Ing. Jeyson, claro que tenemos luminarias para túneles. Tenemos de varios modelos y potencias. Podríamos ver sus requerimientos y brindarle asesoría sobre su proyecto.

- 2) Se le indica al colaborador de Sylvania que es para un proyecto de tesis y queremos realizar una comparación entre tecnologías LED y de vapor de sodio de alta presión, a lo cual responde lo siguiente:

Respuesta: Jeyson, con gusto le podemos brindar modelos en tecnología LED. En sodio de alta presión tenemos modelos de luminaria pero ya no se están vendiendo, o se venden para proyectos muy específicos, ya que todo se está migrando a tecnología LED por su vida útil y eficiencia; además de que los estándares de construcción son más estrictos y, dependiendo del túnel, son condiciones muy adversas para tecnologías viejas como la de vapor de sodio.

### **Entrevista a Elena Amuy Jiménez**

#### **(Jefa de la unidad de alumbrado público de la CNFL)**

Objetivo de la entrevista: El objetivo de esta entrevista fue abordar el tema de recuperación financiera y cómo respaldar un proyecto de una suma tan importante, económicamente hablando.

- 1) ¿Se le pregunta a doña Elena cómo se puede justificar financieramente una inversión para la compra de luminarias?

Respuesta: Buenos días, Jeyson, estas inversiones de origen público por lo general no tienen una rentabilidad económica, no existe una justificación financiera para elaborar un proyecto de este tipo, no son rentables.

- 2) ¿Se le pregunta a doña Elena que cómo se puede justificar una inversión de este tipo, si no se puede justificar financieramente?

Respuesta: La justificación está en que es un proyecto económico-social. Se tienen que visualizar las afectaciones a las comunidades o, en este caso, a las personas o conductores que pasan por el túnel Zurquí.

¿Qué sucede si no existe alumbrado público en un túnel de una ruta tan importante como la ruta 32? Nosotros garantizamos el bienestar de las comunidades por medio de un proyecto como este. Se realiza un análisis de todos los factores o efectos que pueden provocar una iluminación deficiente en esta ruta.

### **Entrevista a Marlon Fernández Cordero**

#### **(Técnico del taller de alumbrado público de la CNFL)**

Objetivo de la entrevista: el objetivo de esta entrevista fue conocer la perspectiva en cuanto luminarias de tecnología LED y luminarias de tecnologías de vapor de sodio de alta presión, de los técnicos que realizan reparaciones en las luminarias del sistema de alumbrado público en toda el área servida por la CNFL.

- 1) Se le pregunta a Marlon que cuáles son las diferencias básicas que percibe entre las tecnologías de vapor de sodio de alta presión y la tecnología LED

Respuesta: Bueno, Jeyson, en primer lugar las luminarias de sodio son mucho más pesadas que las LED. Además, estas lámparas tienen muchas pérdidas de energía que al final se transmiten en calor. Un difusor LED no se calienta tanto como el de una lámpara de sodio, y también las lámparas de sodio tienen mayor tamaño, por lo cual el espacio para almacenarlas debe ser más amplio.

- 2) Se le pregunta qué tan frecuentemente repara estas tecnologías en el taller.

Respuesta: las luminarias de vapor de sodio de alta presión todos los días se reparan en el taller de alumbrado; las luminarias LED muy poco; además, las LED que vienen al taller regularmente es por fallas de fábrica y se le manda al fabricante para validar la garantía.


- 3) Se le pregunta a Marlon si en el taller se le da trazabilidad a una luminaria.

Respuesta: Claro, Jeyson, en el taller se registra la fecha de entrada de cada luminaria y cuando vuelve se registra lo que se le reparó y demás; esto gracias a la marca única de cada luminaria, el número de luminaria.

- 4) Se pregunta cuánto es lo aproximado que dura una luminaria de sodio en la calle antes de volver al taller por algún tipo de reparación

Respuesta: Aproximadamente de tres a cinco años es lo más que dura una luminaria sin ingresar al taller. Después de los cinco años es muy probable que falle una luminaria de sodio. Por eso ahora la compañía solo está comprando luminarias LED.




Cotizaciones


**Codelec** ilumina tus ideas

---

Luminaria	Cantidad	PRECIO FOB, Hungría C/U	SUBTOTAL FOB, Hungría
OMNISTAR 2259 144 Cree XP-G2 1000mA WW 347232 Flat Glass Frosted - EF		€ 1.192,80	

**NOTAS:**  
 Todos los precios indicados son en Euros, firmes y válidos por 30 días.  
 Plazo de entrega: 60 a 75 días aproximadamente.  
 Garantía del fabricante: 24 meses contra defectos de mano de obra y materiales.

Atentamente,  
  
 CODELEC  
 Tel:   
 Email: 




Figura N.º 34 Cotización Luminaria OMNIstar

Fuente: CODELEC


LUMGATE 347 2DI/2DOR/1AO **USD 299,00 por cada luminaria**

Cables y conectores para **telegestión** (dimerización) en USD 1 de cada tipo por luminaria

QPD T 4PE6,0 BK	\$ 86
MCLDC-M7M1 M7F1-2P05-PH12	\$ 71
MPLDC-Q5P6 Q5P6-4X60-PS-PH120	\$ 67
MPLBC-Q5P6 Q4P2-2X25-PH120	\$ 49
SPLDC-Q5P1 Q5P1-5X10-PH120	\$ 41

No incluye los Armarios o tableros, Controladores (2) ATS ni el sistema de Control TCS.

Lo saluda, atentamente,






Figura N.º 35 Cotización tele gestión Luminaria OMNISTAR

Fuente: CODELEC



Buenas tardes,  
De acuerdo a lo que hemos conversado, te dejo el precio preliminar la luminaria:

TULL-160L700-730-G1-R2M-UNV-DMG-SV-GY3



\$ 1 588 ; puestas en Almacén Fiscal

Philips me comenta lo siguiente:  
*Te adelanto que no está disponible con CRI 80 para esta aplicación pues un túnel o vía pública va muy bien con CRI de 70*

De igual forma estamos haciendo las consultas pertinentes a los demás fabricantes, para saber si el estándar en alumbrado de túneles va por los 80 CRI o bien, los 70 CRI es valor de mercado; esto pensando en lo que ustedes comentaban, que al final deben especificar una luminaria disponible en el mercado y no algo disparatado,

www.energyscr.com

SC-CER295191  
Sistema de Gestión certificado bajo la norma ISO 9001:2015  
Imprimir solo en caso de ser necesario, cuidemos el medio ambiente

Figura N.º 6 Cotización Luminaria TunnelView LED

Fuente. Energys

## Fotografías del túnel Zurquí



*Figura N.º 37 Fotografía del exterior del Túnel Zurquí de día*

*Fuente propia*



*Figura N.º 38 Fotografía del interior del Túnel Zurquí de día*

*Fuente propia*



*Figura N.º 39 Fotografía del interior del Túnel Zurquí de día*

*Fuente propia*



*Figura N.º 40 Fotografía del túnel Zurquí de noche*

*Fuente propia*

## Fichas técnicas de luminarias


OMNIstar   CARACTERÍSTICAS		Schröder 	
<b>INFORMACIÓN GENERAL</b>			
Altura de instalación recomendada	8 m a 45 m   26" a 150"		
Driver incluido	No		
Marca CE	Sí		
Certificado ENEC	Sí		
Certificado UL	Sí		
Conformidad con RoHS	Sí		
Norma del ensayo	LM 79-80 (todas las mediciones en laboratorio certificado según ISO17025)		
<b>CARCASA Y ACABADO</b>			
Carcasa	Aluminio inyectado a alta presión		
Óptica	Lentes de PMMA (LensoFlex®2) Lentes de silicio (LensoFlex®2/BlastFlex™) Reflectores de aluminio (ReFlexo™)		
Protector	Vidrio liso (esmerilado opcional)		
Acabado de la carcasa	Recubrimiento de polvo de poliéster		
Color	Gris AKZO 900 enarenado Cualquier otro color RAL bajo pedido		
Grado de hermeticidad de la unidad óptica	IP 66		
Grado de hermeticidad de la caja de auxiliares	IP 66 (OMNIbox) - IP 65 (armario)		
Resistencia a los impactos	IK 08		
Pruebas de vibración	IEC 60068-2-6 modificada		
Cumplimiento de la seguridad contra lanzamiento de balones	DIN18 032-3:1997-04 según EN 13 964 Anexo D.		
Cumplimiento a prueba de explosiones	IECEX/ATEX según EN 60079 TUV 16 ATEX 7895 X Ex II 3 G Ex nR IIC T4 Gc TUV 16 ATEX 7896 X Ex II 2 D Ex tb IIIC T100°C Db IECEX TUR 16.0037X		
<b>INFORMACIÓN ELÉCTRICA</b>			
Clase eléctrica	Clase I o II UE - Clase 1 EE. UU.		
Tensión nominal	220-240 V - 50-60 Hz 120-277 V - 50-60 Hz 347-480 V - 50-60 Hz		
Factor de potencia	>90% a plena carga		
Protección contra sobretensiones	Rango 230-400 V: 10 kV Rango 120-277 V: 20 kV Rango 347-480 V: 20 kV		
Compatibilidad electromagnética (CEM)	EN 55015:2013/A1:2015, EN 61000-4-2, -3, -4, -5, -6, -8, -11:2014, EN 61000-3-2, -3:2013		
Opciones de control	Sin regulación, regulación personalizada, DALI, 0-10 V o DMX		
Casquillo NEMA	7 pines (opcional)		
<b>INFORMACIÓN ÓPTICA</b>			
Temperatura de color de los LED	3.000 K (blanco cálido) 4.000 K (blanco neutro) 5.700 K (blanco frío)		
Índice de reproducción cromática (CRI)	>70 (blanco neutro o frío) >80 (blanco cálido) >85 (blanco frío)		
<b>CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO</b>			
Rango de temperatura de funcionamiento (Ta)	-30 °C a +55 °C (°) -22 °F a 131 °F (°)		
°) En función de la configuración y la corriente de funcionamiento. Para más información, póngase en contacto con nosotros.			
<b>VIDA ÚTIL DE LOS LED A TQ 25 °C</b>			
Hasta 700 mA	100.000 h - L85		
De 701 mA a 1,2 A	90.000 h o 115.000 h - L70		

Figura #41 Ficha técnica de OMNIstar

Fuente: CODELEC

### LED Lumen Values - 3000K

Ordering Code	DK		R2M		R3M		R3W		4		5		SN		CBL		TW2	
	Lumen Output	Efficacy (LPW)	Lumen Output	Efficacy (LPW)	Lumen Output	Efficacy (LPW)	Lumen Output	Efficacy (LPW)	Lumen Output	Efficacy (LPW)	Lumen Output	Efficacy (LPW)	Lumen Output	Efficacy (LPW)	Lumen Output	Efficacy (LPW)	Lumen Output	Efficacy (LPW)
TULL-96L350-730	12984	129	12716	126	12455	123	12374	123	12289	122	12063	120	13271	131	13088	130	12804	127
TULL-96L530-730	18850	122	18460	119	18083	117	17965	116	17842	115	17542	113	19267	124	19001	123	18589	120
TULL-96L700-730	23864	113	23371	110	22893	108	22744	107	22588	107	22208	105	24392	115	24055	114	23533	111
TULL-96L1050-730	32830	102	32152	100	31495	98	31290	97	31075	97	30552	95	33558	104	33094	103	32376	101
TULL-128L350-730	17329	126	16971	123	16624	120	16516	120	16403	119	16127	117	17713	128	17469	127	17089	124
TULL-128L530-730	24987	119	24471	117	23970	114	23814	113	23651	113	23253	111	25540	122	25188	120	24641	117
TULL-128L700-730	31605	112	30952	110	30319	108	30122	107	29915	106	29412	105	32305	115	31859	113	31167	111
TULL-128L975-730	41440	109	40584	107	39753	105	39495	104	39224	103	38564	101	42357	111	41773	110	40866	108
TULL-160L350-730	21577	127	21131	124	20699	122	20564	121	20423	120	20079	118	22054	130	21750	128	21278	125
TULL-160L530-730	31112	120	30469	117	29846	115	29651	114	29448	113	28953	112	31801	123	31362	121	30681	118
TULL-160L700-730	39226	112	38416	109	37629	107	37385	106	37128	106	36504	104	40094	114	39541	112	38682	110
TULL-160L925-730	48224	105	47228	103	46262	101	45961	100	45645	99	44878	98	49292	107	48612	106	47556	104

Figura N.º 42 Ficha técnica luminaria Philips

Fuente: Enersys

### Configuraciones disponibles

available configurations

Código Code	Descripción Description	Potencia (W) Power	Flujo luminoso (lm) Luminous flux	Eficacia (lm/W) Efficacy	Temp. color (K) Color temp.	Peso (kg) Weight
P26606	Ultra Flat LED HB	100	9000	≥90	5700	3,9
P26607	Ultra Flat LED HB	150	13500	≥90	5700	5,7
P26608	Ultra Flat LED HB	200	18000	≥90	5700	6,6

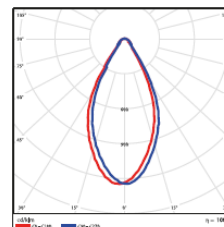
### Resumen de rendimiento

Performance summary

Ángulo de apertura / <i>Beam angle</i>	60°
Índice de reproducción color / <i>Color rendering index</i>	≥70
Capacidad de atenuación / <i>Dimming capability</i>	No
Tensión de operación / <i>Input voltage</i>	240 V
Frecuencia de operación / <i>Operating frequency</i>	50 / 60 Hz
Factor de potencia / <i>Power factor</i>	>0,95
DAT en corriente / <i>THD in current</i>	≤20%
Rango de Temp. de Operación / <i>Operation Temp. Range</i>	-25°C a +45°C
Vida útil / <i>Lifespan</i>	L70 = 50 000 horas (85°C)

### Curva fotométrica

photometric curve



Ultra Flat LED HB 200W 18000 lm

Figura N.º 43 Ficha técnica luminaria Sylvania

Fuente. Sylvania

<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA LUMINARIA</b>			
<b>ÍTEM</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>		
1	Fabricante	CELSA S.A.S	
2	Referencia	<b>ALON</b>	
3	Norma de fabricación	IEC 60598-1 IEC 60598-2-3	
4	País de Fabricación	Colombia	
5	Potencia nominal de la luminaria	<b>400W Na</b>	
6	Bombilla	<b>Tubular</b>	
7	Tensión nominal	120...277 V	
8	Cuerpo de la luminaria	Inyección de aluminio	
9	Acabado	Pintura en polvo electrostática horneable con protección U.V., para uso a la intemperie	
10	Para uso a la intemperie	Si	
11	Grado de protección (IP)	Conjunto óptico	66
		Conjunto eléctrico	66
12	Grado de protección (IK)	Vidrio	08
		Carcasa	09
13	Conjunto eléctrico	Balasto	INADISA Balasto Tipo Reactor 400W Na 208/240V
		Ignitor	INADISA Tipo Superposición
		Condensador	INADISA Tipo Seco 45 µF
14	Montaje del conjunto eléctrico sobre plato de montaje	SI	

*Figura N.º 44 Ficha técnica luminaria Celsa*

*Fuente: Celsa*




	<p><b>CRX204</b></p> <p>1 x SON-T / E27 / 70 W</p> <p><b>1 x SON-T / E40 / 100, 150, 250, 400 W</b></p> <p>1 x MASTER QL system / 55, 85 W</p> <p>1 x MASTER PL-L 4 Pin / 2G11 / 36, 55 W</p> <p>1 x SOX / BY22d / 35, 55, 90 W</p> <p>1 x SOX-E / BY22d / 26, 36, 66 W</p> <p>CRX206</p> <p>2 x SON-T / E27 / 70 W</p> <p>2 x SON-T / E40 / 100, 150, 250, 400 W</p> <p>2 x MASTER QL system / 55, 85 W</p> <p>2 x MASTER PL-L 4 Pin / 2G11 / 36, 55 W</p> <p>2 x SOX / BY22d / 35, 55, 90 W</p> <p>2 x SOX-E / BY22d / 26, 36, 66 W</p> <p>1 x SOX / BY22d / 135, 180 W</p> <p>1 x SOX-E / BY22d / 91, 131 W</p>	<p>two levels in the extruded aluminum frame</p> <p>A removable optic and gear unit consists of a dedicated optical system of high-purity anodized aluminum (99.9 %) and an electrical part containing all electrical gear. These modular units are easily interchangeable without the need for tools, which simplifies installation and maintenance</p> <p>Mounting brackets, bolts and washers (as accessories): stainless steel</p> <p>Nylon washers between the aluminum profile and stainless-steel bracket to prevent electrochemical corrosion</p>
Lamp included	No	
Gear and compensation	<p>Electro magnetic (low loss), 230 V / 50 Hz:</p> <p>Parallel compensated (IC)</p> <p><b>Electronic, 220 - 240 V / 50 Hz:</b></p> <p>Electronic (EB) for Master PL-L / QL and SOX(-E) lamps</p>	<p>Freedom and flexibility of mounting by means of quick-to-fit suspension brackets and special profiles over all sides of housing</p> <p>Glass-fiber-reinforced polycarbonate knobs (1/4 turn) for tool-less opening and closing of the front glass</p> <p>Quick-fastening devices for tool-less securing of the optic and gear unit</p> <p>Plug-and-socket connection for cables to the optic and gear unit</p> <p>Cable gland and a terminal block for wires up to 3 or 5 x 1.6 mm<sup>2</sup> per lamp</p>
Optic	Range of beams for tunnel lighting (T1 to T10)	
Ignitor	Semi-parallel (SP)	
	Semi-parallel, self-stopping (ST)	Accessories
Cable gland	<p>Cable gland 1 x PG 16 mm (1PG16)</p> <p>Cable gland 2 x PG 16 mm (2PG16)</p> <p>Cable gland 4 x PG 16 mm (4PG16)</p> <p>Cable gland 1 x PG 21 mm (1PG21)</p> <p>Cable gland 2 x PG 21 mm (2PG21)</p> <p>Cable gland 4 x PG 21 mm (4PG21)</p>	<p>Set of four brackets for ceiling mounting, ZRX208</p> <p>Set of two tilt-adjustable brackets for wall mounting, ZRX209</p> <p>Set of two brackets for continuous line mounting, ZRX210</p>
Options	<p>Dimming gear, self-stopping ignitor, fuse (10 x 38 mm<sup>2</sup>) and through-wiring</p> <p>Entrelec™ terminal block for 2 x 2.5 to 6 mm<sup>2</sup> wire with or without fuse 5 x 20 mm<sup>2</sup> (optional)</p> <p>All units equipped with 230 V / 50 Hz gear. Other voltages and frequencies optional</p>	<p>Remarks</p> <p>The luminaires are approved in accordance with IEC 60598-1/2-3</p>
		Main applications
		Tunnels, underpasses
		<p> optional for SON-T lamps <b>IP00 IK09</b></p> <p> </p>

Figura N.º 45 Ficha técnica Luminaria Philips de sodio

Fuente: Catalogo Philips

# OMNIstar



Figura N.º 46: Luminaria LED OMNIstar





Figura N.º 47: Luminaria LED TunnelView

Fuente: Enersys



*Figura N.º 8 : Luminaria LED Ultraflat*

*Fuente: Sylvania*

	<p>FICHA TÉCNICA</p>
<p>LUMINARIA QUASARLED</p>	

*Figura N.º 49: Luminaria LED Quasarled*

*Fuente: Celsa*



*Figura N.º 50: Luminaria Celsa de Sodio*

*Fuente. Celsa*



*Figura N.º 51: Luminaria Philips de Sodio*

*Fuente: Catalogo Philips*

## Distribucion de luminarias

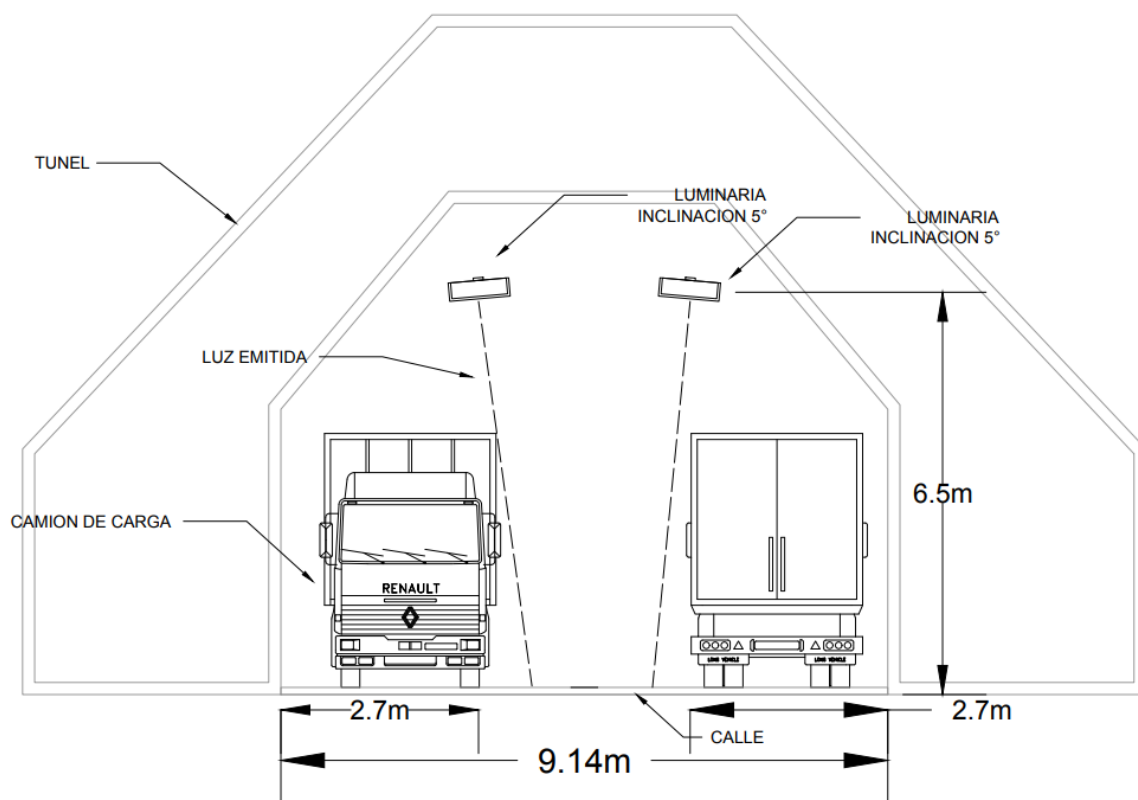


Figura N.º 52, Distribución de luminarias vapor de sodio de alta presión Tunlite

Fuente propia

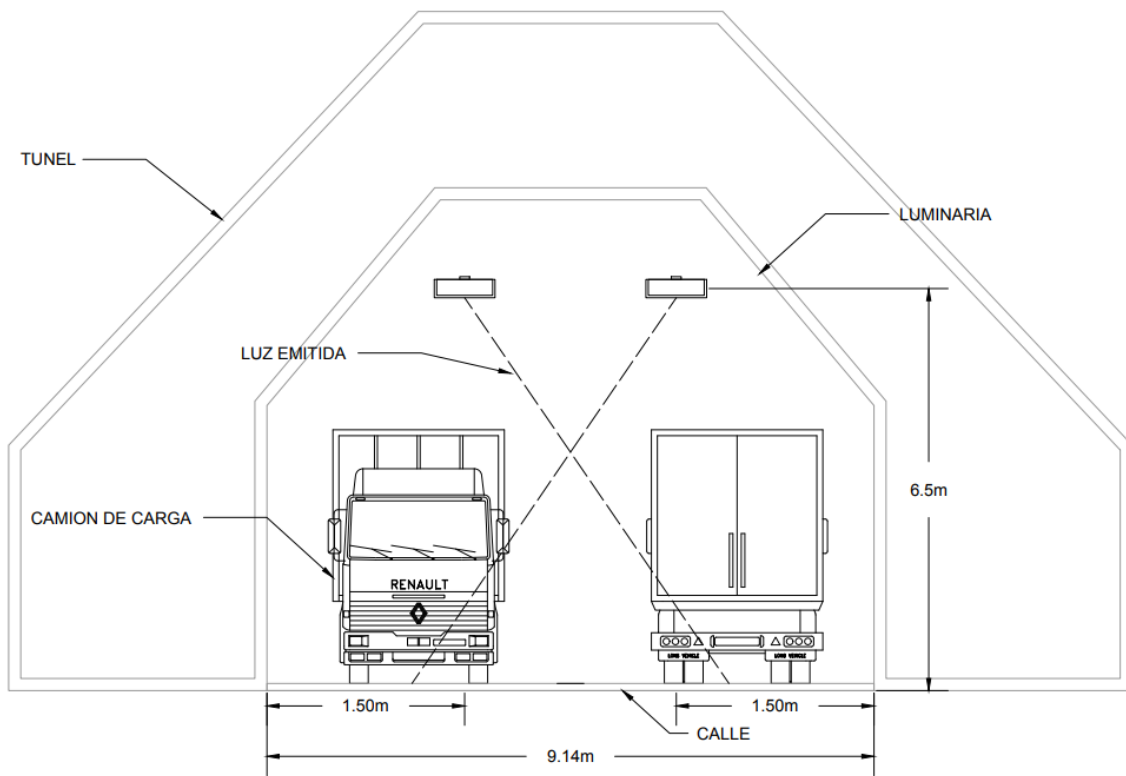


Figura N.º 53. Distribución de luminarias LED Philips TunnelView

Fuente propia

## Renders y colores falsos

Proyecto tesis

26/6/2019

# DIALux

Proyecto tesis / Vistas

Proyecto tesis

Colores Falsos, Luminancias en [cd/m<sup>2</sup>]

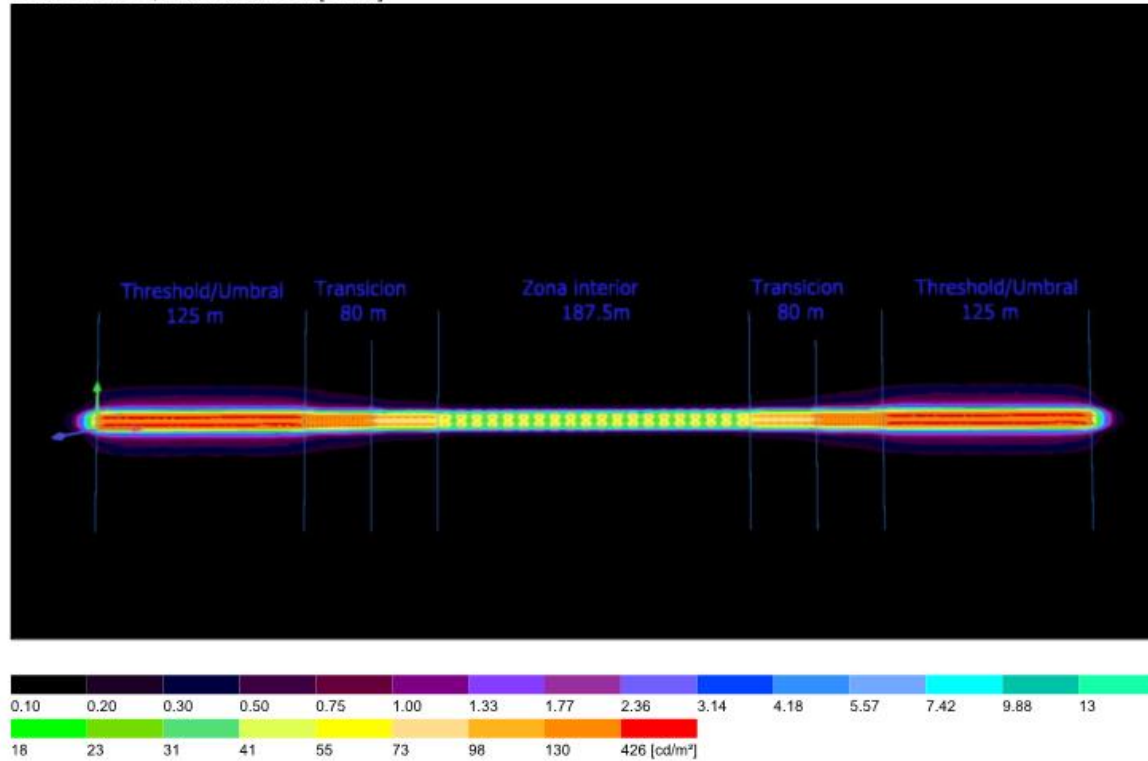
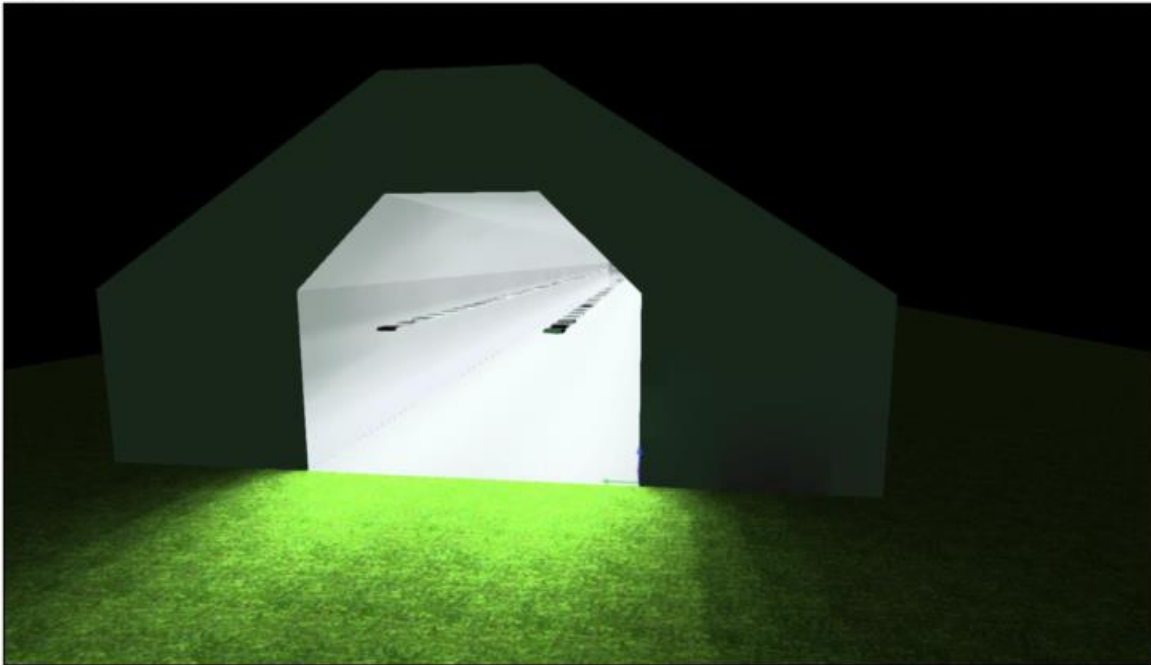


Figura N.º 54. Colores falsos en todas las zonas del Túnel Zurquí

Fuente propia

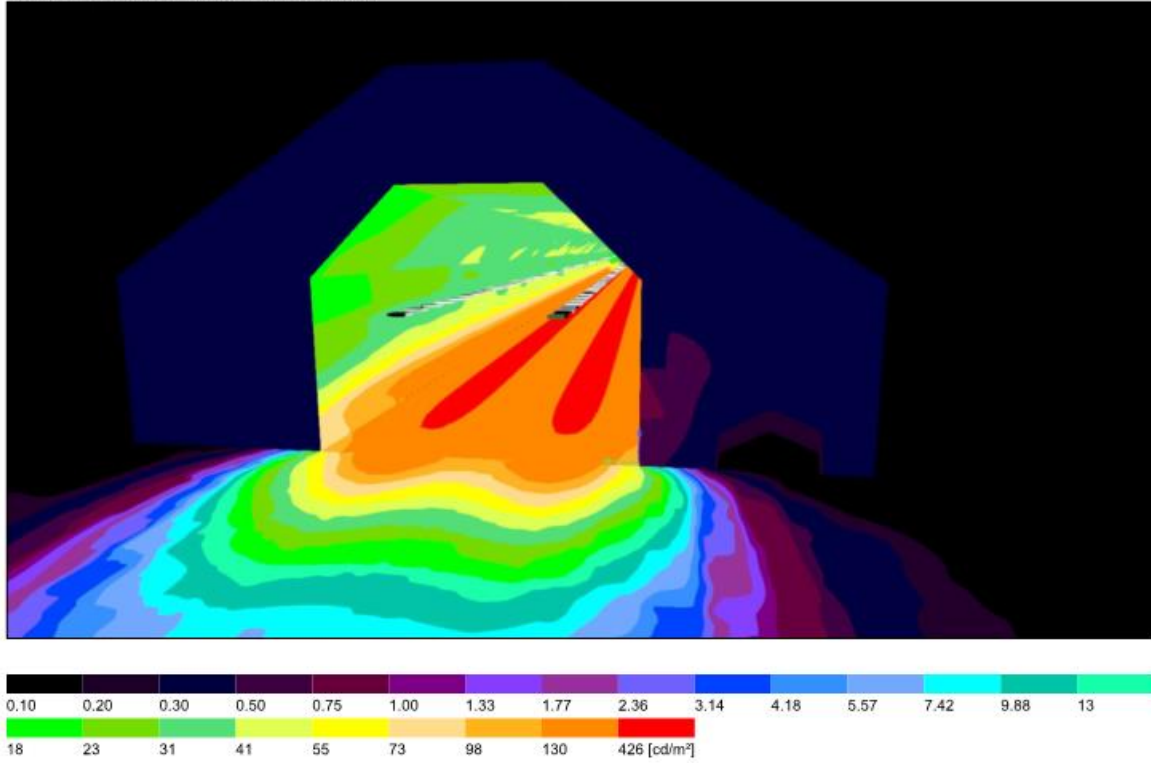
Render



*Figura N.º 55. Render del Túnel Zurquí*

*Fuente propia*

Colores falsos, Luminancias en [cd/m<sup>2</sup>]



*Figura N.º 56. Colores falsos en zona de entrada al Túnel Zurquí*

*Fuente propia*