

**OPTIMIZACIÓN DEL ALGORITMO DE CONTROL DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN
DEL TÚNEL BUENAVISTA DE LA CARRETERA BOGOTÁ - VILLAVICENCIO**

**FARLEY ANTONIO DAZA RAMÍREZ
COD. 02299957**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
BOGOTÁ D.C.
2010**

**OPTIMIZACIÓN DEL ALGORITMO DE CONTROL DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN
DEL TÚNEL BUENAVISTA DE LA CARRETERA BOGOTA - VILLAVICENCIO**

**FARLEY ANTONIO DAZA RAMÍREZ
COD. 02299957**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR TÍTULO DE:
ESPECIALISTA EN ILUMINACIÓN PÚBLICA Y PRIVADA**

Director:

FERNANDO HERRERA

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
BOGOTÁ D.C.**

2010

CONTENIDO

Pág.

0. INTRODUCCIÓN	5
1. OBJETIVO GENERAL	9
1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
2. CONCEPTOS TEÓRICOS	10
2.1 CONFIGURACIÓN DEL ALUMBRADO (CASO TÚNEL BUENAVISTA).....	10
2.2 EQUIPOS DE ALUMBRADO	10
2.3 SENSOR DE LUMINANCIA.....	11
2.4 SENSORES DE ILUMINANCIA	12
2.5 ILUMINACIÓN EN EL INTERIOR DE UN TÚNEL	13
2.5.1 <i>Iluminancia en la noche al interior del túnel</i>	13
2.6 LA ADAPTACIÓN	13
2.7 SISTEMAS DE CONTROL DE ILUMINACIÓN EN LOS TÚNELES BUENAVISTA.....	15
2.7.1 <i>Control On/Off dinámico</i>	15
2.7.2 <i>Equipos para realimentar condiciones de iluminación</i>	16
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
3.1 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA	17
3.2 CONTROL Y SUPERVISIÓN DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN	18
3.2.1 <i>Modo automático del sistema de control de iluminación</i>	19
3.2.2 <i>Falencia en el cumplimiento de la norma CIE 88:2004</i>	20
3.3 CONSUMOS ENERGÉTICOS	22
3.4 CONTROL OSCILANTE SOBRE LA ILUMINACIÓN.....	23
4. METODOLOGÍA DE TRABAJO	25
5. RESULTADOS	26
5.1 RECOPIACIÓN DE DATOS	27
5.1.1 <i>Metodología de medición</i>	27
5.1.2 <i>Resultado de los niveles de iluminación aportados en cada zona por las luminarias de cada circuito</i>	28
5.1.3 <i>Determinación de la luminancia de la zona de acceso L₂₀</i>	29
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	32
6.1 NIVELES DE ILUMINACIÓN DEL TÚNEL BUENAVISTA	32
6.2 CÁLCULOS DE OPERACIÓN	32
6.2.1 <i>Modo noche</i>	32
6.2.2 <i>Modo Día</i>	33
6.2.3 <i>Iluminación de emergencia</i>	37

7. DISEÑO DEL ALGORITMO DE CONTROL	39
7.1 VERIFICACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL NUEVO ALGORITMO.....	45
7.2 ESTIMADO DE AHORROS ENERGÉTICOS	53
7.2.1 <i>Con estados fijos de operación modificados</i>	53
7.2.2 <i>Con estados variables de operación</i>	54
7.3 ALCANCES DE AHORRO ENERGÉTICO PROPUESTOS POR EL PROURE	58
8. CONCLUSIONES	60
9. RECOMENDACIONES	62
10. BIBLIOGRAFÍA.....	63

LISTA DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1. Demanda energética del sistema de iluminación _____</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 2. Secuencia (original) de encendido de la iluminación del túnel Buenavista (>120 Lux)_____</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 3. Secuencia (original) de apagado de la iluminación del túnel Buenavista (<200 Lux)_____</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 4. Longitud de las zonas _____</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 5. Medición de iluminancia aportada en cada zona por las luminarias de los respectivos circuitos de iluminación en el portal TRAPICHE del túnel BUENAVISTA _____</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 6. Máximos de luminancia en el último año en el portal trapiche_____</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 7. Bandas de operación calculadas desde los niveles ofrecidos por cada circuito _____</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 8. Valores de luminancias máximas para el estado Seminublado _____</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 9. Valores de luminancias máximas para el estado Nublado_____</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 10. Valores de luminancias máximas para el estado Nocturno _____</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 11. Operación de los circuitos por zona _____</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 12. Circuitos que no operan en los 3 modos <u>Diurnos</u> _____</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 13. Circuitos adicionales que operan en modo Nocturno _____</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 14. Niveles de operación para un día típico _____</i>	<i>56</i>

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1.	Configuración de iluminación simétrica _____	10
Figura 2.	Sensor de Luminancia. _____	12
Figura 3.	Sensor de Iluminancia. _____	12
Figura 4.	Tiempos de adaptación del ojo humano. _____	14
Figura 5.	Distribución de luminancia en túnel unidireccional. _____	14
Figura 6.	Distribución de luminancia en túnel Bidireccional. _____	15
Figura 7a.	Sistema de control en lazo cerrado para un sistema de iluminación en túneles. _____	16
Figura 7b.	Equipos de control de un sistema de iluminación. _____	16
Figura 8.	Diagramas de bloques del software de control de la iluminación del túnel Buenavista. _____	18
Figura 9.	Curva de luminancia de la CIE 88:2004 _____	20
Figura 10.	Luminancia externa en el túnel BUENAVISTA portal Trapiche. _____	21
Figura 11.	Luminancia interna en el túnel BUENAVISTA. _____	21
Figura 12.	Detección del sensor de iluminancia. _____	24
Figura 13.	Método de medición de los 9 puntos aplicada. _____	27
Figura 14.	Luminancia L20 externa en el túnel BUENAVISTA portal Trapiche del 19/05/2010. _____	30
Figura 15.	Vista del portal Trapiche desde la distancia (DS) del luminancímetro respectivo. _____	31
Figura 16.	Inserción del algoritmo de control. _____	40
Figura 17.	Algoritmo general de control de iluminación para los portales Trapiche y Rionegro. _____	41
Figura 18.	CF121 Detector de falla de luminancímetros _____	42
Figura 19.	CF122 Evalúa banda de operación _____	43
Figura 20.	CF123 Evalúa si hay cambio de bandas de operación _____	44
Figura 21.	CF124 Enciende circuitos específicos _____	41
Figura 22.	CF127 Apaga circuitos específicos _____	45
Figura 23.	Detector de falla operando _____	46
Figura 24.	Detector de falla operando y asignando el valor del luminancímetro operativo _____	46
Figura 25.	Timer 146 con ciclo de muestreo cada 15 minutos _____	47
Figura 26.	FC122 evaluador de bandas _____	47
Figura 27.	FC123 Comparador de bandas _____	48
Figura 28.	FC124 y FC127 ON / OFF de los circuitos de operación _____	48
Figura 29.	Rutina para borrar órdenes de ON u OFF de los circuitos _____	49
Figura 30.	Evaluador de cambios de banda posteriores _____	49
Figura 31.	DB110 que almacena todas las variables del nuevo algoritmo _____	50
Figura 32.	Luminarias 100% encendidas con software anterior (original) _____	50
Figura 33.	Luminarias operan con el nuevo algoritmo, portales independientes, Interior2 apagado siempre _____	51
Figura 34.	Luminarias operan con el nuevo algoritmo, modo Nocturno solo CTO8 _____	52
Figura 35.	Niveles de operación para las luminancias del portal Trapiche _____	55

0. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo final tuvo como objetivo la optimización del algoritmo de control del sistema de iluminación de uno de los dos túneles del tramo 6 de la carretera Bogotá - Villavicencio, siendo el túnel Buenavista el objetivo dada su dimensión, potencia instalada, disponibilidad de información de diseño, disposición para la toma de medidas in situ y elementos actuadores que facilitaban el control sectorizado de la iluminación al interior del túnel.

Esta actualización se hizo con el fin de fijar parámetros de operación de la iluminación del túnel Buenavista conforme a la resolución 180540 del 30 de marzo de 2010 "RETILAP" la cual a su vez llama al cumplimiento de la norma europea CIE 88:2004 en su SECCIÓN 570 que indica "El objetivo de la iluminación de túneles es suministrar una apropiada visibilidad a los conductores tanto en el día como en la noche".

Para cumplir con los objetivos se parte de lo siguiente:

- Información de cálculos existentes para el túnel Buenavista.
- Información de la distribución eléctrica de las luminarias por zona de operación.
- Ejecución de mediciones de iluminancia en cada una de las zonas del portal.
- Análisis de los resultados.
- Inspección visual de las diferentes alternativas.
- Selección de los parámetros óptimos de operación.

Los resultados obtenidos mejoran el confort visual y la optimización de costos de operación, dado que en la mayor parte del tiempo por lo menos 1 circuito de iluminación permanecerá apagado si se compara con el algoritmo que actualmente opera; así mismo se ha identificado que para la operación Diurna del túnel no se requiere el encendido del 100% de las luminarias de refuerzo de baja potencia de la zona interior² del túnel Buenavista y que en la operación Nocturna se requiere de la permanente operación de 1 circuito de refuerzo de baja potencia en las zonas de Umbral y transiciones antes de la zona interior¹.

Las conclusiones y recomendaciones invitan a la calibración de los equipos de medición existentes en el túnel Buenavista, a la mejora en el mantenimiento de las luminarias y de un ejercicio de mantenimiento correctivo las luminarias para mejorar los niveles de uniformidad en algunas de las zonas que están por debajo del 40% recomendado en el numeral 6.11 de la CIE 88:2004.

Este trabajo se considera como la primera etapa en el rediseño del algoritmo de control del sistema de iluminación del túnel Buenavista y se han observado algunas mejoras potenciales que se pueden cumplir en una segunda etapa como son:

- No usar el valor inmediato de la luminancia externa aportada por cada sensor de cada portal para que el algoritmo actúe, ya que si se usa un valor promedio de bajo intervalo de tiempo, evitaría que el algoritmo tomara decisiones sobre valores picos no duraderos externos y mejoraría la operatividad del sistema.
- Para el caso de la zona Umbral1, Umbral2, Transición1 y Transición2 donde hay 3 circuito de alta potencia, es posible alargar su la vida útil de las luminarias si a cada circuito se asocia un HORÓMETRO (virtual) como registro de operación, cuyo valor será usado por el algoritmo para dar uso parejo o equilibrado a cada circuito, esto hace que todas las luminarias después de un tiempo determinado tengan relativamente las mismas horas de operación.
- Los bit's de confirmación que son enviados desde los actuadores de campo (contactores) de cada circuito pueden usarse para poner en funcionamiento otro circuito de iluminación de la misma Zona, dado que un valor específico (CERO LÓGICO) indicaría que uno de los circuito ha dejado de funcionar por alguna razón y es relevado por un circuito disponible para mantener los niveles de confort visual para la zona específica.

Este trabajo es base para mejor comprensión de la norma CIE 88:2004, de la importancia del confort visual en túneles carreteros y la oportunidad de optimizar los costos operacionales de un túnel en cuanto al gasto energético en iluminación.

1. OBJETIVO GENERAL

Optimizar el software de control del sistema de iluminación del túnel BUENAVISTA ubicado en la vía Bogotá-Villavicencio.

1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Medir los niveles de iluminancia que aporta cada circuito de luminarias en cada una de las zonas del túnel Buenavista.
2. Fijar parámetros bandas de operación de acuerdo a las recomendaciones del RETILAP y la CIE, tomando de base los datos de diseño contenidos en las memorias de cálculo para la iluminación del túnel Buenavista.
3. Diseñar el algoritmo de control óptimo, teniendo en cuenta los dos sensores de Luminancia existentes (uno en cada portal), así como mantener funcional los algoritmos de emergencia existentes.
4. Dejar disponibles para ajuste las bandas de operación para el control de la iluminación para los 4 modos (Nocturno, Soleado, Nublado y Seminublado), así como los tiempos de transición o de permanencia en cada banda de operación.
5. Dejar registro en la base de datos de los eventos de cada circuito de iluminación controlable, con el fin de poder verificar el funcionamiento de los tiempos de control vs. niveles de luminancia externa e iluminancia interna.
6. Verificar si el proyecto aplica como desarrollo para el Uso Racional de la Energía URE (Res 18919).

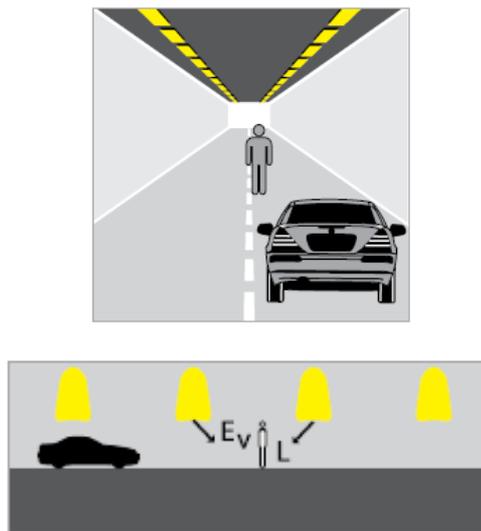
2. CONCEPTOS TEÓRICOS

El tipo de iluminación para túneles, su configuración y en general los parámetros de diseño son únicos para cada túnel, tales como: la interdistancia, potencia de las luminarias, tipos de luminarias, ubicación y posición, factores que son dependientes de las características constructivas finales del túnel, reflectividad de las paredes y del piso, máximos de luminancia diurna exterior, velocidad de tráfico máximo, tráfico vehicular por carril, entre otros.

2.1 Configuración del alumbrado (caso Túnel Buenavista)

Alumbrado simétrico: Este es el caso la luz se dirige simétricamente con relación al plano paralelo al sentido de la circulación.

Figura 1. Configuración de iluminación simétrica.



Fuente: http://www.schreder.com/documents/_Dossier/PDF/Spanish/200702081128/2014_TUNNEL_ES_V3Fin.pdf

2.2 Equipos de alumbrado

Las **lámparas** utilizadas en los túneles BUENAVISTA y en general para cualquier túnel se caracterizan por una elevada eficiencia luminosa y larga vida útil. Por ello se recomienda utilizar lámparas de vapor de sodio a alta presión, fluorescentes, LED o de inducción dispuestas en filas continuas en paredes.

En la entrada, donde los requerimientos luminosos son mayores se instalan lámparas de mayor potencia.

Las **luminarias**, son robustas, herméticas, resistentes a las agresiones de los gases de escape y los productos de limpieza. Además de ser de fácil instalación, acceso y mantenimiento.

Debido a los gases de escape y partículas en suspensión, debe existir un plan de mantenimiento y limpieza periódica que garanticen la permanencia de la calidad de la iluminación en cada una de las zonas al interior del túnel.

Cuando un automóvil circula por un túnel, hay que evitar que sufra molestias a causa del fenómeno estroboscópico ("flicker"). En función de la velocidad de circulación y del espaciado de las luminarias, aparece un fenómeno de centelleo cuando la frecuencia de percepción de los flashes causados por las fuentes luminosas se sitúa en un rango que va de 4 a 11 Hz. Estas frecuencias corresponden a frecuencias hipnóticas y siempre hay que intentar evitarlas para garantizar una seguridad óptima para los conductores que circulen dentro del túnel. Este fenómeno es bastante común en túneles largos.

Existe un espaciado mínimo y máximo de las luminarias que hay que evitar en función de la velocidad de circulación de los conductores. Por ejemplo, para el TÚNEL BUENAVISTA cuando se circula a una velocidad (de diseño) de 60 km/h, equivale a 16,6 m/s, no son aceptables los espaciados entre luminarias que van de 1,5 m ($f = 16,6/1,5 = 11$ Hz) a 4,1 m ($f = 16,6/4,1 = 4$ Hz).

En los túneles como el de Buenavista se debe contar además, de un **sistema de alumbrado de emergencia** que garantiza unos niveles mínimos de iluminación en caso de apagón. En este sentido se tiene por lo menos el funcionamiento los circuitos de luminarias de baja potencia (50w) que ofrecen al menos 1 Cd/m² para el caso del TÚNEL BUENAVISTA.

2.3 Sensor de Luminancia

Un sensor de luminancia o luminancímetro¹ debe ser capaz de obtener el valor medio en el cono de 20 grados, según la normativa CIE-88:2004, introducido en una carcasa de Con IP65, un soporte orientable en elevación y azimut. Debe disponer de un sistema de calefacción interno para evitar empañamientos de la ventana o de la óptica interna, con valores de conexión y desconexión de 10 y 25 grados centígrados respectivamente.

El luminancímetro se compone de la óptica necesaria para la medida del cono de 20 grados, un fotodetector de silicio de curva espectral aproximada a la del ojo, electrónica de acondicionamiento de señal de alta sensibilidad y conversor analógico-digital para muestreo de la señal e incorporación a los algoritmos de control.

¹ <http://www.tunnel-lighting-control.com/luminancesensor.html>

Su instalación debe estar a una distancia de frenado (DS) desde el portal del túnel, distancia equivalente a la del Umbral1 + Umbral2.

Figura 2. Sensor de Luminancia.



Fuente: <http://www.sifisa.es/pdf/datasheet.pdf>

2.4 Sensores de Iluminancia

El sensor de Iluminancia² ó luxómetro sirve para la medición precisa condiciones luminosas en un sector o zona específica, es conformado principalmente por un fotodiodo con una respuesta semejante a la del ojo humano, tal y como establece la CIE.

Figura 3. Sensor de Iluminancia.



Fuente: <http://www.ocean-net.info/instrumentacion/deltaohm/Iluminancimetro.htm>

² <http://www.tunnel-lighting-control.com/illuminancesensor.html>

2.5 Iluminación en el interior de un túnel³

Las necesidades en iluminación de un túnel son totalmente diferentes de día y de noche. Por la noche el problema es relativamente sencillo y consiste en la prestación de los niveles de luminancia en la calzada iluminada del interior del túnel al menos igual a los que están fuera del túnel. El diseño de la iluminación durante el día es especialmente crítico debido al sistema de visual de los humanos. El conductor, fuera del túnel percibe mejor los detalles en carretera bajo los niveles de iluminación existentes que son altamente iluminados que en el interior del túnel donde es relativamente oscuro.

Los sistemas visuales no se adaptan fácilmente a una rápida reducción en la iluminación ambiental, como el producido al pasar de la luz del día a la oscuridad de un túnel, estas adaptaciones no son instantáneas. El proceso de adaptación lleva cierto tiempo y depende de la amplitud de la reducción: Cuanto mayor sea la diferencia o amplitud mayor será el tiempo de adaptación.

Para una velocidad de tránsito vehicular dada, es decir que cuanto mayor sea la diferencia entre el nivel de iluminación exterior y el interior del túnel, será más larga la distancia que requiere el sistema visual del conductor para adaptarse, esto quiere decir que las zonas de umbral y transición se hacen más extensas en distancia.

2.5.1 Luminancia en la noche al interior del túnel

Si el túnel es una parte de un camino sin luz, la luminancia media de la superficie de carreteras en el interior no debe ser inferior a 1Cd/m^2 , la uniformidad global de al menos el 40% y el 60% longitudinal.

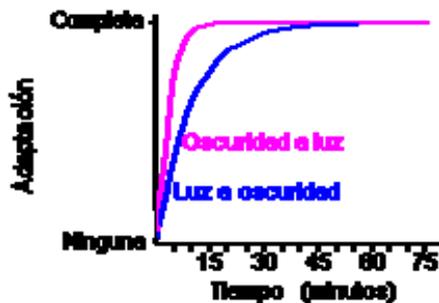
2.6 La adaptación⁴

La **adaptación** es la facultad del ojo para ajustarse automáticamente a cambios en los niveles de iluminación. Se debe a la capacidad del iris para regular la abertura de la pupila y a cambios fotoquímicos en la retina. Para pasar de ambientes oscuros a luminosos el proceso es muy rápido pero en caso contrario es mucho más lento. Al cabo de un minuto se tiene una adaptación aceptable. A medida que pasa el tiempo, vemos mejor en la oscuridad y a la media hora ya vemos bastante bien. La adaptación completa se produce pasada una hora.

³ Tomado del numeral 2 de la CIE88:2004.

⁴ http://edison.upc.edu/curs/llum/luz_vision/p_visual.html

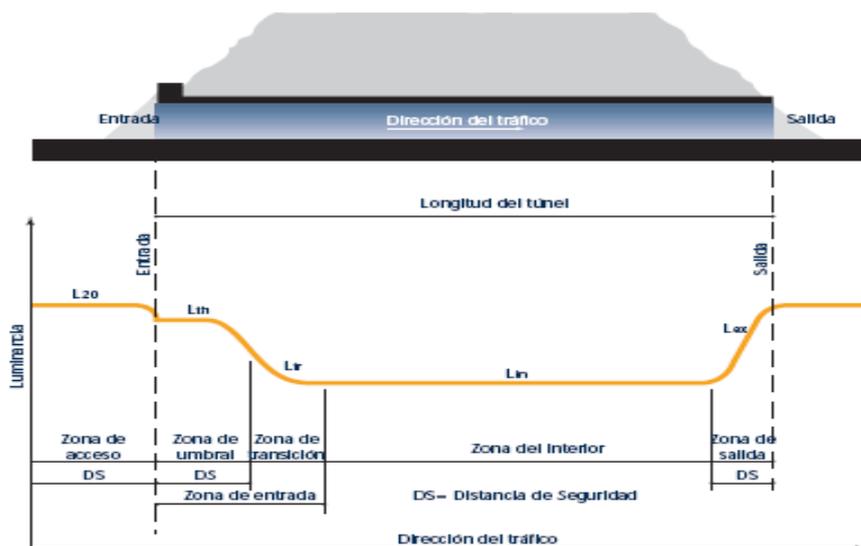
Figura 4. Tiempos de adaptación del ojo humano.



Fuente: http://edison.upc.edu/curs/lum/luz_vision/p_visual.html

Se trata, por lo tanto, de un problema de diferencia de niveles de luminancia entre el exterior (aproximadamente entre $500-5000 \text{ Cd/m}^2$) y el interior del túnel (aproximadamente $5-10 \text{ Cd/m}^2$). Se estima que manteniendo un valor de luminancia próximo al exterior en toda su longitud habríamos resuelto el problema, pero esta solución no es económicamente viable.

Figura 5. Distribución de luminancia en túnel unidireccional.

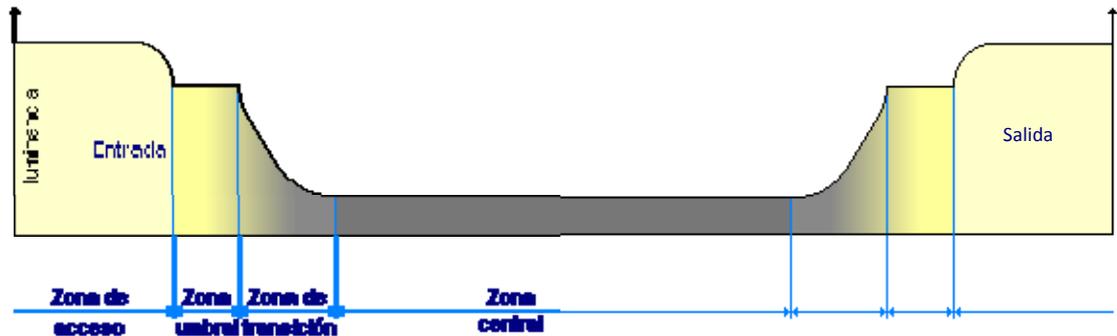


Fuente: <http://www.scribd.com/doc/17456327/Lighting-Handbook-INDAL-Guide-espanol/>

Lo que se hace en túneles largos como el túnel de BUENAVISTA con 4520m, con densidad de tráfico elevado y circunstancias de contaminación que dificultan la visión, es reducir progresivamente el nivel de luminancia desde la entrada hasta la zona central y por tratarse

de un túnel BIDIRECCIONAL, las características de diseño de un portal se aplican al segundo portal de acuerdo a la figura 6.

Figura 6. Distribución de luminancia en túnel Bidireccional.



Fuente: http://edison.upc.edu/curs/llum/luz_vision/p_visual.html

2.7 Sistemas de control de iluminación en los túneles Buenavista

Para el control de la iluminancia en el interior del túnel, éste está directamente relacionado con la luminancia exterior en un solo Valor de Referencia del portal TRAPICHE que está ubicado del lado VILLAVICENCIO y la hora del día para identificar DÍA o NOCHE, sin haber puntos de transición en el día como Soleado, Nublado y Seminublado tal como lo define el RETILAP en su numeral 570.8 “...se necesita asegurar tanto desde el punto de vista económico, como del confort visual, que los niveles de iluminación dentro del túnel, se ajusten automáticamente a las variaciones de la iluminación exterior”, “...a fin de adaptar el régimen (soleado, nubloso, oscuro) a la relación L_{tr}/L_{20} elegido”

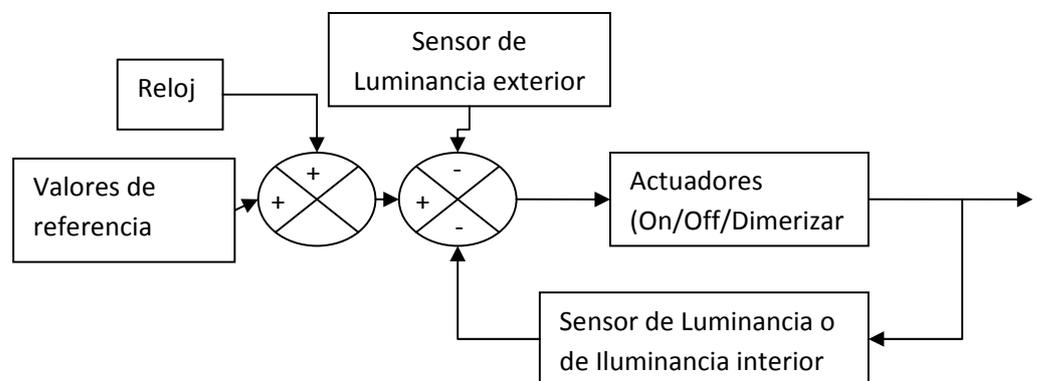
2.7.1 Control On/Off dinámico

El túnel Buenavista ya cuenta con luminarias adicionales para apagar o encender una determinada cantidad con el fin de mantener los niveles requeridos de iluminación interna en cada una de las zonas, para poder adecuarlas de acuerdo a las condiciones externas y hora del día.

2.7.2 Equipos para realimentar condiciones de iluminación

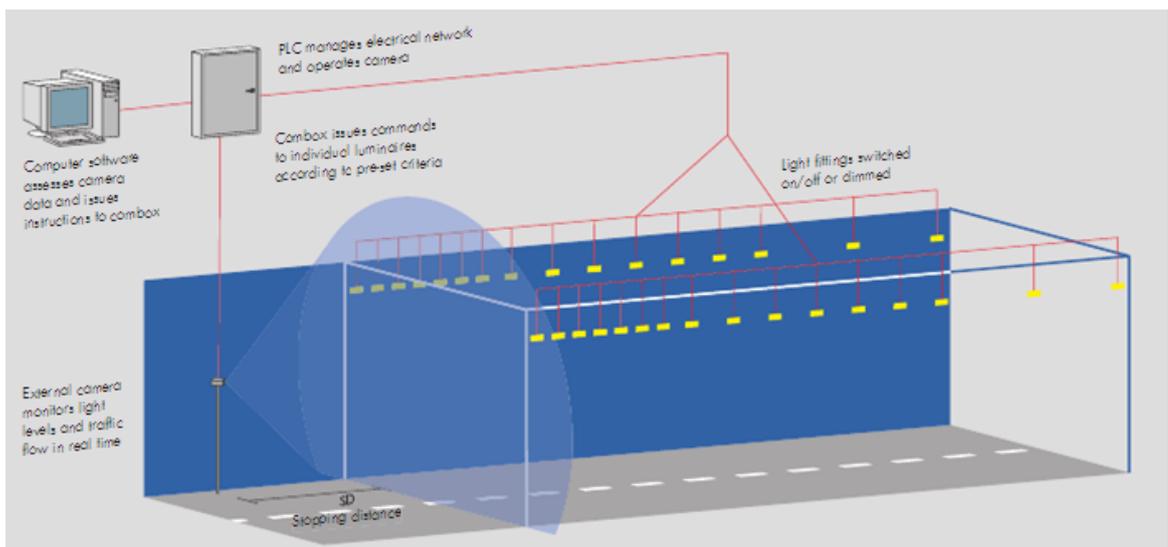
Para que el sistema sea dinámico y ajustable a lo largo del día de acuerdo a las condiciones externas e internas, se hace necesario realimentar los niveles de luminancia o iluminancia internos alcanzados y ajustarlos a los niveles externos de luminancia existentes, (ver figura 7a y 7b).

Figura 7a. Sistema de control en lazo cerrado para un sistema de iluminación en túneles.



Fuente: Del Autor

Figura 7b. Equipos de control de un sistema de iluminación.



Fuente: <http://www.scribd.com/doc/20258149/Lighting-Handbook-THORN-Tunnel-Lighting>

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente⁵ el sistema de control de iluminación presenta la siguiente funcionalidad para los túneles de Buenavista y Bijagual:

3.1 Configuración del sistema

El Sistema de Iluminación de los túneles está conformado por luminarias de vapor de sodio de diferentes potencias distribuidas a lo largo del túnel por parejas simétricas, de forma conveniente para obtener un nivel de Iluminación similar al otorgado por la luz del sol en los portales de entrada, disminuyendo la intensidad paulatinamente a medida que se avanza hacia el interior del túnel, con miras a lograr que la pupila del ojo de los conductores se adapte, hasta llegar al nivel mínimo recomendado por los organismos internacionales para tener visibilidad adecuada, el cual se mantiene a lo largo del túnel, hasta llegar al otro portal, en donde se ejerce el efecto inverso para evitar un deslumbramiento en los ojos del conductor a la salida.

La Iluminación mínima requerida o de emergencia está conectada a los sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) con baterías, garantizándola en casos de emergencia (apagón), para evitar que los usuarios del túnel generen accidentes producto de la pérdida de iluminación en caso de falla del sistema de de energía.

Los circuitos de la totalidad del sistema están conectados de forma tal que permiten un control escalonado y coordinado en los encendidos y apagados de las luminarias al comenzar el día y al empezar la noche. La capacidad de las luminarias depende del sitio donde están instaladas; existen 3 niveles de iluminación, uno para los umbrales de entrada, otro para las zonas de transición y otro para el cuerpo o zona central del túnel.

De acuerdo con la figura 8, se observa que actualmente los 4 portales de los 2 túneles existentes (BUENAVISTA y BIJAGUAL) están siendo controlados por un solo sensor de luminancia y por un horario, lo cual no está conforme a las recomendaciones RETILAP y de la CIE 88:2004, ya que estos reglamentos o normativas indican que el control no se debe hacer por horario y que cada portal debe ajustarse a su luminancia respectiva.

El túnel Buenavista cuenta con:

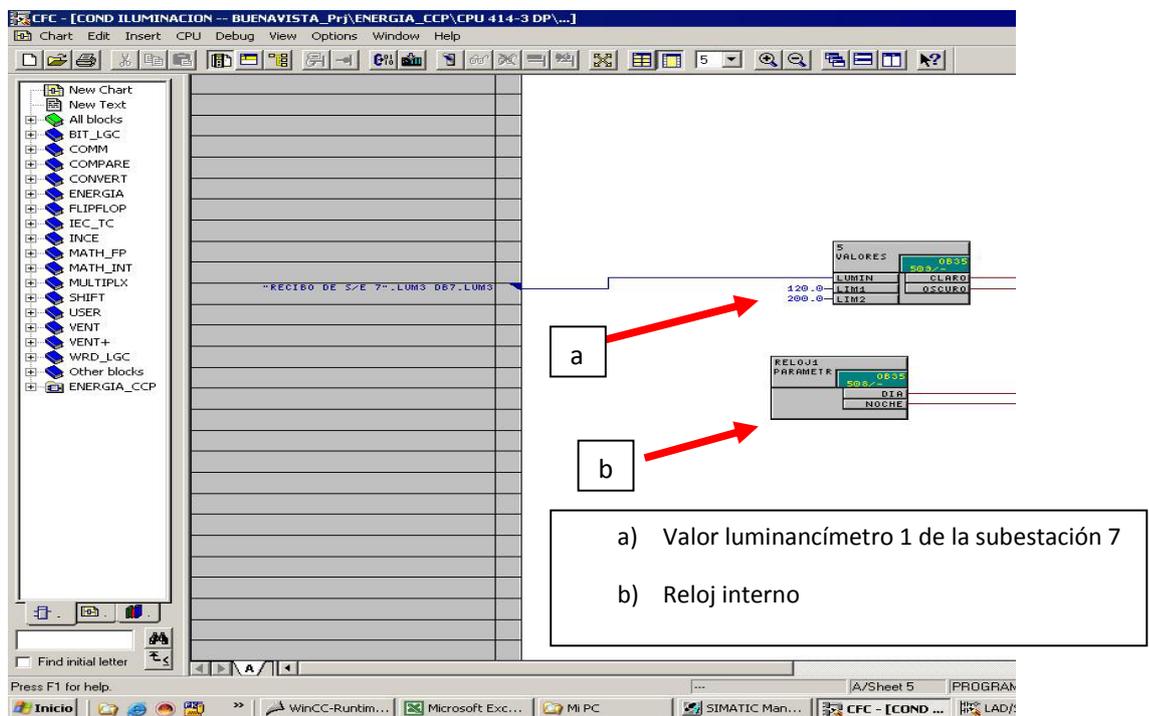
- 146 luminarias de 400W en los umbrales cercanos a los portales, separadas por parejas desde 1,6m cerca de los portales y hasta 8m en la zona de transición interior.
- 28 luminarias de 250 W separadas entre 7 m y 10,5 m entre sí en la zona de transición en el interior del túnel.

⁵ Manual de operación y mantenimiento TBB-MO-001.PDF de los túneles BUENAVISTA y BIJAGUAL

- 22 luminarias de 150 W separadas 21 m entre sí en la zona de transición interior del túnel.
- 430 luminarias de 2 x 50 W separadas 21 m entre sí en la zona central del túnel.

En cada nicho de parqueo se encuentran instaladas 4 luminarias MY, equipadas cada una con dos bombillas fluorescentes de 32W T8 colocadas a una altura de 4 metros, a una distancia de 12 metros entre ellas y con una inclinación de 30°.

Figura 8. Diagramas de bloques del software de control de la iluminación del túnel Buenavista.



Fuente: Sistema SCADA de los túneles BUENAVISTA y BIJAGUAL.

3.2 Control y supervisión del sistema de iluminación

Las luminarias instaladas en los umbrales y transiciones deberán apagarse a las 5:30 p.m. y prenderse a las 6:00 a.m., de forma tal que se logre un cambio escalonado en los niveles de iluminación, que no afecten la visibilidad de los conductores que a esas horas transitan por el túnel.

La secuencia para la operación de prender las luminarias es la siguiente:

- Encender circuito de iluminación normal del cuerpo del túnel (circuitos 1, 2, 3 y 4 de las subestaciones 3 a la 6, circuitos 8, 9 y 10 de la subestación 2 y circuito 8 de la subestación 7).
- Encender simultáneamente: transición 3 (circuito 7), circuito No. 1 (umbral 2, transición 1 y 2) y circuito No. 1 de umbral 1 correspondiente a las subestaciones 2 y 7.
- Diez minutos más tarde, encender simultáneamente: circuito No.2 (umbral 2, transiciones 1 y 2) y circuito No. 2 de umbral 1 correspondiente a las subestaciones 2 y 7
- Diez minutos más tarde, encender simultáneamente: circuito No. 3 (umbral 2, transiciones 1 y 2) y circuito No. 3 de umbral 1 correspondiente a las subestaciones 2 y 7
- El tiempo total del proceso de encendido de las luminarias es de 20 minutos

La secuencia para apagar las luminarias es la siguiente:

- Apagar simultáneamente: circuito N° 3 (umbral 2, transiciones 1 y 2) y circuito N° 3 de umbral 1 correspondiente a las subestaciones 2 y 7.
- Diez minutos más tarde, apagar simultáneamente: circuito N° 2 (umbral 2, transiciones 1 y 2) correspondiente a las subestaciones 2 y 7.
- Diez minutos más tarde, apagar simultáneamente: transición 3, circuito N° 1 (umbral 2, transiciones 1 y 2) y circuito N° 1 de umbral 1 correspondiente a las subestaciones 2 y 7
- Diez minutos más tarde, apagar circuitos de iluminación normal del cuerpo del túnel (circuitos 1, 2, 3 y 4 de las subestaciones 3 a la 6, circuitos 8, 9 y 10 de la subestación 2 y circuito 8 de la subestación 7).

El tiempo del proceso de apagado dura 30 minutos.

De conformidad con lo observado en la figura 10, y adicional a lo consignado en el manual de operación las condiciones de encendido diurno deben cumplir que la luminancia externa en el luminancímetro 3 de la subestación 7 supere las 120 Cd/m² y para el apagado el mismo sensor debe estar por debajo de las 200 Cd/m².

3.2.1 Modo automático del sistema de control de iluminación

En este modo de operación, el software de control realiza las siguientes tareas:

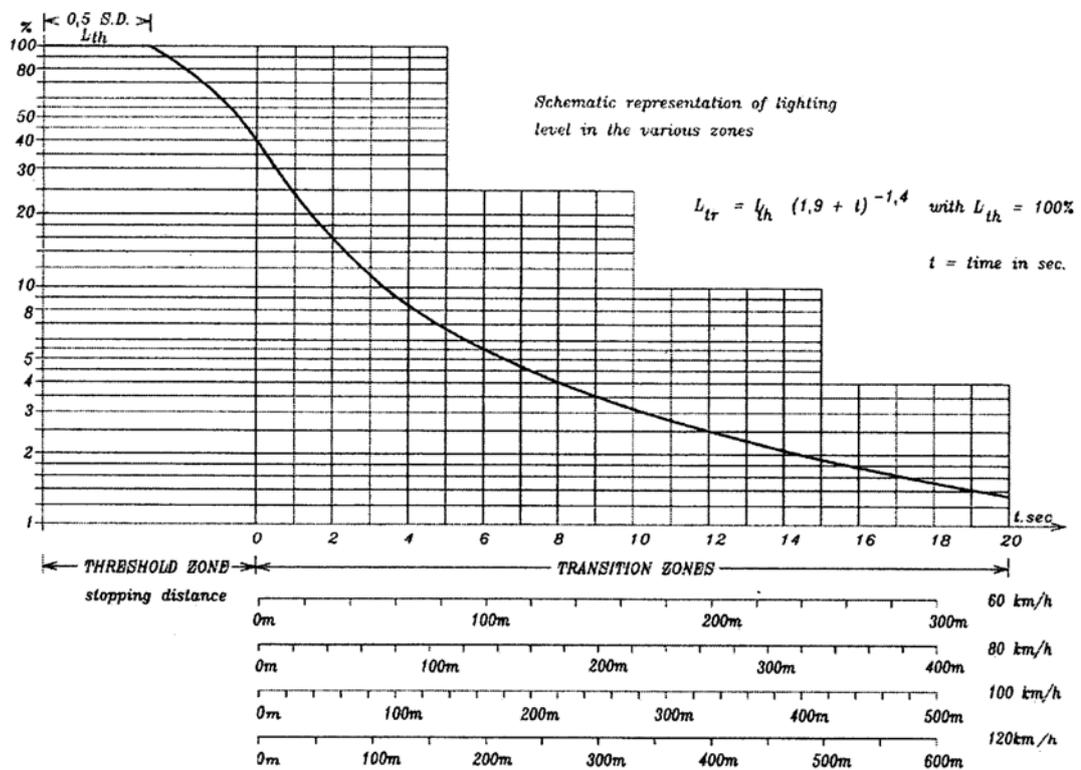
- Encendido / apagado de luces diurnas / nocturnas para las zonas de umbral 1 y umbral 2 de los portales de los túneles.
- Encendido / apagado de las luces diurnas / nocturnas para las zonas de transición 1, 2 y 3 de ambos extremos del túnel Buenavista.

- Encendido / apagado de las luces diurnas / nocturnas para el cuerpo de los túneles.

3.2.2 Falencia en el cumplimiento de la norma CIE 88:2004

En la figura 9 se observa que la CIE88:2004 recomienda que la luminancia interior respecto a la exterior esté de acuerdo a la luminancia exterior L_{20} .

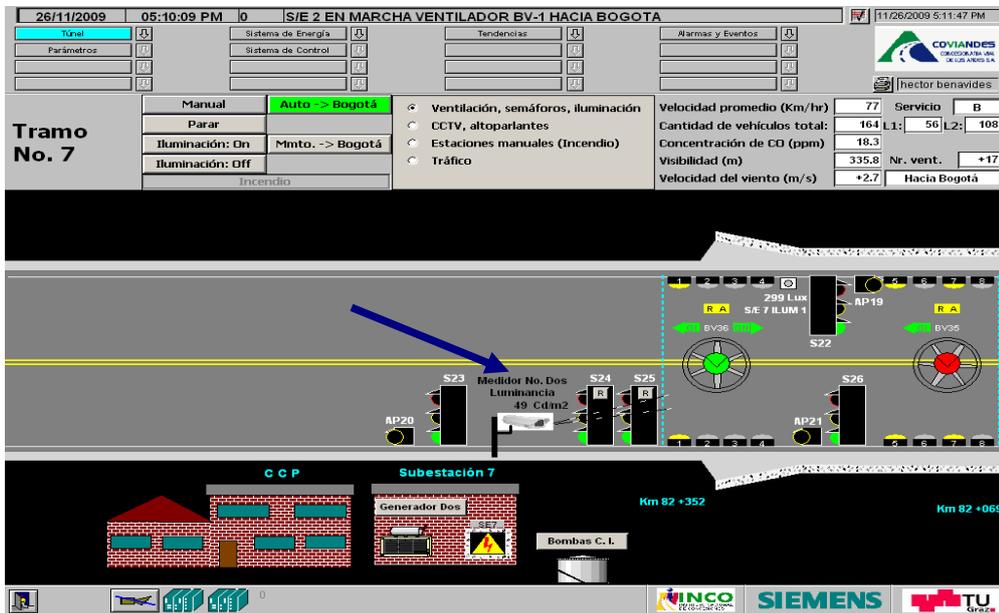
Figura 9. Curva de luminancia de la CIE 88:2004



Fuente: CIE 88:2004

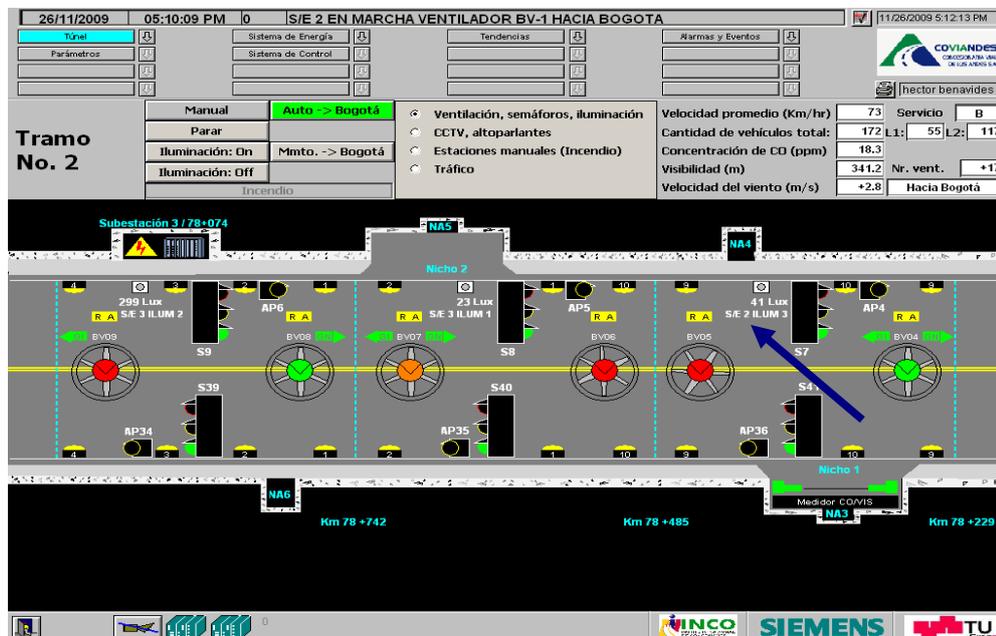
Conforme a la figura 9, se muestra en la figura 10 y 11 que el sistema de control a pesar de detectar bajo nivel de luminancia externa, no ajusta completamente la iluminación interior de acuerdo a la curva CIE.

Figura 10. Luminancia externa en el túnel BUENAVISTA portal Trapiche.



Fuente: Sistema SCADA del túnel BUENAVISTA.

Figura 11. Luminancia interna en el túnel BUENAVISTA.



Fuente: Sistema SCADA de los túneles BUENAVISTA y BIJAGUAL.

De acuerdo a las figuras 12 y 13, a la consideración de la CIE para la iluminación interior o del cuerpo del túnel⁶ y que la consideración de diseño de $1 \text{ Cd/m}^2 = 10.76 \text{ lux}$, podemos apreciar que:

Luminancia Exterior = 49 Cd/m^2 , en la figura 10 si es menor a 200 lux (algoritmo original) debería estar operando el modo noche, así pues:

CIE 88: 2004 tabla 6.7.2 e interpolando para una distancia de frenado de 68m .

	DISTANCIA DE FRENADO	LUMINANCIA REQUERIDA
	60	1
	160	2.5
Por interpolación	68	1.12

La zona Interior2 requiere de 1.12 Cd/m^2 .

Valor registrado por iluminancímetro = 41Lux .

Entonces:

$1\text{Cd/m}^2 \longrightarrow 10.76 \text{ Lux}$

$1.12\text{Cd/m}^2 \longrightarrow 12.05 \text{ Lux}$

$X \longrightarrow 41 \text{ Lux}$

$X = 1 \cdot 41 / 10.76 = 3.8 \text{ Cd/m}^2$, **Entonces $3.8 \text{ Cd/m}^2 > 1.12 \text{ Cd/m}^2$**

Luego el cuerpo del túnel esta sobre iluminado para la luminancia modo NOCHE existente.

3.3 Consumos energéticos

El algoritmo actual no actúa sobre la iluminación del túnel para mantener el confort de acuerdo a los valores de luminancia externos en cada portal⁷ de forma individual e independiente, el nuevo algoritmos debe optimizar el control de iluminación, llevando el consumo energético a unos niveles operacionales sostenibles y manteniendo las características de adaptabilidad del ojo y el control de los demás fenómenos ópticos atribuibles a la iluminación de túneles.

A continuación se lista la carga instalada en lo que concierne a iluminación del túnel BUENAVISTA (se incluyen las pérdidas del balasto):

⁶ Numeral 6.7 Tabla 6.7.2 Luminancia en la segunda parte de la zona interior.

⁷ Recomendado por el numeral 570.8 RETILAP.

Tabla 1. Demanda energética del sistema de iluminación

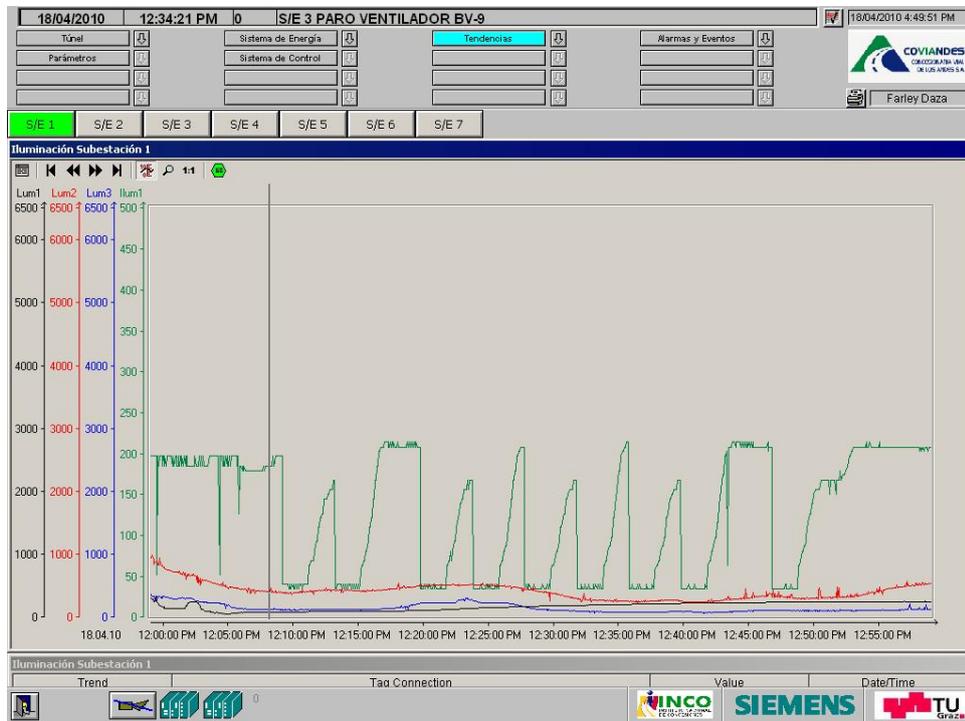
UBICACIÓN	POTENCIA LUMINARIA	TÚNEL BUENAVISTA
UMBRALES (1 Y2) Y TRANSICIÓN 1 (400W)	479W	146
TRANSICIÓN 2 (250W)	301W	28
TRANSICIÓN 3 (150W)	190W	22
CUERPO (50W)	2X65W	430
TOTAL LUMINARIAS		1056
POTENCIA INSTALADA TOTAL (KW)		138,442

Fuente: Manual de operación y mantenimiento TBB-MO-001.PDF de los túneles BUENAVISTA y BIJAGUAL

3.4 Control oscilante sobre la iluminación

Como se puede observar en la figura 12, un nivel de luminancia cercano al límite de cambios de operación de modo día a modo noche (200 lux para el algoritmo actual) tiene directa influencia en la iluminación, es decir, los circuitos de iluminación se encienden y se apagan en repetidas ocasiones, causando una pérdida de energía por su operación y una directa disminución de la vida útil de los componentes de las luminarias accionadas.

Figura 12. Detección del sensor de iluminancia.



Fuente: Sistema SCADA de los túneles

4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

1. Hacer una revisión al software de control, verificando los tiempos de activación de los circuitos de iluminación Vs. Los niveles de luminancia exteriores.
2. Realizar una recopilación de datos de mediciones para determinar los niveles de operación o bandas de operación para la dimerización de la iluminación en el interior del túnel.
3. Identificar las variables que se usan en el software para la activación de cada circuito y su potencial uso en la optimización del control de iluminación del túnel.
4. Implementar el algoritmo solución en los PLC's de control maestro del sistema de iluminación.
5. Verificar con el supervisorio o SCADA la correcta operación de los circuitos de iluminación de acuerdo al algoritmo diseñado e implementado y las condiciones externas en cada uno de los portales del túnel Buenavista.

5. RESULTADOS

Se hace seguimiento a la operación de los circuitos en cada una de las zonas del portal trapiche el cual es simétrico en operación con el portal Rionegro (otro extremo), teniendo los siguientes resultados.

Nota: tanto en la secuencia de encendido y apagado los circuitos de emergencia siempre están operando y estos dependen de la UPS de la subestación respectiva y sobre estas luminarias no hay control para su operación.

Tabla 2. Secuencia (original) de encendido de la iluminación del túnel Buenavista (>120 Lux)

SECUENCIA DE ENCENDIDO DE CIRCUITOS	PORTAL TRAPICHE	CUERPO TÚNEL	PORTAL RIONEGRO
1	CIRCUITOS (1,4,7,8)	1,2,3,4	1,4,7,8,9,10
2	2,5		2,5
3	3,6		3,6

Fuente: Autor

Tabla 3. Secuencia (original) de apagado de la iluminación del túnel Buenavista (<200 Lux)

SECUENCIA DE APAGADO DE CIRCUITOS	PORTAL TRAPICHE	CUERPO TÚNEL	PORTAL RIONEGRO
1	CIRCUITOS (3,6)		3,6
2	2,5		2,5
3	1,4,7		1,4,7
4	8	1,2,3,4	8,9,10

Fuente: Autor

5.1 Recopilación de datos

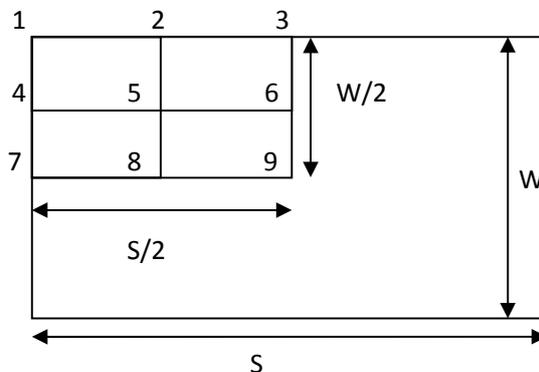
5.1.1 Metodología de medición

De conformidad con el numeral 530.2.1 “MÉTODO EUROPEO DE LOS 9 PUNTOS” consignado en el ANEXO GENERAL del RETILAP (Resolución 180540 del 30/03/2010), las mediciones se ejecutan en cada una de las zonas del túnel BUENAVISTA, para lo cual se tuvo en cuenta la siguiente información:

TIPO DE ILUMINACIÓN:	SODIO DE ALTA PRESIÓN	LONGITUD DEL TÚNEL:	4.520m
UBICACIÓN DE LAS LUMINARIAS:	BILATERAL OPUESTA	VELOCIDAD DE TRÁFICO:	60 Km/h
NÚMERO DE CARRILES:	2	CARACTERÍSTICAS DE LA SUPERFICIE:	R3 (Qo = 0.07)
TRÁFICO:	BIDIRECCIONAL	ANCHO DE CALZADA (W):	7.2m
	<150 vehículos/hora/carril	INTERDISTANCIA (S):	Depende de la zona a medir.
		DISTANCIA DE SEGURIDAD (DS):	68m

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, las mediciones se ejecutan de acuerdo a la siguiente gráfica:

Figura 13. Método de medición de los 9 puntos aplicada.



Fuente: ANEXO GENERAL del RETILAP (Resolución 180540 del 30/03/2010).

W= Ancho de calzada

S= Interdistancia entre luminarias

Las mediciones fueron ejecutadas así:

- Entre las 00:00 horas y las 04:00 horas con el fin de evitar alto flujo vehicular.

- b. Se usa un luxómetro calibrado de fábrica con un porcentaje de error máximo del 3%.
- c. Los puntos medidos están de acuerdo al ancho de calzada y distribución simétrica de las luminarias en cada zona.
- d. Las zonas medidas (Umbral1, Umbral2, Transición1, Transición2, Transición3 y Cuerpo) se ubicaron de acuerdo a los planos As Built existentes, donde se indica en que Abscisa empieza y termina cada zona, así:

Tabla 4. Longitud de las zonas

ZONA	TAMAÑO (m)	ZONA	TAMAÑO (m)
Umbral1	34	Transición2	61
Umbral2	34	Transición3	96
Transición1	36	Cuerpo	1966

Fuente: Memorias de cálculo de iluminación

5.1.2 Resultado de los niveles de iluminación aportados en cada zona por las luminarias de cada circuito.

Los resultados consignados en la tabla 5 son el resultado de la medición en cada zona y lo aportado por los circuitos de iluminación.

Consideraciones de la operación de los circuitos de iluminación observados en campo:

- El circuito 8 de cada portal es un circuito de refuerzo de 50W y conecta todas las zonas Umbral 1 hasta el cuerpo, por tal motivo se considera uno de los circuitos de mayor permanencia en operación en el nuevo algoritmo.
- Los circuitos 9 y 10 del portal Rionegro (lado Bogotá) son circuitos de iluminación del cuerpo del túnel.
- Los circuitos 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 son simétricos en operación para ambos portales: Buenavista (lado Villavicencio) y Rionegro (lado Bogotá).
- Los circuitos 1, 2, 3, 4, 5, y 6 pueden operarse de forma independiente ya que cada uno de ellos aporta uniformemente una determinada cantidad de flujo luminoso sobre la calzada.
- Los Circuitos 1, 2 y 3, 4 del cuerpo del túnel, se deben operar en parejas para ofrecer uniformidad a la zona Interior1 e Interior2.

E = Circuito de emergencia que depende de UPS y no es controlable por el algoritmo.

CTO x = Circuito que tiene directa influencia en la zona respectiva y es controlable por el Algoritmo.

Tabla 5. Medición de iluminancia aportada en cada zona por las luminarias de los respectivos circuitos de iluminación en el portal TRAPICHE del túnel BUENAVISTA.

		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	PROMEDIO (LUXES)	UNIFORMIDAD (%)	REQUISITO	CONFORME
CUERPO DEL TÚNEL	E	25,7	14,0	8,3	25,7	13,8	8,2	21,4	11,3	7,4	14,8	49,88%	> 40%	SI
	E+CTO3	50,8	25,6	11,7	51,7	23,8	10,9	42,4	19,8	9,6	26,6	36,09%	> 40%	NO
	E+CTO1+2+3+4	53,1	26,7	16,4	54,3	25,3	14,6	44,8	21,4	10,4	28,8	36,29%	> 40%	NO
TRANSICIÓN N 3	E	17,9	10,1	8,4	16,5	9,7	8,6	13,2	8,2	7,4	10,8	68,74%	> 40%	SI
	E+CTO7	9,1	43,2	26,6	99,0	41,8	25,3	82,0	35,0	21,0	44,4	47,26%	> 40%	SI
	E+CTO7+8	127	57	38	133	56	36	109	47	30	67,2	45,01%	> 40%	SI
TRANSICIÓN N 2	E	26,2	15,4	9,0	27,4	16,3	7,7	23,6	13,1	6,1	16,1	39,07%	> 40%	NO
	E+CTO4	26,4	17,1	15,0	27,0	17,2	13,2	23,5	14,2	11,1	18,0	61,81%	> 40%	SI
	E+CTO4+5	36,0	20,3	16,0	38,3	20,0	14,6	32,1	17,1	12,1	22,3	54,25%	> 40%	SI
	E+CTO4+5+6	182	76	31	177	77	29	130	26	25	80,5	30,75%	> 40%	NO
	E+CTO4+5+6+8	219	94	39	208	93	36	149	80	31	102,8	30,17%	> 40%	NO
TRANSICIÓN N 1	E	16,6	17,0	14,0	22,5	23,0	17,9	21,1	21,1	17,4	19,9	87,45%	> 40%	SI
	TR1-EM+8	40	44	36	46	49	40	41	42	34	43,3	79,42%	> 40%	SI
	E+CTO4	201	175	123	192	169	120	151	140	108	157,2	68,58%	> 40%	SI
	E+CTO4+5	278	279	279	255	255	250	198	204	206	247,3	83,15%	> 40%	SI
	E+CTO4+5+6	317	311	302	306	290	273	247	233	225	281,1	80,07%	> 40%	SI
	E+CTO4+5+6+8	341	338	324	330	316	295	267	255	242	304,5	79,50%	> 40%	SI
UMBRAL 2	E	20,0	22,4	20,0	18,5	20,7	18,6	14,7	16,4	14,3	19,0	75,42%	> 40%	SI
	E+CTO4	199	164	164	208	166	170	175	127	137	167,3	75,63%	> 40%	SI
	E+CTO4+5	535	440	347	538	440	369	424	344	304	422,2	72,02%	> 40%	SI
	E+CTO4+5+6	685	641	635	688	621	656	533	475	531	611,7	86,77%	> 40%	SI
	E+CTO4+5+6+8	691	645	639	697	630	668	536	483	532	618,9	86,00%	> 40%	SI
UMBRAL 1	E	16,3	16,5	16,9	12,8	15,0	16,1	9,9	11,3	13,0	14,3	68,94%	> 40%	SI
	E+CTO1	367	320	273	306	287	258	241	219	209	277,8	75,23%	> 40%	SI
	E+CTO1+2	873	793	682	830	739	673	671	577	519	715,4	72,53%	> 40%	SI
	E+CTO1+2+3	1416	1132	990	1401	1266	1107	1059	934	932	1162,9	80,11%	> 40%	SI
	E+CTO1+2+3+8	1462	1168	1025	1454	1281	1178	1135	1025	982	1211,0	81,11%	> 40%	SI
	E+CTO8	38	34	34	39	22	50	47	56	38	37,7	59,45%	> 40%	SI
ACCESO	AP	21	10	8	46	15	10	49	14	8	19,1	43,64%	> 40%	SI

Fuente: Autor.

5.1.3 Determinación de la luminancia de la zona de acceso L₂₀

Aprovechando la existencia de un sensor de luminancia en el portal Trapiche y Rionegro, se usa el método L₂₀ de la CIE 88:2004 (ANEXO A.1), obtener el valor promediando los máximos en un periodo suficiente, y así obtener los valores L₂₀, en la tabla 6 se consignan los valores máximos medidos por el sensor #3 de la subestación 7 (portal trapiche).

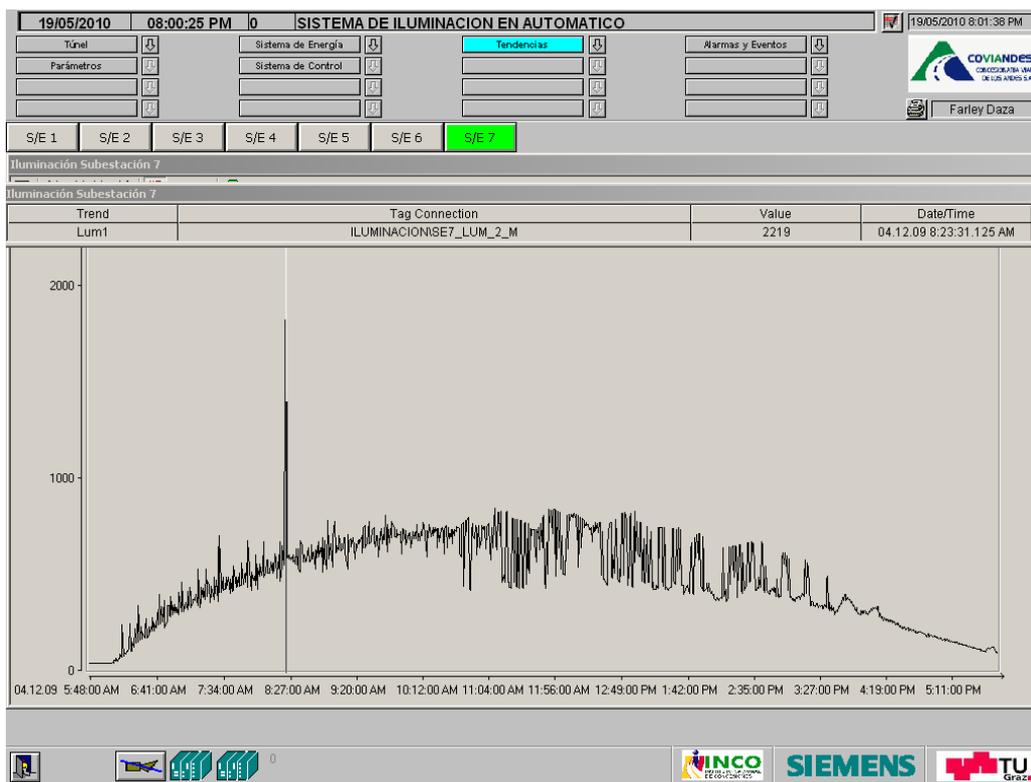
Tabla 6. Máximos de luminancia en el último año en el portal trapiche

FECHA	L ₂₀ Cd/m ²	FECHA	L ₂₀ Cd/m ²
4-DIC-09	2219	28-ABR-10	912
5-DIC-09	1696	29-ABR-10	916
12-DIC-09	1149	06-MAY-10	884
23-ABR-10	1033	09-MAY-10	923

Fuente: Autor.

El valor promedio L₂₀ de la tabla 5 = **1216,5 Cd/m²**.

Figura 14. Luminancia L₂₀ externa en el túnel BUENAVISTA portal Trapiche del 19/05/2010.



Fuente: Sistema SCADA de los túneles

En la figura 15 se presenta una fotografía desde el mismo punto de ubicación y dirección del luminancímetro del portal trapiche, en donde se evidencia que los niveles de luminancia son

bajos debido a que no se observa cielo abierto o superficies reflectantes o difusas importantes que aumenten los niveles de L_{20} , lo cual tiene como consecuencia la necesidad de iluminar en menor proporción los umbrales y transiciones del lado trapiche.

Figura 15. Vista del portal Trapiche desde la distancia (DS) del luminancímetro respectivo.



Fuente: Autor

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Niveles de iluminación del túnel Buenavista

Se observa en la tabla 5 que en promedio existen 4 niveles posibles de iluminación en los umbrales y transiciones, los cuales se deben ajustar a los niveles de iluminación calculados en el presente trabajo: NOCHE, NUBLADO, SEMINUBLADO, y SOLEADO; los mismos se basan en los valores de luminancia externa L_{20} del portal Trapiche y se aplican por simetría al portal Rionegro.

De acuerdo a lo anterior, el objetivo de crear 4 niveles de operación o iluminación en las diferentes zonas es coherente dado que en las zonas Umbral1, Umbral2, Transición1 y Transición2 se pueden obtener 4 estados operacionales que dependen del número de circuitos encendidos, teniendo para el Umbral1 la siguiente configuración de operación:

NOCTURNO=	CTO E+CTO8 ⁸
NUBLADO=	CTOE+CT8+CTO1
SEMINUBLADO=	CTOE+CTO8+CTO1 +CTO2
SOLEADO=	CTOE+CTO8+CTO1 +CTO2+CTO3

6.2 Cálculos de operación

6.2.1 Modo noche

De conformidad con el numeral 7 de la CIE 88:2004, se tienen las siguientes consideraciones:

- Los niveles de iluminación al interior del túnel deben ser como mínimo iguales a los que hay en los accesos (ver tabla 5).
- La luminancia en la calzada (Interior1 y 2) debe ser $1,12 \text{ Cd/m}^2$ para la velocidad de 60Km/h y una distancia de frenado de 68m, de acuerdo a la CIE 88: 2004 tabla 6.7.2 e interpolando para la velocidad de diseño:

⁸ Resultado de los cálculos conforme al Numeral 7 de la norma CIE 88:2004 para una Luminancia Nocturna.

	DISTANCIA DE FRENADO	LUMINANCIA REQUERIDA
	60	1
	160	2,5
Por interpolación	68	1,12

De acuerdo a lo anterior, observamos en la tabla 5 lo siguiente:

Nivel Acceso = 19.1 Lux

Nivel actual (CTO E)= 14.3 Lux

Nuevo nivel (CTO E + 8)= 37.7 Lux

Distancia del CTO8

Portal Rionegro = 315m

Portal Trapiche = 550m

Dado que la norma no indica las distancias de permanencia de estos niveles, se puede considerar que las distancias anteriores cumplen con lo requerido en cuanto a ofrecer un nivel equivalente al encontrado en los accesos, es decir, 37.7 Lux en los Umbrales y transiciones y de **14.3 Lux** en las zonas Interior1 e Interior2.

6.2.2 Modo Día

En este modo se derivan 3 estados operacionales, los cuales son: Nublado, Seminublado y Soleado; para hallar los niveles adecuados de iluminación en cada zona partimos de las siguientes premisas de la norma CIE 88:2004:

- La luminancia del Umbral1 = L_{th} parte del valor L_{20} hallado anteriormente para el caso Soleado, para los casos de Seminublado y Nublado los valores son determinados por los máximos niveles que pueden ofrecer los circuitos de iluminación disponibles (tabla A.1.3 de la CIE 88:2004).
- El valor de la luminancia del umbral2 es = al 40% de L_{th} (numeral 6.5 CIE 88:2004).
- Los valores de luminancia en las transiciones deben corresponder a lo consignado en la Ecuación 2.
- El cuerpo del túnel, es decir la zona interior que actualmente es una sola zona se debe dividir en una primera zona Interior1 equivalente a la distancia recorrida en 30 segundos a la velocidad de diseño del túnel y la zona Interior2 es la distancia restante hasta llegar a las zonas de salida del portal contrario, dichas luminancias dependen de la interpolación desde los valores contenidos en las tablas 6.7.1, 6.7.2, y 6.7.3 de la CIE 88:2004.
- Un cambio de una zona a otra no debe ser inferior a 1/3 de la adyacente (numeral 6.9 CIE 88:2004).

De acuerdo lo anterior se fija los circuitos de operación según los niveles externos de L_{20} y por lo tanto las bandas de operación para el nuevo algoritmo de control.

SOLEADO

$$L_{20} = 1216,5 \text{ Cd/m}^2$$

$$K = L_{th}/L_{20} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Tomando el valor K de la tabla A.1.3 de la CIE 88:2004 para una velocidad de operación del túnel de 60 Km/h tenemos:

$$K = 0,05$$

Dado que los instrumentos de medición carecen de certificado de calibración y se tiene un nivel de incertidumbre desconocido aportado por todos los instrumentos usados, tomamos el valor de K mayor para una velocidad de 120 km/h el cual es:

$$K=0,1$$

Así pues, tenemos que el valor

$$L_{th} = K.L_{20} = (0,1).(1216,5) = 121,65 \text{ Cd/m}^2$$

Recordemos que en las memorias de cálculo el diseñador ha establecido una relación de **10.76** lux por cada Cd/m^2 , entonces en el Umbral1 requerimos máximo de:

$$L_{th} \text{ (en luxes)} = 121,65 \times 10,76$$

$$L_{th} = \text{Umbral1} = 1308,9 \text{ lux}$$

Se han medido 1211 Lux, que se pueden considerar suficientes si se tiene en cuenta que solo en valores pico soleados de pocos instantes se requerirían estos valores.

El valor del umbral2 = 40% de L_{th} , entonces:

$$\text{Umbral2} = 1308,9 \times 0,4 = 523,58$$

Se han medido 618,9 Lux, superando lo necesario para el Umbral2.

Los niveles de las transiciones (L_{tr}) se calculan de conformidad con la fórmula consignada en la figura 6.6 de la CIE 88:2004.

$$L_{tr} = L_{th} \times (1,9 + t)^{-1,4} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde,

t = Tiempo recorrido por el conductor desde el portal de entrada.

Transición1, con una dimensión de 36m, equivale al tiempo recorrido por el usuario a la velocidad de 60Km/h o 16.6 m/s del Umbral1 + Umbral 2:

$$t = t (\text{Umbral1} + \text{Umbral2})$$

$$t = t(68m) = x/v$$

Donde X = Distancia y v = Velocidad

$$t = 68/16,6 = 4s$$

Aplicando la ecuación 2:

$$L_{tr} = 1308.9 \times (1,9 + 4)^{-1,4} = 109,07 \text{ Lux}$$

El valor de la Transición1 es menor a 1/3 del valor del Umbral2, por lo tanto el valor mínimo para la Transición1 debe ser:

$$\text{Transición1} = 523,58/3 = 174.52 \text{ Lux}$$

Se han medido 304,5 Lux, superando lo necesario para la Transición1.

Transición2, con una dimensión de 61m, equivale al tiempo recorrido por el usuario a la velocidad de 60Km/h o 16.6 m/s del Umbral1 + Umbral 2 + Transición1:

$$t = t(\text{Umbral1} + \text{Umbral2} + \text{Transición1})$$

$$t = t(34+34+36) = x/v$$

Donde X = Distancia y v = Velocidad

$$t = 104/16,6 = 6,26s$$

Aplicando la ecuación 2:

$$L_{tr} = 1308.9 \times (1,9 + 6,26)^{-1,4} = 69,26 \text{ Lux}$$

El valor de la Transición2 es menor a 1/3 del valor del transición1 elegido, por lo tanto el valor mínimo para la Transición2 debe ser:

$$\text{Transición2} = 304,5/3 = 101,5 \text{ Lux}$$

Se han medido 102,8 Lux, superando lo necesario para la Transición2.

Transición3, con una dimensión de 96m, equivale al tiempo recorrido por el usuario a la velocidad de 60Km/h o 16.6 m/s del Umbral1 + Umbral 2 + Transición1 + Transición 2:

$$t = t(\text{Umbral1} + \text{Umbral2} + \text{Transición1} + \text{Transición2})$$

$$t = t(34+34+36+61) = x/v$$

Donde X = Distancia y v = Velocidad

$$t = 165/16,6 = 9,93s$$

Aplicando la ecuación 2:

$$L_{tr} = 1308.9 \times (1,9 + 9,93)^{-1,4} = 41,18 \text{ Lux}$$

El valor de la Transición3 es mayor a 1/3 del valor del transición2 elegido, por lo tanto el valor mínimo para la Transición3 también puede ser:

$$\text{Transición2} = 102,8/3 = 34,26 \text{ Lux}$$

Se han medido 67,2 Lux, superando lo necesario para la Transición3.

La primera zona interior del túnel (Interior1) se ilumina de acuerdo a la interpolación de valores tomados de la tabla 6.7.1 de la CIE 88:2004 y de la clasificación de tráfico del túnel tomado de la tabla 6.7.3 de la misma norma, así

Considerando el túnel de doble vía y un tráfico de 150 Veh/hora/carril, la tabla nos indica que este túnel es de flujo bajo (Low).

Interior 1=

	DISTANCIA DE FRENADO	LUMINANCIA REQUERIDA
	60	3
	160	6
Por interpolación	68	3,24

$$\text{Interior1 (en luxes)} = 3,24 \times 10,76$$

$$\text{Interior1} = 34,86 \text{ luxes.}$$

La distancia de la zona Interior1 es equivalente a lo recorrido a la velocidad de diseño en 30s, entonces:

$$\text{Dist (Interior1)} = 60\text{km/h} \times 1000\text{m}/3600\text{s} \times 30\text{s}$$

Distancia = 500m

Revisados los diseños eléctricos, estas distancias están cubiertas por los circuitos 1,2,3,4 de la subestación 6 para el portal Trapiche y los circuitos 9 y 10 de la subestación 2 más los circuitos 1 y 2 de la subestación 3 para el portal Rionegro, teniendo como valores de aporte = **28,8 lux**, cuyo valor es cercano al lo calculado para la zona Interior1 y al no contar con más circuitos de iluminación de refuerzo en esas zonas, podemos considerarlo apropiado, además cumple con la premisa de ser > 1/3 del valor de la Transición3 elegida.

Para el interior2, tomamos los valores de la tabla 6.7.2 de la CIE 88:2004 e interpolamos

	DISTANCIA DE FRENADO	LUMINANCIA REQUERIDA
	60	1
	160	2,5
Por interpolación	68	1,12

$$\text{Interior2 (en luxes)} = 1,12 \times 10,76$$

$$\text{Interior2} = 12,05 \text{ luxes.}$$

Contrario a la operación actual del túnel, el cual en el día mantiene activos los circuitos 1, 2, 3 y 4, observamos que solo con el aporte de los circuitos de emergencia (E), obtenemos un nivel de **14,8 lux**, lo que nos indica que los circuitos 3 y 4 de la subestación 3 y los circuitos 1, 2, 3, y 4 de las subestaciones 4 y 5 no deben operar en un día SOLEADO y mucho menos en condiciones menores (NUBLADO, SEMINUBLADO, NOCTURNO), aquí ya se evidencia el potencial de un ahorro energético en operación, además sigue cumpliendo la premisa de no ser > a 1/3 del valor elegido en la zona Interior1.

En las tablas 8, 9 y 10 se consignan los niveles requeridos para los estados Seminublado, Nublado y Nocturno, en donde se observa que en todo momento se está por encima del valor requerido y en la tabla 6 se fija los valores de operación para cada banda que identifica el estado exterior de la luminancia L₂₀.

Tabla 7. Bandas de operación calculadas desde los niveles ofrecidos por cada circuito

ESTADO DE OPERACIÓN	BANDA DE OPERACIÓN (Cd/m ²)		
	MENOR QUE	ENTRE	MAYOR QUE
SOLEADO			660
SEMINUBLADO		257-660	
NUBLADO		20-257	
NOCTURNO	20		

Fuente: Autor

6.2.3 Iluminación de emergencia

El numeral 8 de la CIE 88:2004 indica que la iluminación al interior del túnel debe estar entre los 2 y 10 lux, lo cual se cumple porque el aporte del CTO de emergencia (E) es de 14.8 Lux para todo el recorrido del túnel en sus 4.520m.

Tabla 8. Valores de luminancias máximas para el estado Seminublado

L20					660	
EQ (CD-LUX)					10,76	
	TRAMO	DISTANCIA	GRAFICA	FORMULA	MEDIDOS (Cd/m ²)	MEDIDOS LUX
Umbral1		34	66	66	66,4	715,0
Umbral2		34	28	26,4	39,2	422,0
Transición1		36	9,1	5,40	14,6	157,2
Transición2		61	3,9	3,50	7,5	80,5
Transición3		96	3,5	2,08	4,1	44,4
Interior1		500	3,3	3,24	2,7	28,8
Interior2		1466	1,1	1,12	1,4	14,8

Fuente: Autor.

Tabla 9. Valores de luminancias máximas para el estado Nublado

L20					257
EQ (CD-LUX)					10,76
TRAMO	DISTANCIA	GRAFICA	FORMULA	MEDIDOS (Cd/m2)	MEDIDOS LUX
Umbral1	34		25,7	25,7	277,0
Umbral2	34		10,28	15,5	167,0
Transición1	36		2,10	14,6	157,2
Transición2	61		1,36	7,5	80,5
Transición3	96		0,81	4,1	44,4
Interior1	500		3,24	2,7	28,8
Interior2	1466		1,12	1,4	14,8

Fuente: Autor.

Tabla 10. Valores de luminancias máximas para el estado Nocturno

L20					1,80
EQ (CD-LUX)					10,76
TRAMO	DISTANCIA	GRAFICA	FORMULA	MEDIDOS (Cd/m2)	MEDIDOS LUX
TH1	34		1,8	2,2	24,0
TH2	34		1,8	2,2	24,0
TR1	36		1,12	1,8	19,9
TR2	61		1,12	1,5	16,1
TR3	96		1,12	1,0	10,8
CUERPO1	500		1,12	1,4	14,8
CUERPO2	1466		1,12	1,4	14,8

Fuente: Autor.

De acuerdo con lo anterior, se fijan los parámetros o bandas de operación y la secuencia de operación de los circuitos de iluminación de acuerdo a la banda de operación en la que se halle (Ver tabla 11).

Tabla 11. Operación de los circuitos por zona

	SUBESTACIÓN 7	SUBESTACIÓN 6	SUBESTACIONES 5-4-3	SUBESTACIÓN 3	SUBESTACIÓN 2
	PORTAL TRAPICHE	INTERIOR1	INTERIOR2	INTERIOR1	PORTAL RIONEGRO
SOLEADO	1-2-3-4-5-6-7-8	1-2-3-4	-	1-2	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10
SEMINUBLADO	1-2-4-5-7-8	1-2-3-4	-	1-2	1-2-4-5-7-8-9-10
NUBLADO	1-4-8	1-2-3-4	-	1-2	1-4-8-9-10
NOCTURNO	8	-	-	-	8

Fuente: Autor.

Nota: los circuitos 9 y 10 del portal Rionegro que pertenecen a la subestación 2 iluminan la zona Interior1 del lado Rionegro.

7. DISEÑO DEL ALGORITMO DE CONTROL

Con base en la información de operación descrita en la tabla 11 se diseña el algoritmo de control como se muestra en la figura 16.

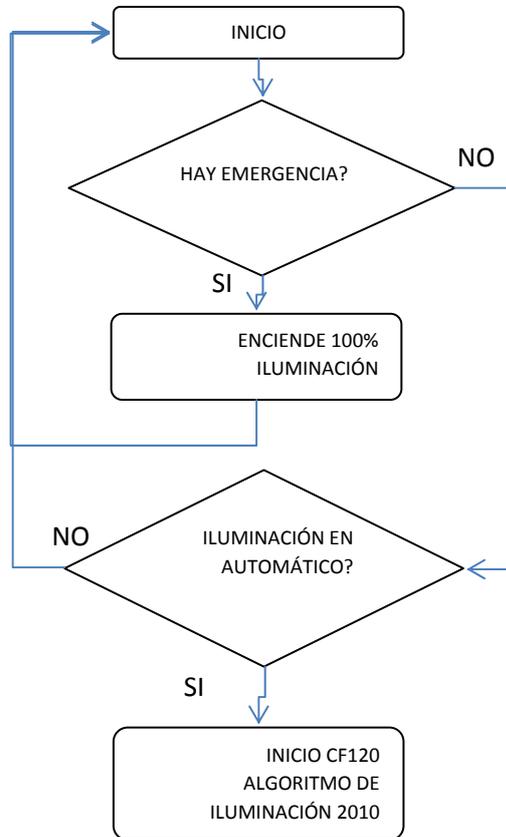
Se destaca que el nuevo algoritmo y el software fueron diseñados y programados por el autor del presente trabajo después de recibir capacitación avanzada en programación de PLC SIEMENS, dicho algoritmo fue instalado en el PLC maestro de Control de Energía S7-400 del Centro de Control Auxiliar (CCA) del Túnel Buenavista, con la autorización respectiva.

Para este diseño, el especialista en automatización de SIEMENS recomendó ejecutarlo en un solo bloque y actuar directamente sobre las señales de control de operación de encendido y apagado de cada circuito en cada una de las subestaciones.

Siguiendo las recomendaciones, el software fue hecho en una rutina denominada FC120 (Bloque de trabajo) y programada enteramente en lenguaje LADER, en general el software contiene:

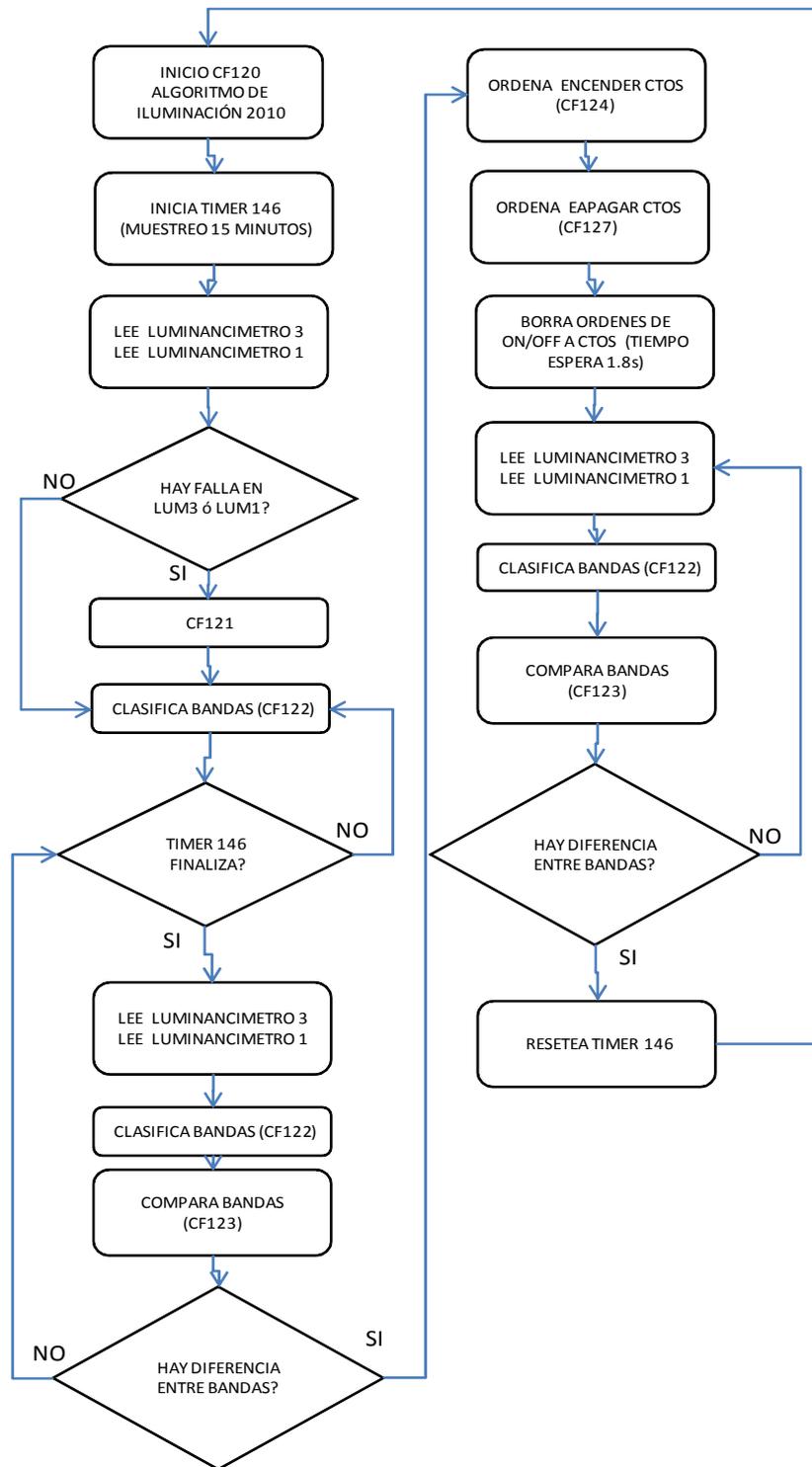
FC120=	Bloque principal
FC121=	Rutina de detección de falla de los luminancímetros.
FC122=	Rutina de evaluación de bandas de operación del sistema de iluminación.
FC123=	Rutina de evaluación de cambio de bandas en un periodo $t=15$ minutos.
FC124=	Rutina de encendido de circuitos de iluminación conforme a la FC122.
FC127	Rutina de apagado de circuitos de iluminación conforme a la FC122.
DB110	Bloque de datos donde se almacenan las variables de entrada y salida.

Figura 16. Inserción del algoritmo de control.



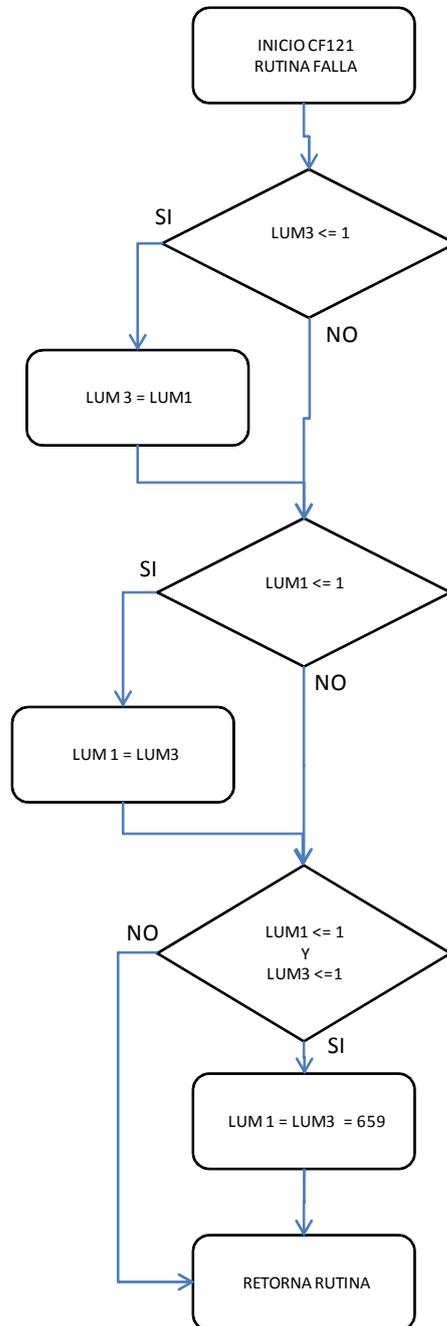
Fuente: Autor.

Figura 17. Algoritmo general de control de iluminación para los portales Trapiche y Rionegro.



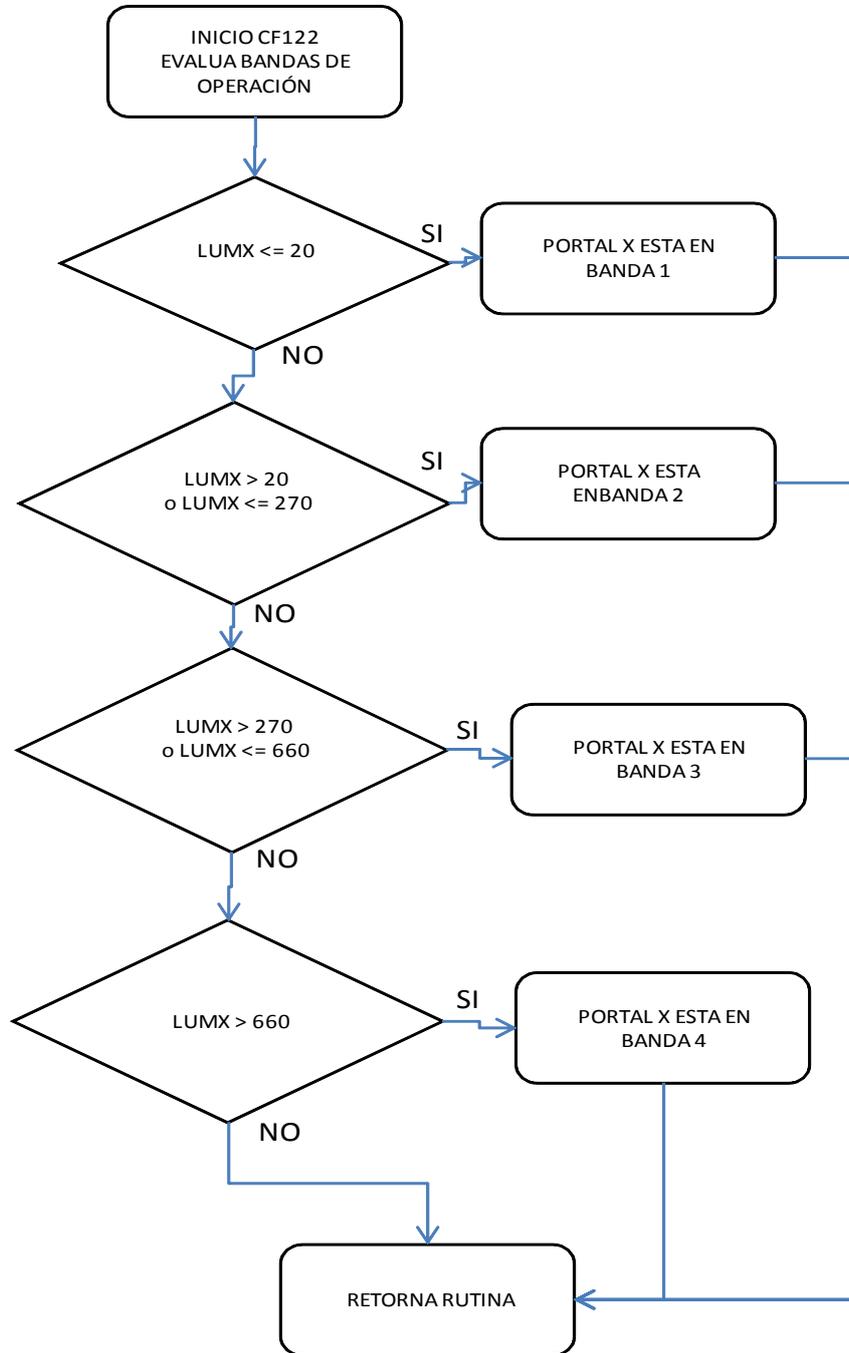
Fuente: Autor.

Figura 18. CF121 Detector de falla de luminancímetros



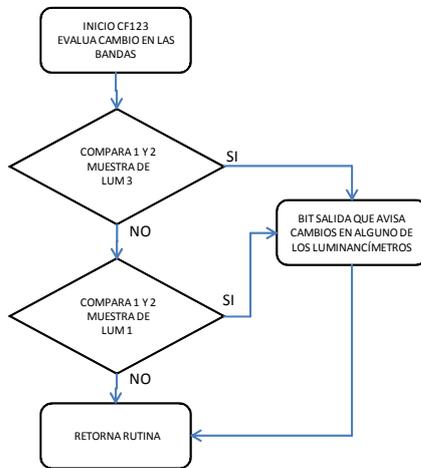
Fuente: Autor.

Figura 19. CF122 Evalúa banda de operación



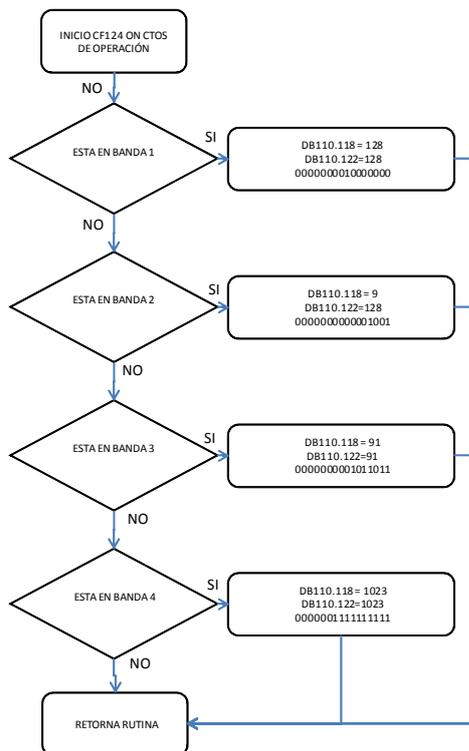
Fuente: Autor.

Figura 20. CF123 Evalúa si hay cambio de bandas de operación



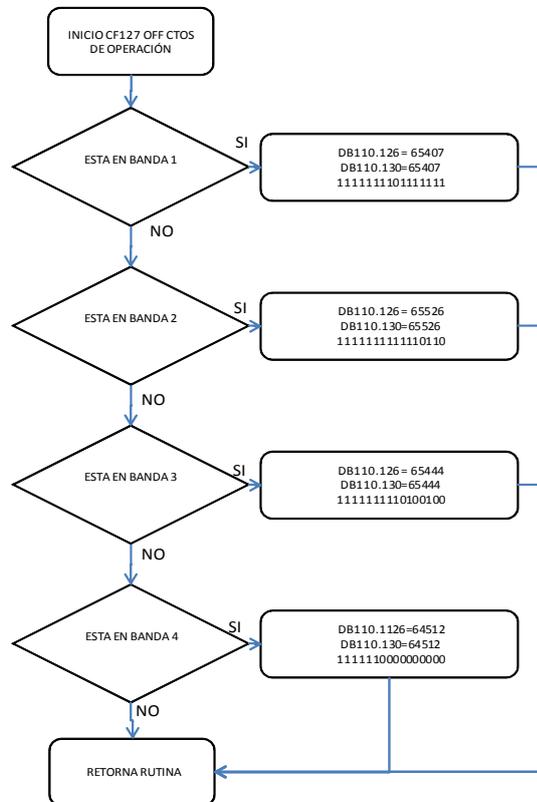
Fuente: Autor.

Figura 21. CF124 Enciende circuitos específicos



Fuente: Autor.

Figura 22. CF127 Apaga circuitos específicos

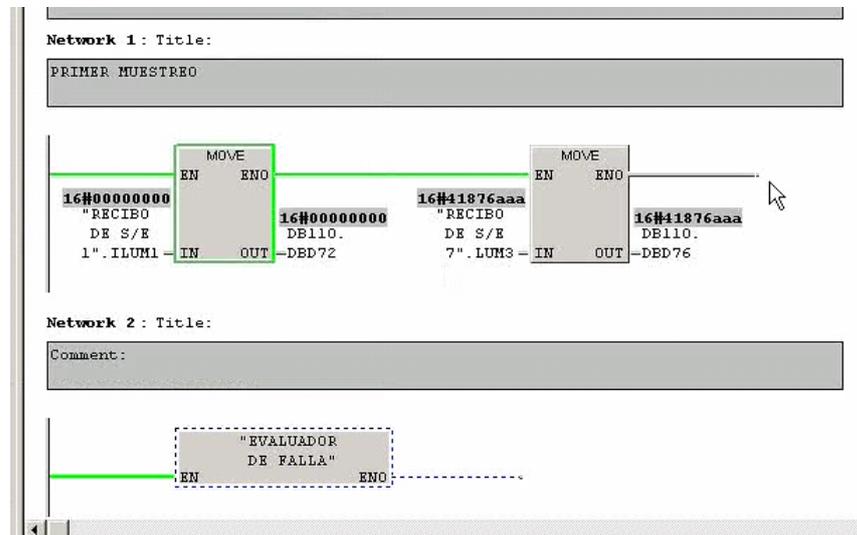


Fuente: Autor.

7.1 VERIFICACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL NUEVO ALGORITMO

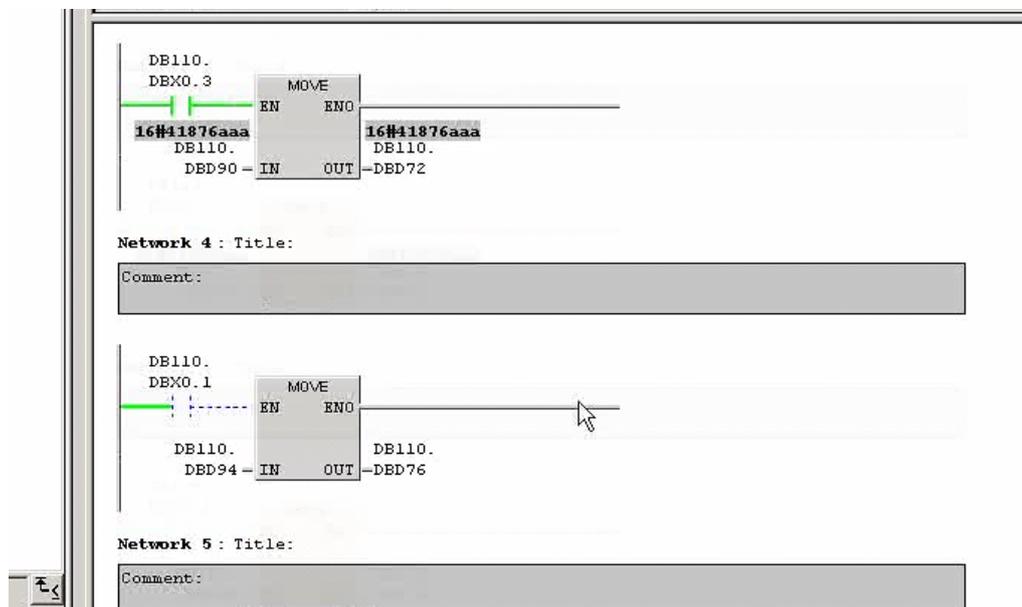
A continuación se mostrarán screens del sistema SCADA y de los bloques de programación en lenguaje LADER, en el que corriendo el programa en línea con el PLC se observan los valores instantáneos para cada variable y se comprueba la funcionalidad de acuerdo al análisis planteado anteriormente.

Figura 23. Detector de falla operando



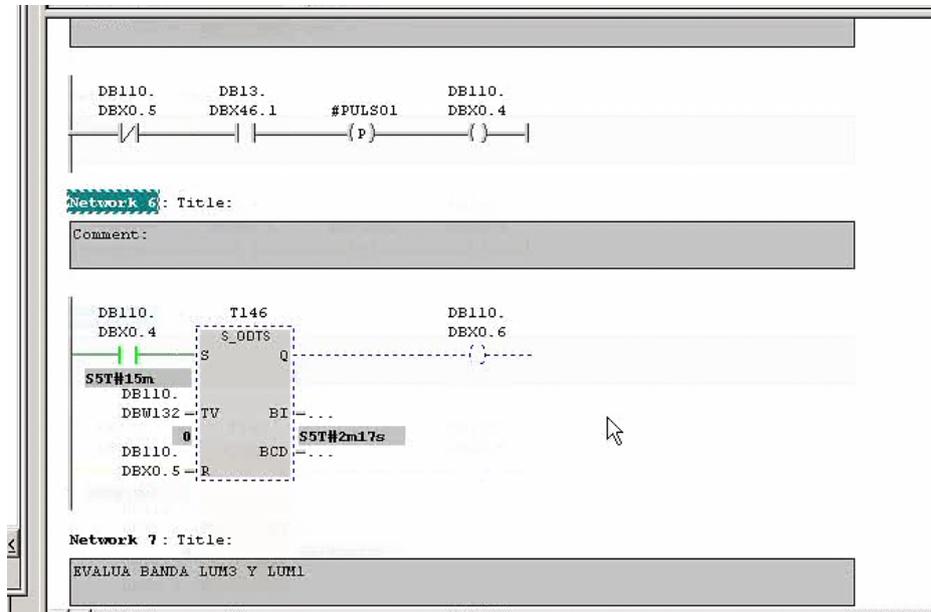
Fuente: Sistema SCADA de los túneles

Figura 24. Detector de falla operando y asignando el valor del luminómetro operativo



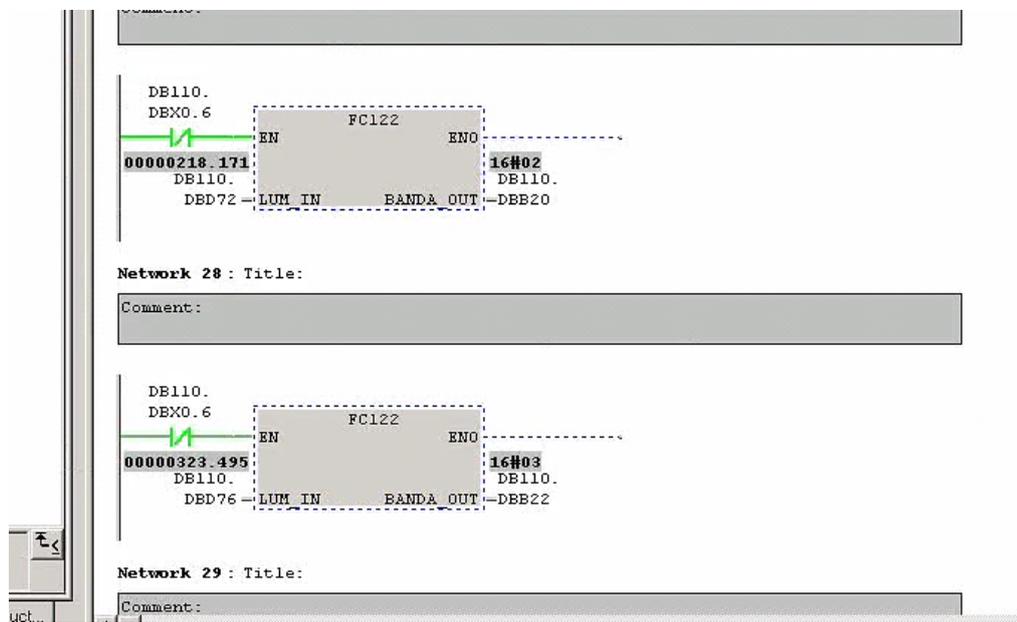
Fuente: Sistema SCADA de los túneles

Figura 25. Timer 146 con ciclo de muestreo cada 15 minutos



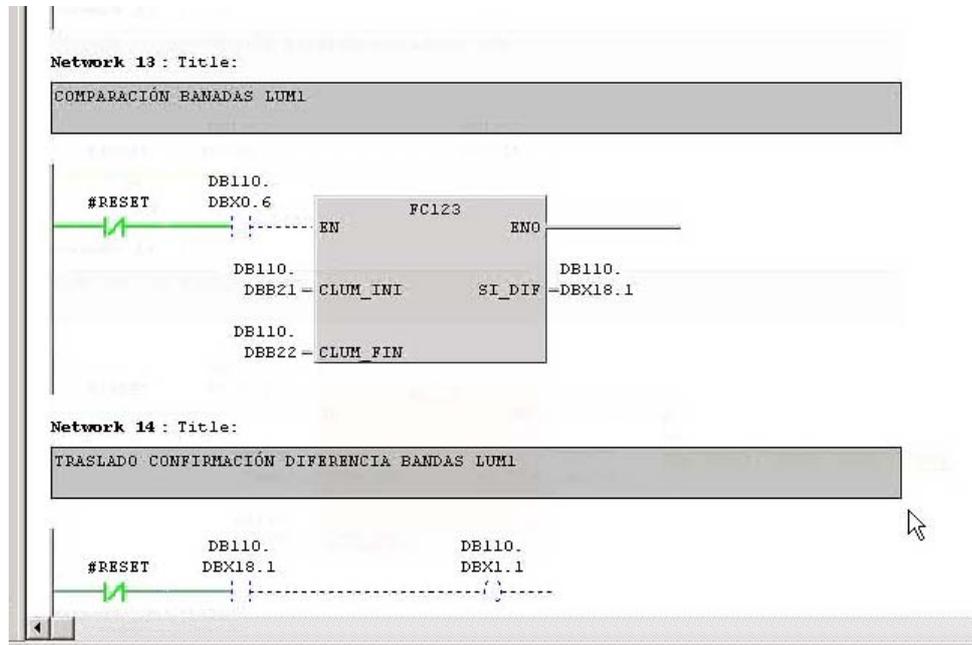
Fuente: Sistema SCADA de los túneles

Figura 26. FC122 evaluador de bandas



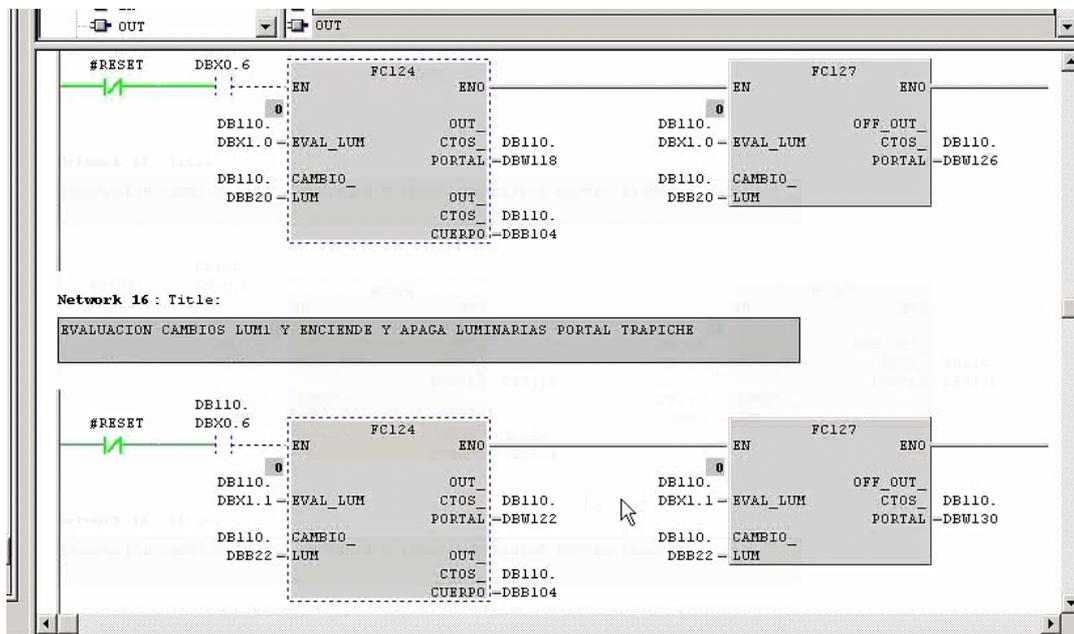
Fuente: Sistema SCADA de los túneles

Figura 27. FC123 Comparador de bandas



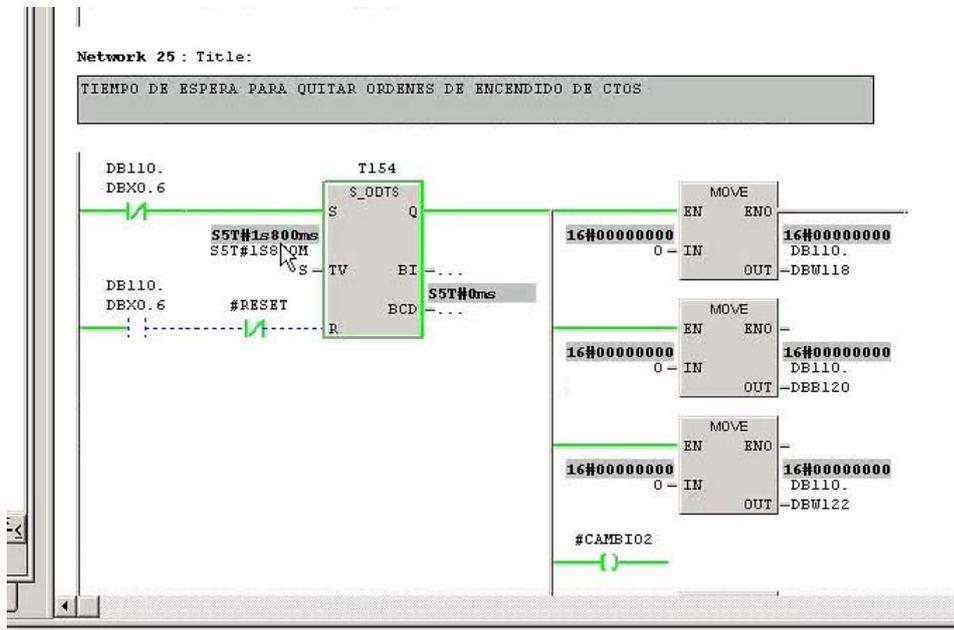
Fuente: Sistema SCADA de los túneles

Figura 28. FC124 y FC127 ON / OFF de los circuitos de operación



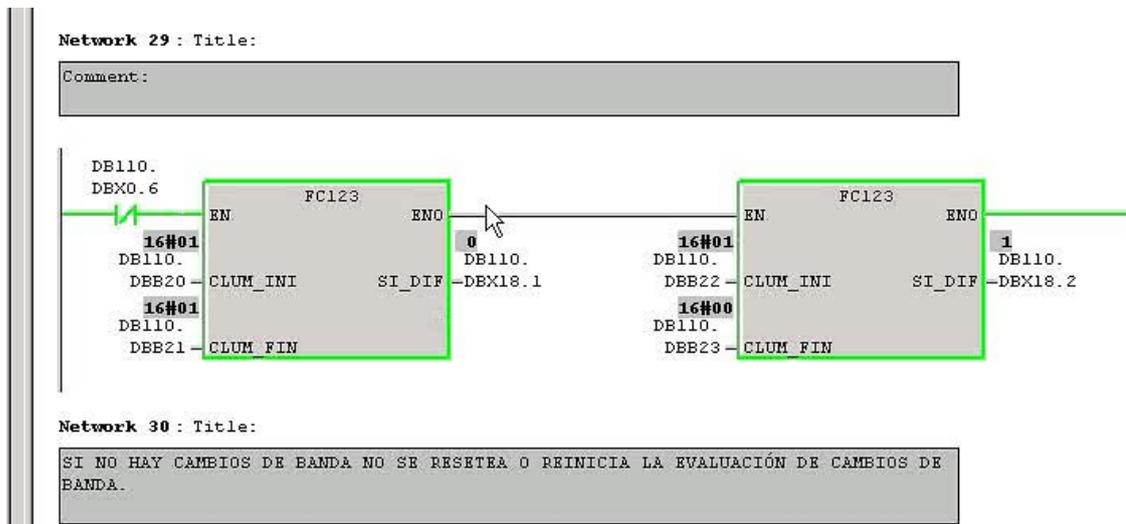
Fuente: Sistema SCADA de los túneles

Figura 29. Rutina para borrar órdenes de ON u OFF de los circuitos



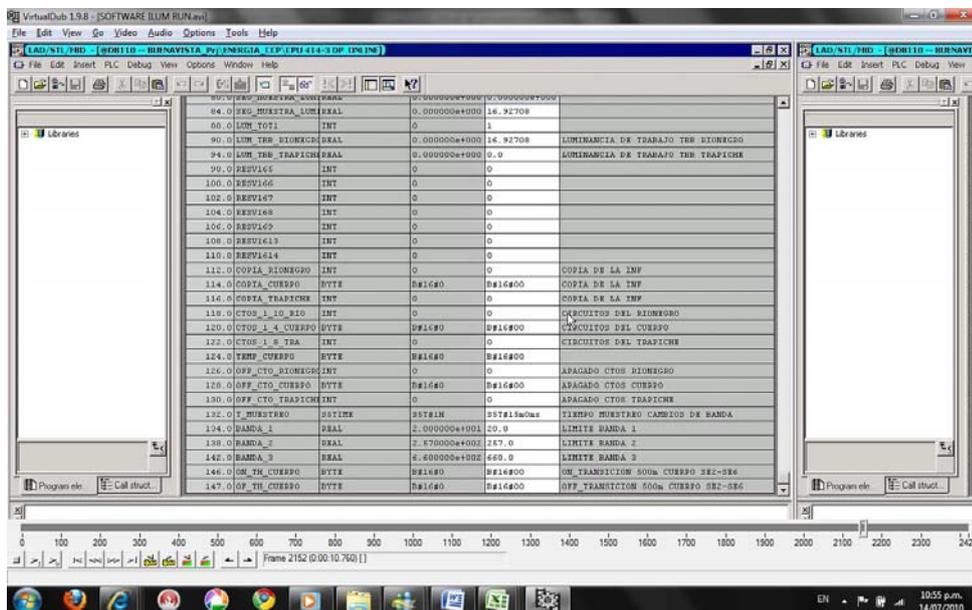
Fuente: Sistema SCADA de los túneles

Figura 30. Evaluador de cambios de banda posteriores



Fuente: Sistema SCADA de los túneles

Figura 31. DB110 que almacena todas las variables del nuevo algoritmo



Fuente: Sistema SCADA de los túneles

Figura 32. Luminarias 100% encendidas con software anterior (original)



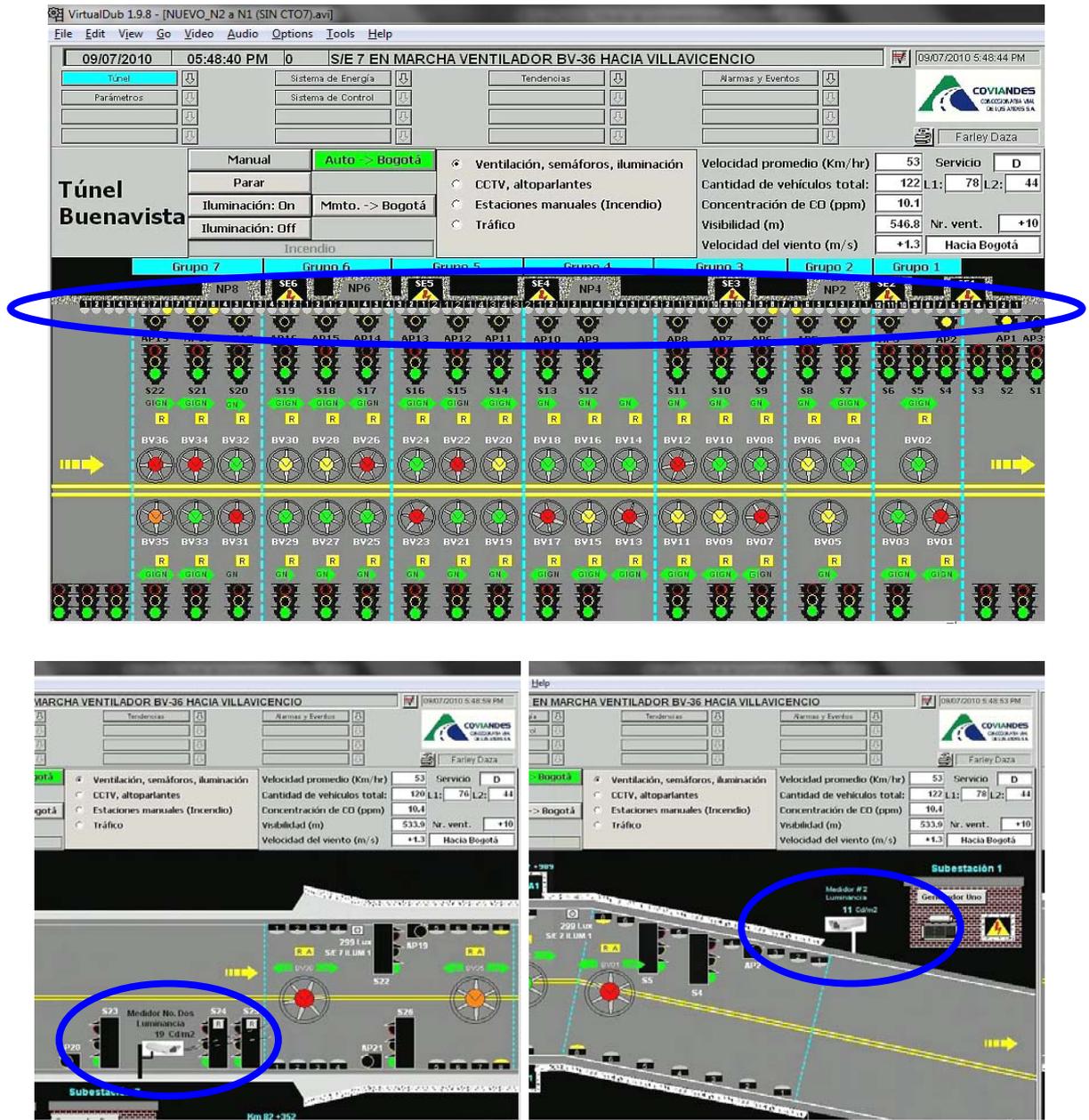
Fuente: Sistema SCADA de los túneles

Figura 33. Luminarias operan con el nuevo algoritmo, portales independientes, Interior2 apagado siempre



Fuente: Sistema SCADA de los túneles

Figura 34. Luminarias operan con el nuevo algoritmo, modo Nocturno solo CTO8



Fuente: Sistema SCADA de los túneles

En la figura 34 se observa como estando los luminancímetros exteriores a un nivel menor a 20 Cd/m^2 el sistema interno ha pasado a modo Nocturno, donde solo opera el CTO8 en los portales para superar los 19,1 lux de los accesos.

7.2 ESTIMADO DE AHORROS ENERGÉTICOS

7.2.1 Con estados fijos de operación modificados

Consideremos dos situaciones fijas de operación:

En el día para los 3 modos de operación (Nublado, Seminublado y Soleado) se ha dividido la zona Interior en dos subzonas (Interior1 e Interior2) y comparadas con el algoritmo original, la zona Interior2 siempre está apagada, por lo cual podemos calcular el ahorro energético Anual en Kwh/año mínimo fijo, así:

Circuitos que **no** operan:

Tabla 12. Circuitos que no operan en los 3 modos Diurnos

SUBESTACIÓN	CIRCUITO	POTENCIA (W)
3	3	1.610
3	4	1.300
4	1	1.610
4	2	1.430
4	3	1.350
4	4	1.170
5	1	1.170
5	2	1.170
5	3	1.610
5	4	1.300
	TOTAL (W)	13.720

Fuente: Autor

$$\text{Kwh/año} = W \cdot (12 \text{ horas}) \cdot (365 \text{ días}) / (1000) = \mathbf{-60.093,6 \text{ Kwh/año}}$$

Para el modo noche se ha adicionado la operación del circuito 8 de las subestaciones 2 y 7 respecto al algoritmo original, es decir en este modo fijo hay gasto, del resultado de éste, se obtiene el ahorro fijo de las dos situaciones fijas en los modos Nocturno y Diurnos, así:

Circuitos que **si** operan:

Tabla 13. Circuitos adicionales que operan en modo Nocturno

SUBESTACIÓN	CIRCUITO	POTENCIA (W)
2	8	1.690
7	8	1.040
	TOTAL (W)	2.730

Fuente: Autor

$$\text{Kwh/año} = W \cdot (12\text{horas}) \cdot (365\text{días}) / (1000) = +11.957,4 \text{ Kwh/año}$$

$$\text{Ahorro total} = -60.093,6 + 11.957,4$$

$$= -48.136,2 \text{ Kwh/año}$$

A una tarifa de \$298.17⁹ el ahorro fijo es de:

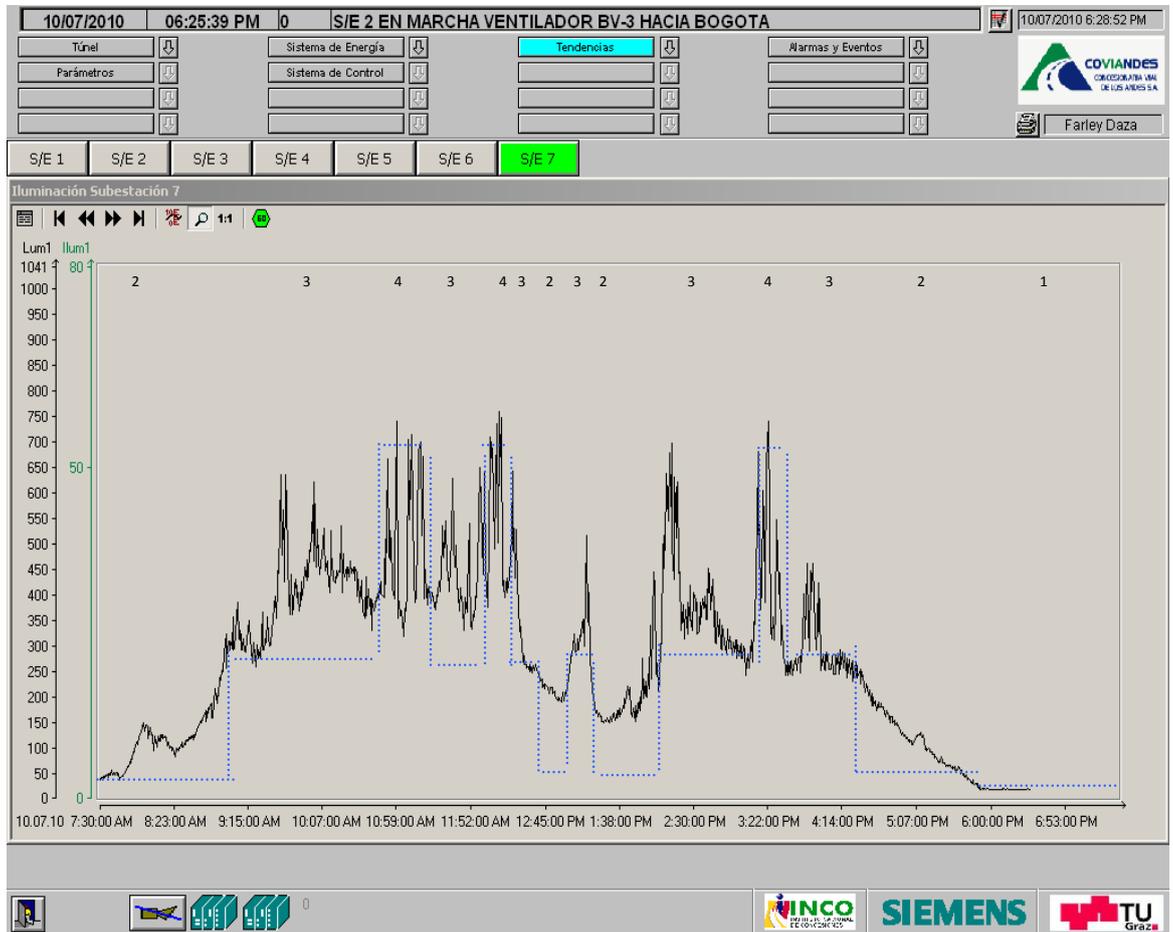
\$ 14'352.770,7 al año.

7.2.2 Con estados variables de operación

Ahorros en un estado normal de operación tomando un día común (24h) con luminancias tomadas del portal Trapiche:

⁹ Costo energía para el Túnel Buenavista del mes de Febrero de 2010.

Figura 35. Niveles de operación para las luminancias del portal Trapiche



Fuente: Autor

Tiempos de operación por nivel para 24 horas de operación:

Tabla 14. Niveles de operación para un día típico

NIVEL DE OPERACIÓN	HORA INICIO	HORA FIN	TOTAL HORAS
1	17:45	07:00	13:15
2	07:00	09:00	02:00
3	09:00	10:45	01:45
4	10:45	11:30	00:45
3	11:30	12:00	00:30
4	12:00	12:30	00:30
3	12:30	12:45	00:15
2	12:45	13:15	00:30
3	13:15	13:30	00:15
2	13:30	14:15	00:45
3	14:15	15:30	01:15
4	15:30	15:45	00:15
3	15:45	16:30	00:45
2	16:30	17:45	01:15

Fuente: Autor

Para facilitar el cálculo, evaluemos los niveles de ahorro para cada nivel de operación:

Nivel 1 (NOCTURNO)

En nivel 1 hemos revisado que hay un gasto ocasionado por el CTO8, equivalente a **+2.730W**

Nivel 2 (NUBLADO)

En nivel 2 de acuerdo a la tabla 11, no operan los CTO's:

- 1, 2, 3 Y 4 de las SE4 y 5.

- 3 y 4 SE3.
- 2, 3, 5, 6 y 7 de las SE2 y 7

Resumiendo los niveles de consumo tomados de las memorias de cálculo, tenemos respectivamente un ahorro de:

- -10.810W
- -1.910W
- $(-7.662-7.664-7.554-5.994-2.660) + (5.748-5.748-5.036-5.036-1.520) = 54.622W$
- Total = $-10.810-1.910-54.622 =$
-67.342W

Nivel 3 (SEMINUBLADO)

En nivel 3 de acuerdo a la tabla 11, no operan los CTO's:

- 1, 2, 3 Y 4 de las SE4 y 5.
- 3 y 4 SE3.
- 3 y 6 de las SE2 y 7

Resumiendo los niveles de consumo tomados de las memorias de cálculo, tenemos respectivamente un ahorro de:

- -10.810W
- -1.910W
- $(-7.664-5.994) + (5.748-5.036) = 24.442$
- Total = $-10.810-1.910-24.442 =$
-37.162W

Nivel 4 (SOLEADO)

En nivel 4 de acuerdo a la tabla 11, no operan los CTO's:

- 1, 2, 3 Y 4 de las SE4 y 5.
- 3 y 4 SE3.

Resumiendo los niveles de consumo tomados de las memorias de cálculo, tenemos respectivamente un ahorro de:

- -10.810W
- -1.910W
- Total = -10.810-1.910= **-12.720W**

La formula de cálculo de ahorro general es:

Ecuación 3.

$$Pa = (P1(h1) + P2(h2) + P3(h3) + P4(h4)) * (365) / 1000$$

Pa = Potencia de ahorro anual.

Px = Potencia en el nivel x.

h1 = Horas de operación en el nivel x.

Ahora para la tabla 14 tenemos los siguientes datos:

h1 = 13:15

h2 = 04:30

h3 = 04:45

h4 = 01:30

Aplicando la ecuación 3 tenemos:

$$\begin{aligned} Pa &= ((+2.730 * 13:45h) + (-67.342 * 04:30) + (-37.162 * 04:45) + \\ & \quad (-12.720 * 01:30)) * 365 / 1000 \\ &= \mathbf{-168.800,09 \text{ Kwh/año}} \end{aligned}$$

Con un valor de \$298,17 el Kwh, el ahorro anual puede llegar a ser de:

$$\mathbf{\$ - 50'331.122,84}$$

7.3 Alcances de ahorro energético propuestos por el PROURE

De conformidad con la resolución **180919 del 01 de Junio de 2010 PROURE** del Ministerio de Minas y Energía, este tipo de proyectos pueden apuntar a un ahorro energético, cuyo resultado para la empresa privada trae beneficios tributarios importantes como incentivos al cambio tecnológico y Uso racional de la Energía.

De acuerdo con los cálculos anteriores, y un consumo anual promedio del túnel estimado en **4'829.459,7 Kwh/año**, se estima un ahorro de **168.800,09 Kwh/año**, es decir, un ahorro del **3,49%**, esto quiere decir que el proyecto de actualización del algoritmo no solo trae beneficios en ahorro de energía sino que pone a la empresa en un nivel de competitividad ya que de entrada cumple con la proyección de ahorro energético propuesto en los **Art. 5 y 6** de la resolución 180919 del 01 de Junio de 2010 PROURE, la cual indica un ahorro mínimo 3.43% para el sector industrial y un 2.66% par el sector Comercial en los primeros 6 años.

8. CONCLUSIONES

1. El túnel de Buenavista es apto para ser objeto de actualización de norma de la CIE88:1990 (diseño original) a la norma CIE 88:2004, dado que cuenta con sectores de iluminación controlables los cuales se pudieron ajustar de acuerdo a las Luminancias existentes en cada portal.
2. Los valores de luminancia tienen un valor de incertidumbre dado que no están ubicados a las distancias de seguridad DS recomendadas por la norma CIE 88:2004, por lo cual se ha sobredimensionado el cálculo en el presente trabajo para que los resultados sean satisfactorios.
3. La baja uniformidad evidente en la tabla 5 no es concluyente, dado que el iluminancímetro no es el instrumento recomendado por la CIE88:2004 para la medición de uniformidades en túneles, siendo el adecuado el Luminancímetro, pero por la carencia de éste equipo se usa el mismo método del diseñador con base en el Luxómetro (iluminancímetro) y la relación Luminancia/iluminancia, cabe aclarar que las uniformidades en Luminancia pueden estarse cumpliendo, siendo solo comprobables hasta tanto se ejecute la medida con el instrumento adecuado y recomendado por la CIE.
4. Teniendo en cuenta la simetría de operación del portal Rionegro con el portal Trapiche, se hacen mediciones solo en el portal Trapiche y las acciones a tomar en los circuitos de iluminación del lado Trapiche dan alcance a los mismos circuitos del lado Rionegro para las mismas bandas de operación, dado que las interdistancias entre luminarias son las mismas.
5. Se lograron fijar bandas de operación de acuerdo a las mediciones hechas, para el caso del Modo Nocturno, se reevaluó dado que los sensores de luminancia no descendieron de 11 Cd/m^2 y 19 Cd/m^2 en los portales Rionegro y Trapiche respectivamente, fijando la primera banda en 20 Cd/m^2 .
6. Se diseño y probó el algoritmo con éxito, Consignando en este trabajo los screens de la operación conforme a lo diseñado, queda para una segunda etapa desarrollar los screens de seguimiento histórico donde se deben graficar las luminancias vs. los circuitos que operan; así mismo las bandas de operación quedan para ajuste directo desde el software LADER en la DB110 (Bloque de datos) y para la segunda etapa estas variables quedan para ajuste desde el SCADA.
7. Se logra optimizar la operación independiente de los portales de acuerdo al valor del Luminancímetro respectivo en cada portal y el cuerpo del túnel se ha dividido en 2 zonas, una Interior1 e Interior2, siendo la Interior2 la de menor consumo energético ya que dejan de operar los circuitos 1, 2 ,3 y 4 de las subestaciones 4 y 5 en su totalidad las 24 horas del día, esto definitivamente resultará en ahorro de energía y optimización de la operación del sistema de iluminación.
8. Los ahorros significativos que da alcance la Conclusión 7, aplica siempre y cuando el tráfico vehicular no sea mayor a 400 vehículos/carril/ hora, momento en el cual el

cuerpo deberá estar a su plena capacidad, actualmente el túnel Buenavista tiene en promedio 150 vehículos/carril/hora.

9. Se mejora el confort Nocturno ya que en los portales se ha equiparado la iluminación interior (circuito 8) al encontrado en la zona de acceso antes de cada portal.
10. El ahorro energético solo será cuantificable cuando se lleven acabo las recomendaciones del presente trabajo.
11. El nuevo algoritmo de iluminación mejora el confort visual del usuario para cualquier condición lumínica exterior siempre y cuando no supere la capacidad instalada.
12. El valor L_{20} calculado en el presente trabajo se ejecuta de forma independiente, ya que en las memorias de cálculo del diseñador no están relacionadas para ninguno de los portales, así como tampoco la ubicación recomendada de los sensores de Luminancia.
13. Se logra una disminución en el número de operaciones de encendido y apagado de los circuitos de iluminación, contrarrestando el efecto visible en la figura 12.
14. De acuerdo los cálculos, puede esperarse un ahorro variable estimado de 168.800,09 **Kwh/año**, es decir, un ahorro anual cercano al **3,49%**, o visto desde otro punto de vista, el ahorro anual equivale prácticamente a un 50% del consumo facturado en 1 mes; el valor monetario ahorrado estimado en **\$50'331.122,84** compensaría en gran medida los gastos de reposición de luminarias, mantenimiento preventivo y correctivo a lo largo del año, haciéndose sostenible el sistema sin desmejorar el confort visual de los usuarios.
15. Los ahorros de la conclusión 14 son iniciales, pues recordemos que esta primer etapa contempla solo el Túnel Buenavista (4.520m) y en la segunda etapa se contempla el Túnel Bijagual (180m) el cual tiene una potencia instalada aproximada de 61.200W equivalente a un 40% de la potencia instalada en el túnel Buenavista, así entonces el % de ahorro energético se esperaría mayor o cercano al 5%.
16. De conformidad con el Art. 6 de la 180919 del 01 de Junio de 2010 PROURE, con la implementación del nuevo algoritmo se daría cumplimiento a las metas de ahorro energético y Uso Eficiente de la Energía proyectado a 6 años, tan solo en el primer año de implementación y operación de la solución o nuevo algoritmo, ya que estas definen niveles de disminución de 3,43% y 2,66% dependiendo del sector si es Industrial o Comercial y el túnel Buenavista en su primer etapa ofrecería una reducción del **3,49%**.
17. De conformidad con el Artículo 2, inciso (i) del protocolo de Kyoto, se da alcance al "fomento de la eficiencia energética en los sectores pertinentes de la economía nacional" proporcionando un ahorro de 168.800,09 Kwh/año equivalente a una reducción en emisiones de **Co** de **929,75 Ton/año**, aportando este proyecto en gran medida a la reducción del calentamiento global.

9. RECOMENDACIONES

1. La figura 5.1 de la CIE 88:2004 indica que la ubicación de los sensores de luminancia de los portales deben estar a una distancia equivalente a la distancia de frenado o distancia de seguridad DS, para el caso del portal Trapiche (ascendente) la DS = 68m y el sensor está ubicado a 110m, del lado Rionegro está ubicado a escasos 15m; para el túnel Bijagual los sensores están a 20m ascendente y a 110m descendente, por lo tanto las ubicaciones no son conformes con la norma y se recomienda su ajuste.
2. Es recomendable calibrar los medidores de luminancia e iluminancia y repetir las mediciones y cálculos hechos para fijar los parámetros de manera más acertada, es de anotar que estas calibraciones son posibles en los laboratorios LABE de la Universidad Nacional de Colombia.
3. Antes de realizar nuevamente las mediciones se recomienda hacer un plan exhaustivo de reposición y reparación de luminarias, así como su limpieza interna y externa, de tal manera que se puedan obtener niveles de iluminación cercanos a los de niveles de diseño mantenidos.
4. Para disminuir aún más el efecto oscilante de encendidos y apagados debido a picos en los valores instantáneos de luminancias externas, se recomienda usar un valor promedio corto (se recomienda 5 minutos) para suavizar la curva o la tendencia de los valores de Luminancia y así tomarlo como insumo en el algoritmo del control de iluminación.
5. Para dar un desgaste parejo o equitativo a las luminarias de los circuitos que hacen parte o iluminan una misma zona, es recomendable modificar el algoritmo y agregar horómetros a cada circuito y que la toma de decisión de cual circuito encender sea el de menor horas de operación, así se da un uso parejo a todas las luminarias.
6. Debido a que se cuenta con los bit's de confirmación de entrada en operación de un circuito específico, es posible usarlo para detectar la falla del mismo y rápidamente dar soporte a la zona a iluminar con la entrada en servicio de otro circuito de potencia equivalente si está disponible, lo anterior con la finalidad de mantener siempre el confort visual cuando el sistema lo permita.
7. Es posible usar los sensores de iluminancia del interior del túnel para detectar bajas en los niveles de la iluminancia, siendo decisión del algoritmo reforzar esa zona con las luminarias de respaldo que estén disponibles, nuevamente esto con el fin de mejorar el confort visual.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Norma CIE-88: 2004, GUIDE FOR THE LIGHTING OF ROAD TUNNELS.
<http://www.docin.com/p-12525318.html>
- http://edison.upc.edu/curs/llum/luz_vision/p_visual.html
- <http://edison.upc.edu/curs/llum/exterior/inducc.html>
- http://www.schreder.com/documents/_Dossier/PDF/Spanish/200702081128/2014_TUNNEL_ES_V3Fin.pdf
- <http://www.obrasurbanas.es/files/data/297-92-97.sice.pdf>
- <http://www.enocean.com/>
- <http://www.sifisa.es/pdf/datasheet.pdf>
- <http://www.ocean-net.info/instrumentacion/deltaohm/Iluminancimetro.htm>
- <http://www.tunnel-lighting-control.com/index.html>
- Manual de operación y mantenimiento TBB-MO-001.PDF de los túneles BUENAVISTA y BIJAGUAL.
- Resolución 180540 del 30 de marzo de 2010 “RETILAP”.
- http://www.carandini.com/uploads/descargas/8626098_Proyecto_iluminacion_tunes_Pz_Lesepe_en_BCN.pdf
- <http://www.scribd.com/doc/17456327/Lighting-Handbook-INDAL-Guide-espanol->
- <http://www.librospdf.net/CIE-88/1/>
- <http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/ENERGIA/URE/Resol-Proure-180919-01-06-2010.pdf>
- <http://www.scribd.com/doc/20258149/Lighting-Handbook-THORN-Tunnel-Lighting>.
- Protocolo de Kyoto. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>