

AHORRO ENERGÉTICO EN ILUMINACIÓN DE TÚNELES POR CAMBIO DE TECNOLOGÍA, ANÁLISIS TÉCNICO – FINANCIERO: TÚNEL SAN RAFAEL, LA PAZ- BOLIVIA

**ENERGY SAVING IN TUNNEL LIGHTING EXCHANGE OF TECHNOLOGY,
 TECHNICAL - FINANCIAL ANALYSIS: TÚNEL SAN RAFAEL, LA PAZ- BOLIVIA**

Carlos Eduardo Andrade Mallea*
 Eduardo Pablo Andrade Catacora**

RESUMEN	ABSTRACT	RESUMO
Se presenta el resultado de una comparación técnico-financiera, sobre el efecto que tendría el cambio hacia una tecnología LED en el campo lumínico para el alumbrado de túneles, donde la iluminación es imprescindible para asegurar el sostenimiento de la percepción visual de los usuarios durante todo su recorrido y en todas las circunstancias de luminosidad diurna y/o nocturna, condiciones climáticas y atmosféricas. La comparación del efecto lumínico entre las lámparas de alta presión de vapor de sodio (en actual uso) y el uso de módulos de red diodos LED (cambio tecnológico), en la zona de alumbrado permanente del túnel San Rafael (vía Cotapata-Santa Bárbara, departamento de La Paz-Bolivia), establece aproximadamente un ahorro del 27 por ciento en consumo energético y de un 14,3 por ciento económico monetario.	The result of a technical-financial comparison is presented, on the effect that the change would have towards an LED technology in the light field for tunnel lighting, where lighting is essential to ensure the maintenance of the user's visual perception throughout its route and in all circumstances of day and / or night light, weather and atmospheric conditions. The comparison of the light effect between high-pressure sodium vapor lamps (in current use) and the use of LED diode network modules (technological change), in the permanent lighting area of the San Rafael tunnel (via Cotapata-Santa Bárbara, departamento de La Paz-Bolivia), it establishes approximately a of 27 percent in energy consumption and a 14,3 percent monetary economic.	O resultado de uma comparação técnico-financeira é apresentado, com o efeito que a mudança teria em relação a uma tecnologia LED no campo de luz para iluminação de túneis, onde a iluminação é essencial para garantir a manutenção da percepção visual do usuário durante todo o processo, sua rota e em todas as circunstâncias de brilho diurno e / ou noturno, clima e condições atmosféricas. A comparação do efeito da luz entre lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão (em uso atual) e o uso de módulos de rede de diodos de LED (mudança tecnológica), na área de iluminação permanente do túnel de San Rafael (via Cotapata-Santa Bárbara, departamento de La Paz-Bolivia), estabelece aproximadamente 27% de economia no consumo de energia e 14,3% em economia monetária.
PALABRAS CLAVE: Iluminación, luminaria, LED, túnel, flujo luminoso, iluminancia, luminancia.	KEYWORDS: Lighting, luminaire, LED, tunnel, luminous flux, illuminance, luminance.	PALAVRAS-CHAVE: Iluminação, luminária, LED, túnel, fluxo luminoso, iluminação, luminância.
History of the article: Received 07/11/2019. Style review 08/11/2019. Accepted 12/11/2019.		

INTRODUCCIÓN

En la traslación propia o a través de la conducción de vehículos rodantes, mantener una visibilidad permanente que permita la identificación inmediata de obstáculos sobre la superficie rodante, es parte del traslado seguro de las personas, ya sea a plena luz del día, en la noche o en lugares oscuros donde se acude a sistemas artificiales de iluminación.

Caso especial se presenta en obras civiles subterráneas o a través del interior de montañas que sirven para unir el transporte entre dos puntos, conocidos como túneles, donde por la ausencia de luz natural es necesario instalar sistemas permanentes de alumbrado¹ artificial para lograr una máxima seguridad, confort visual, eficiencia, bajos costos de operación y mantenimiento.

Por lo que la conducción de vehículos a través de túneles durante las horas diurnas plantea una problemática diferente a la conducción en condiciones externas y al aire libre, principalmente por las diferencias existentes entre los elevados niveles de luminancia exteriores y los bajos niveles de luminancia (brillo fotométrico a la luz procedente de los objetos) en el interior de los túneles.

Así, el alumbrar los túneles busca garantizar que el tráfico existente durante el día y la noche puedan aproximarse, atravesar y salir de un túnel a la velocidad apropiada, con un grado de seguridad y confort en proporción con el de los tramos de la carretera troncal.

Túnel San Rafael



Crédito: CE. Andrade M. 2019

Ingreso túnel San Rafael



Crédito: CE. Andrade M. 2019

Alumbrado interior

Este túnel de 1374 m de longitud, está ubicado entre la carretera Cotapata-Santa Bárbara, departamento de La Paz, tiene 14 km de línea de transmisión para 24,9 kW, conectada con la subestación Pichu. La velocidad máxima permitida en el túnel es de 40 km.h⁻¹.

Actualmente el sistema de alumbrado al interior del túnel, está constituido por una serie sistemática de puntos fijos donde se instalaron lámparas de vapor de sodio². Objeto de estudio sobre el cual, se plantea la sustitución de estas lámparas por redes de diodos LED.

En consecuencia, en el presente artículo se presenta una comparación técnico-financiera, del efecto que generaría el cambio e incorporación de esta nueva tecnología de alumbrado para la zona permanente que se extiende a lo largo del túnel.

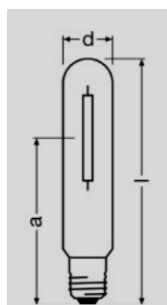
¹ Conjunto de luces que alumbran algún sitio.

² Lámparas que usan vapor de sodio para producir luz monocromática amarilla brillante. Actualmente muy utilizadas para el alumbrado vial por su rendimiento luminoso (mayor cantidad de lúmenes por vatio).

DESARROLLO

Lámparas de la zona permanente

OSRAM VIALOX NAV-T 4Y (SON-T) 150W, de vapor de sodio a alta presión. Estas lámparas son sujetadas dentro de armaduras modelo 5NA 095 simétrica, e insertadas en estructuras metálicas con soporte para el cableado. Todas estas unidades de alumbrado artificial están colocadas en el techo (altura 5,82 m), a determinada distancia entre éstas y a lo largo del túnel.



OSRAM VIALOX NAV-T 4Y

d= diámetro (mm): 47,0
l= largo (mm): 210,0
a= largo al centro luminoso (mm): 132,0

Características eléctricas

Potencia nominal:	150 W
Tensión nominal	100 V
Corriente de construcción:	1,0 A
Eficacia de la lámpara (condición estándar):	115 lm.W ⁻¹
Capacitor de corrección factor potencia a 50 Hz:	20 µF (voltaje nominal y cos Φ ≥ 0,9)

Características técnicas de iluminación

Flujo luminoso nominal:	15000 lm
Grupo de reproducción de color:	4
Color de temperatura nominal:	2000 K
Índice de reproducción de color nominal Ra:	17
Luminancia:	280 cd.cm ⁻²
Factor mantenimiento de depreciación luminica a:	2000 h: 0,95
	4000 h: 0,93
	6000 h: 0,92
	8000 h: 0,89
	12000 h: 0,87
	16000 h: 0,86

Fuente: Elaboración propia extractada de www.osram.com/ecat/VIALOXNAV-T-High-pressure-sodium.

El diagrama espectral de la lámpara, al igual que la mayoría de lámparas del tipo descarga a alta presión, tienen una tendencia a reproducir las frecuencias más cercanas a los 600 nm pertenecientes al naranja rojizo.

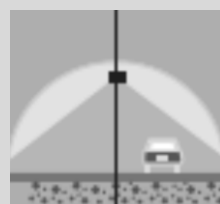
Por otra parte las lámparas utilizadas en el túnel requieren un balasto para funcionamiento y un ignitor de encendido para la compensación eléctrica, por lo tanto, este sistema de alumbrado requiere para su funcionamiento accesorios adicionales.

Elección de luminarias LED

Aplicando la norma CIE 088 2004 (Guide for the lighting of road tunnels and underpasses³), internacionalmente aceptada y considerando que bajo su revisión anterior fue diseñado el sistema original de alumbrado del túnel San Rafael, y manteniendo la bandeja que permite el tendido de cables y la sujeción de las luminarias. Además de haber efectuado los estudios luminotécnicos de:

contraste, luminancia, iluminación, deslumbramiento, efecto flicker entre otros, para ratificar o modificar los requerimientos de iluminación al interior del túnel, se ha determinado lo siguiente:

- Para el alumbrado de la zona permanente dispuesta a lo largo del túnel, se eligió la sustitución por módulos sencillos red de diodos LED⁴ Carandini T-Max L154, recomendada por la norma CIE 088 que proporcionarían una iluminancia⁵ superior a la emitida por lámparas de vapor de sodio a alta presión y potencia 150 W.



Iluminación de techo con óptica simétrica.L6L6



Módulo sencillo red de diodos LED Carandini T-Max L154

Características eléctricas

Potencia real:	100 W
Tensión nominal	220 V
Corriente de funcionamiento:	0,5 A
Factor de potencia:	>0,9

Características técnicas de iluminación

Flujo luminoso nominal:	15000 lm
Eficiencia luminosa:	134 lm.W ⁻¹
Grupo de reproducción de color:	4
Color de temperatura nominal:	4000 K (blanco neutro)
Índice de reproducción de color nominal:	70
Distribución óptica:	Apertura longitudinal 70°, transversal simétrica ancha 40°
Temperatura de funcionamiento:	-40 a 50°C

Otras características

Caja porta equipo:	Si
Grado de protección:	IP66
Protección contra impactos:	IK09
Peso:	6,48 kg
Iluminación variable:	No
Conexión:	3 cables (40 cm)
Color del equipo:	RAL 9006 (Gris metalizado)
Fijación:	Z
Protección:	Contra sobretensiones, soldaduras al vacío, válvula de compensación de presiones, eléctrica EPROTEC.
Sistema modular:	Sencillo

Fuente: Elaboración propia extractada de Haloprism | Productos | Carandini www.carandini.com/es/productos/post/haloprism

- Es importante destacar que las luminarias LED escogidas cumplen con las características lumínicas y de eficiencia energética deseada, si embargo, podrían ser remplazadas por cualquier otra marca de similares características.
- El desarrollo de la tecnología SSL Solid State Lighting, y más propiamente del LED Light- Emitting Diode de alta potencia fuente de luz para el alumbrado interior, en sustitución del alumbrado convencional, redundará en la

⁴ LED Light-Emitting Diode, material semiconductor dotado de dos terminales que provoca electroluminiscencia por dos formas: 1) unión P-N que puede proporcionar corriente eléctrica al ser iluminado, 2) unión P-N por la que circula una corriente directa que provoca la emisión de fotones. Esta segunda forma de electroluminiscencia podría definirse como la emisión de luz por un semiconductor cuando está sometido a un campo eléctrico.

⁵ Magnitud que expresa la cantidad de flujo luminoso incidente sobre una superficie por unidad de área. Unidad SI: lux = lm.m⁻².

³ Guía para el alumbrado de túneles y postes de carretera.

eficiencia energética y durabilidad (vida útil aproximada de 100000 horas). Sin embargo, la tecnología LED ofrece parámetros de fábrica (diodo emisor) que no son extrapolables al trabajo de los mismos incorporados en un módulo red de diodos, variando el funcionamiento real de acuerdo con el diseño específico del diodo emisor de potencia y las condiciones de agrupación (red de diodos) en la propia luminaria⁶.

Comparación energética y económica

Las consideraciones están basadas en el tiempo de funcionamiento de las luminarias y la potencia que estas consumen y consumirán durante este tiempo. También se considera la potencia del controlador para el caso más desfavorable (15 porciento) para la nueva tecnología.

a) Potencia, consumo energético y costo alumbrado actual

Las lámparas de vapor de sodio a alta presión en funcionamiento en el túnel, actualmente en sus diferentes potencias, tienen un consumo de energía elevado, ver tabla 1.

Tabla 1
Potencia, consumo energético y costo del alumbrado actual

Tipo	P	N	Pi	H	M	E _{día}	E _{mes}
1*	400	28	11200	10	1,8	201,60	6249,60
2*	250	4	1000	10	1,15	11,50	356,50
3 *	150	64	9600	24	0,9	207,36	6428,16
4*	70	12	840	24	0,5	10,08	312,48
		108	22640			430,54	13346,74

* Inox-Vapor de sodio Super

Referencias:

P = Potencia por unidad (W),
N = cantidad de luminarias,
Pi = Potencia instalada (W),
H = Horas de uso,

M = Intensidad < 10 A,
E_{día} = Energía kWh.día-1 (<10A),
E_{mes} = Energía kWh.mes-1 (<10A)

Ítem	Potencia (kWh)	Factor (kWh)	Costo mes (Bs.)
Cargo por energía (consumo total Iluminación túnel)	13346,74	0,354	4724,75
		Sub total	4724,75
Cargo por potencia de punta	50,00	83,687	4184,35
		Sub total	4184,35
Fuente: Elaboración propia		Gran total	8909,10

b) Potencia, y costo módulos red diodos LED: Ver tabla 2.

Tabla 2
Potencia, y costo del alumbrado módulos red diodos LED

Ítem	Potencia (kWh)	Factor (kWh)	Costo mes (Bs.)
Cargo por energía (consumo total Iluminación túnel)	9742,06	0,354	3448,69
		Sub total	3448,69
Cargo por potencia de punta	50,00	83,687	4184,35
		Sub total	4184,35
Fuente: Elaboración propia		Gran total	7633,04

⁶ Por este motivo, los fabricantes de luminarias LED proporcionan información concisa, real y normalizada, sobre las características y parámetros técnicos de sus luminarias, posibilitando la comparación entre productos de diferentes fabricantes. Por ejemplo la marca Carandini ofrece esta información para la gran familia T • MAX www.carandini.com.

Ahorro energético y económico

Ver tabla 3.

Tabla 3
Comparación energética y económica

	E _{Mes} (kW)	E _{Año} (kW)
Lámparas vapor de sodio	13346,74	160160,88
Lámparas vapor de sodio * y LED	9742,06	116904,72
Diferencia	3604,68	43256,16
Ahorro porcentual energético		27,0%

	C _{Mes} (Bs.)	C _{Año} (Bs.)
Lámparas vapor de sodio	8909,10	106909,15
Lámparas vapor de sodio* y LED	7633,04	91596,47
Diferencia	1276,06	15312,68
Ahorro porcentual económico		14,3%

* Solo para los puntos de descanso

Fuente: Elaboración propia

Proyección de costos

El mayor beneficio económico del cambio a módulos de diodos en red LED, puede evidenciarse en los costos de mantenimiento y reposición de luminarias, esto es porque las luminarias de vapor de sodio tienen un tiempo de vida relativamente corto comparado con la tecnología LED, que se ve afectada por el hecho que las luminarias de la zona permanente deben estar en funcionamiento las 24 horas del día. En consecuencia, para la reposición de las unidades de alumbrado se consideró el tiempo de cuatro años, que es la vida útil media de lámparas de vapor de sodio. Además para efectuar una mejor comparación, se ha considerado lo siguiente:

- **Costos acumulados de cuatro años:** duración nominal (vida útil) lámparas de vapor de sodio.
- **Costos de mantenimiento:** los precios unitarios que sirven para elaborar el presupuesto de operación y mantenimiento del túnel San Rafael, en el caso de la tecnología LED han sido ajustados manteniendo los periodos de intervención.
- **Reposiciones:** en el caso de lámparas de vapor de sodio, se aplica la reposición total debido a que el periodo de análisis es de cuatro años, por no tener datos históricos, no se han considerado reposiciones de los demás elementos de las luminarias (sócalos, ignitores, capacitores fusible). En el caso de la tecnología LED se ha efectuado análisis de fiabilidad y tasa de falla en función de sus características,
- **Cargos por consumos de energía:** se ha considerado solo los referentes al sistema de iluminación y el cargo de potencia de punta para toda la instalación, este último es el mismo en ambos casos.
- **Fallas abruptas o repentinas:** por no tener la suficiente información al respecto, se aceptó el criterio de experiencias externas sobre fallas mayores en las lámparas de vapor de sodio en comparación con los módulos de diodos LED.

a) Costos totales reposición del alumbrado actual

Los costos totales para la reposición de las luminarias actuales, se muestra en la tabla 4.

Tabla 4
Costo total para reposición del alumbrado

Componentes	Nº	Costo Unitario (Bs.)	Costo total (Bs.)
Lámparas vapor de sodio OSRAM			
VIALOX NAV-T4Y	64*	172,00	11008,00
VIALOX NAV-T400 SUPER 4Y	28*	252,00	7056,00
VIALOX NAV-T250 UPER4Y	4*	228,00	912,00
Sócalo lámpara	64*	20,00	1280,00
Alimentador VSI 15/3TE-SC (OSRAM NV-70-01/230V)	64*	120,00	7680,00
Capacitor RBR RI 008HP (MFI-125-250)	64*	25,00	1600,00
Ignitor ELT-AVS-100DP(VS-UNAH 150/100,175) (OSRAM I70-01P)	64*	25,00	1600,00
Fusible de protección	64*	5,00	320,00
Inversión inicial en componentes			31456,00
Costo de mantenimiento	3072**	120,27	369469,44
Reposición de lámparas	64*	150,00	9600,00
Cargo por energía consumo total iluminación túnel	640643,52 ***	0,354	226787,81
Cargo por potencia de punta iluminación túnel	2400 ***	83,687	200848,80
COSTO total (cuatro años)			838162,05

Referencias: * Pieza, ** Punto, *** kWh

Fuente: Elaboración propia

El costo total es elevado, porque estas luminarias se componen de diversas piezas que deben ser revisadas, limpiadas o remplazadas individualmente, aumentando así, los costos de la mano de obra.

a) Costos totales reposición del alumbrado LED

Los costos de las diferentes lámparas LED para el reemplazo de las luminarias actuales, costos de consumo energético y mantenimiento, se indican en la tabla 5.

Tabla 5
Costo total para reposición del alumbrado LED

Componentes	Nº	Costo Unitario (Bs.)	Costo Total (Bs.)
Luminaria LED CARANDINI L-154	69*	591,75	40830,75
Lámpara vapor de sodio (OSRAM VIALOX NAV-T400 SUPER 4Y)	28*	252,00	7056,00
Lámpara vapor de sodio (OSRAM VIALOX NAV-T250 SUPER4Y)	4*	228,00	912,00
Inversión inicial en componentes			48798,75
Costo de mantenimiento	3312**	28,46	94259,52
Reposición de lámparas	4*	591,75	2367,00
Cargo por energía (consumo total iluminación túnel)	467618,88***	0,354	165537,08
Cargo por potencia de punta iluminación túnel	2400***	83,687	200848,80
Costo total (cuatro años)			511811,15

Referencias: * Pieza, ** Punto, *** kWh

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

El tiempo de vida útil de la nueva tecnología es tres veces mayor que el de la tecnología de lámparas de sodio de alta presión. Además su tiempo de vida no se ve afectado por el encendido y apagado del sistema, lo cual si ocurre en la tecnología convencional.

El consumo eléctrico de la tecnología propuesta LED es un 27% menor respecto a las lámparas de sodio de alta presión. Esto se debe a que la iluminación LED es más eficiente y proporciona luz direccionada, además no posee pérdidas altas como las que generan los balastos.

La inversión inicial en módulos diodos en red LED es tres veces mayor que la que requiere la tecnología convencional. Sin embargo el sistema de iluminación convencional en el tiempo resulta más costoso. Por otra parte requiere costos de mantenimiento en el orden de cinco veces menos que la tecnología de iluminación actual del túnel San Rafael, debido a su mayor tiempo de vida, el cual se estima en cinco o más años y además no necesita accesorios adicionales para su funcionamiento.

La tecnología LED puede ser utilizada y remplazar sistemas de iluminación anteriores, ya que sus dispositivos de conexión son compatibles con los previstos en las luminarias existentes, y cumplen con los requisitos técnicos, además de proveer un mayor confort visual y seguridad al conductor que transite por el túnel San Rafael.

BIBLIOGRAFÍA

Comité Español de Iluminación (CEI) a iniciativa del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE),

Manual de iluminación vial, 2015, Secretaría de Comunicaciones y transporte, Dirección General de Comunicación Social - Centro SCOP, 2da edición, México,

Guía de iluminación en túneles e infraestructuras subterráneas, Consejería de economía y hacienda de la comunidad de Madrid, www.madrid.org,

Iluminación de túneles, fcavaller@salvi.es,

Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público RETILAP, 2016, Empresa de Energía de Boyacá S.A. E;S.P, <https://ecolite.com.co>,

Iluminación 3er grado en Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Valencia – España,

Características técnicas T-MAX™ CARANDINI, www.carandini.com/es/productos/post/haloprism

OSRAM, NAV-T 150 W SUPER 4Y VIALOX NAV-T SUPER 4Y, Lámparas de vapor de sodio de alta presión para luminarias abiertas y cerradas, 2019, www.osram.com/ecat/VIALOX,

Manual Operativo de instrucción por la puesta en servicio de la Dirección Eléctrica, Instrumental, Seguridad y control túnel San Rafael, Iluminación túnel, WE WALTER SRL., Viale Toscana 40 20093 cologno Monzese - Milano – Italia.

Fe de autores:

(*), MSc. Ing. Mecánico,
Docente carrera de Mecánica Automotriz,
actual Director IIAT, Facultad de Tecnología – UMSA.

(**), Egresado de Ingeniería Electromecánica.