

ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA APLICADA AL CONTROL DEL SISTEMA DE
ILUMINACIÓN EN TÚNELES VEHICULARES

JUAN SEBASTIAN BENJUMEA HERRERA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN
2019

ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA APLICADA AL CONTROL DEL SISTEMA DE
ILUMINACIÓN EN TÚNELES VEHICULARES

JUAN SEBASTIAN BENJUMEA HERRERA

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en ingeniería

Asesor

JOSE VALENTIN ANTONIO RESTREPO LAVERDE

MSc. Ingeniero electrónico

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

MEDELLÍN

2019

31 de mayo de 2019

Juan Sebastian Benjumea Herrera

“Declaro que este trabajo de grado no ha sido presentado para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad” Art 82 Régimen Discente de Formación Avanzada.

Firma

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Juan Sebastian Benjumea Herrera', is centered on the page. The signature is written in a cursive style with a large initial 'J'.

CONTENIDO

Contenido.....	IV
Lista De Figuras	VII
Glosario.....	1
Resumen.....	3
Introducción.....	4
Objetivos	6
Objetivo General.....	6
Objetivos Específicos.....	6
1. Marco Teórico.....	7
1.1. Iluminación de Túneles y Pasos Subterráneos.....	7
1.1.1. Evolución histórica.....	7
1.1.2. Principios básicos para la iluminación de túneles.	7
1.1.3. Estructuras para sombreado.	9
1.1.4. Control del sistema de iluminación	10
1.2. Estándares Y Normas Internacionales De Referencia.....	11
1.2.1. CIE 88:2004	12
1.2.2. ANSI/IES RP-22-11	12
1.2.3. RETILAP	12
1.3. Visión Y Principios Biológicos	13
1.3.1. Visión fotópica y escotópica.	13
1.3.2. Visión mesópica.	14
1.4. Radiación Solar	15
1.5. Energía Solar Fotovoltaica.....	16
1.5.1. Corriente en celdas solares fotovoltaicas.	17
1.5.2. Voltaje en celdas solares fotovoltaicas.	17
2. Metodología.....	18
2.1. Recolección De Datos	18
2.1.1. Equipos de medida.....	18

2.1.2. Ubicación geográfica equipo SPV	23
2.1.3. Condiciones climáticas	24
2.1.4. Condiciones de radiación solar.....	25
2.1.5. Luminancia de umbral.	26
2.2. Caracterización.....	27
2.3. Diseño Electrónico.....	29
3. Resultados.....	32
3.1. Radiación Solar (E).....	32
3.2. Temperatura Ambiente (T_a).....	33
3.3. Corriente En El Panel Solar (I_{pv}).....	34
3.4 Luminancia En El Portal (L_{th}).....	35
3.4.1. Distancia De Parada.....	35
3.4.2. Método del contraste percibido.....	36
3.5. Voltaje En El Panel (V_{pv}).....	41
3.6. Voltaje En La Batería (V_B).....	42
3.7. Corriente En La Carga (I_C).....	43
3.8. Temperatura En La Batería (T_B).....	44
3.9. Correlación Entre Variables Directas $E - T_A - I_{PV} - L_{th}$	45
3.9.1. Radiación solar (E) - Corriente en el panel (I_{PV}).....	45
3.9.2. Radiación solar (E) - Temperatura ambiente (T_A).....	50
3.9.3. Temperatura ambiente (T_A) - Corriente en el panel (I_{PV}).....	54
3.9.4. Radiación solar (E) - Luminancia de umbral (L_{th}).....	54
3.9.5. Corriente en el panel (I_{PV}) - Luminancia de umbral (L_{th}).....	59
3.10. Correlación Entre Corriente En El Panel Y Variables Indirectas.....	60
3.10.1. Corriente en el panel (I_{PV}) – Voltaje en el panel (V_{PV}).....	60
3.10.2. Corriente en el panel (I_{PV}) – Voltaje en la batería (V_B).....	61
3.10.3. Corriente en el panel (I_{PV}) – Corriente en la carga (I_C).....	62
3.10.4. Corriente en el panel (I_{PV}) – Temperatura en la batería (T_B).....	63
4. Prototipo Electrónico.....	65
4.1. Dispositivo Maestro.....	65
4.1.1. Codificación.....	67
4.1.2. Software Maestro.....	71

4.2. Dispositivo Esclavo	71
4.2.1. Recepción dato de maestro	72
4.2.2. Decodificación: conversor D - A.....	72
(Elaboración propia)	73
4.2.3. Transmisión a luminaria: Control 0 – 10 V	73
4.2.4. Software Esclavo.....	73
4.3. Integración Maestro Esclavo	74
4.3.1. Comunicación inalámbrica.....	74
4.3.2. Modos de operación.	74
5. Análisis Multidimensional	78
5.1. Análisis Energético	79
5.2. Análisis Económico.....	81
6. Trabajo Futuro.....	83
7. Conclusiones.....	85
Referencias.....	86
Anexos	90
Anexo 1. Códigos programados en las diferentes plataformas de desarrollo	90
Anexo 1.1 Código programado en el sensor de corriente.	90
Anexo 1.2 Código en Processing para almacenar información.....	90
Anexo 1.3 Código Programado En Dispositivo Maestro	91
Anexo 1.4 Código programado en dispositivo Esclavo.	94
Anexo 2. Cálculo detallado de matriz Lij para evaluación de Lseq	97
Anexo 3	100

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Requerimientos luminancia a lo largo de un túnel.
- Figura 2. Nivel de luminancia en las distintas zonas de un túnel.
- Figura 3. Estructura para reducir L_{th} en la entrada de un túnel.
- Figura 4. Sensibilidad del ojo para visiones fotópica y escotópica.
- Figura 5. Sensibilidad del ojo para la visión mesópica.
- Figura 6. Radiación solar a través de la atmósfera
- Figura 7. Esquema de adquisición de datos
- Figura 8. Sensor de corriente no invasivo
- Figura 9. Ecuación de la curva que relaciona V e I en el sensor
- Figura 10. Hardware para medición de corriente
- Figura 11. Instalación de sensor en equipo solar fotovoltaico
- Figura 12. Ubicación y orientación de cámara de video
- Figura 13. Localización de equipo solar fotovoltaico
- Figura 14. Ubicación estaciones SIATA
- Figura 15. Promedio mensual de radiación global en Medellín.
- Figura 16. Luminancia en el transcurso de un día.
- Figura 17. Ubicación deprimido Avenida Oriental. CL 58 x CR 53, Medellín. MapGIS V5
- Figura 18. Curva típica para cada variable directa
- Figura 19. Señales adquiridas y señal resultante para control estándar 0 – 10 V
- Figura 20. Esquema para la situación de control
- Figura 21. Estados del sistema de control desarrollado.

Figura 22. Ubicación de dispositivos en el túnel.

Figura 23. Radiación solar de las tres estaciones y radiación promedio para el 24 de diciembre de 2018 entre las 6:00 y 6:59.

Figura 24. Temperatura de las dos estaciones y temperatura promedio para el 24 de diciembre de 2018 entre las 6:00 y 6:59.

Figura 25. Corriente del panel solar para el 24 de diciembre de 2018 entre las 6:00 y 6:59.

Figura 26. Coeficiente de fricción en función de la velocidad para pavimento seco y mojado

Figura 27. Fotografía del portal deprimido Av Oriental desde la distancia de parada

Figura 28. Curva de luminancia para el caso de estudio

Figura 29. Voltaje en el panel solar para el 24 de diciembre de 2018 entre las 6:00 y 6:59

Figura 30. Voltaje en la batería el 24 de diciembre de 2018 y 20 de febrero de 2019 entre las 6:00 y 6:59

Figura 31. Aplicación web UbiView propia de la marca UbiQuia

Figura 32. Corriente en la carga para el 24 de diciembre de 2018 entre las 6:00 y 6:59

Figura 33. Corriente en la carga para el 24 de diciembre de 2018 y 20 de febrero de 2019

Figura 34. Temperatura en la batería para el 24 de diciembre de 2018 entre las 6:00 y 6:59

Figura 35. I_{pv} vs E para el 26 de febrero de 2019

Figura 36. I_{pv} vs E para el 16 de diciembre de 2018 entre las 6:00 y las 17:59

Figura 37. I_{pv} vs E para los días 24, 31 de diciembre de 2018 y 11 de enero de 2019

Figura 38. Estados de carga según el algoritmo del PS-MPPT-25M

Figura 39. Día de mayor temperatura promedio durante el período de medición. Fecha: 22/02/2019. Temperatura promedio: 26.4°C. Horario de arriba a abajo: 09:00:05, 12:00:48, 15:00:0

Figura 40. Día de menor temperatura promedio durante el período de medición. Fecha: 09/01/2019. Temperatura promedio: 21.5°C. Horario de arriba a abajo: 09:00:31, 12:00:17, 15:00:3

Figura 41. E vs T_A para el día de mayor temperatura promedio

Figura 42. E vs T_A para el día de menor temperatura promedio

Figura 43. T_A vs I_{PV} para el día con menor temperatura promedio

Figura 44. I_{PV} vs L_{th} para el día 27 de diciembre de 2018

Figura 45. I_{PV} vs L_{th} para el día 25 de febrero de 2019

Figura 46. I_{PV} y V_{PV} para el 25 de febrero de 2019

Figura 47. I_{PV} y V_B para el 25 de febrero de 2019

Figura 48. I vs V para el 5 de enero de 2019

Figura 49. I_{PV} vs I_C para el 25 de febrero de 2019

Figura 50. I_{PV} vs T_B para el 25 de febrero de 2019

Figura 51. Temperatura en la batería

Figura 52. Prototipo maestro - esclavo

Figura 53. Vista externa del prototipo maestro

Figura 54. Modos en el panel del dispositivo Maestro

Figura 55. Diagrama de flujo en dispositivo Maestro

Figura 56. Esquema de circuito en el Maestro

Figura 57. Goniofotómetro Photoglobe II. Laboratorio CELSA S.A.S

Figura 58. Luminaria para túneles CosmoLED-EV marca CELSA. Potencia: 374W, flujo luminoso: 45.750 lm, temperatura de color: 4000K, control: 0 – 10 V, voltaje entrada: 220V

Figura 59 Curva de control 0 - 10 para la luminaria Cosmoled-EV

Figura 60. Vista externa del prototipo esclavo

Figura 61. Diagrama de flujo para ejecución de comandos en esclavo

Figura 62. Circuito esquemático del dispositivo esclavo

Figura 63. Diagrama de flujo para el modo "manual"

Figura 64. Diagrama de flujo para el modo 'mantenimiento'

Figura 65. Consumo energético para el sistema de iluminación sin control

Figura 66. Consumo energético para el sistema de iluminación con control

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 18

Tabla 2 19

Tabla 3 22

Tabla 4 33

Tabla 5 34

Tabla 6 35

Tabla 7 37

Tabla 8 38

Tabla 9 38

Tabla 10 41

Tabla 11 45

Tabla 12 49

Tabla 13 53

Tabla 14 55

Tabla 15 56

Tabla 16 56

Tabla 17 58

Tabla 18 69

Tabla 19 70

Tabla 20 70

Tabla 21 73

Tabla 22	78
Tabla 23	80
Tabla 24	81

GLOSARIO

CELDA SOLAR: dispositivo compuesto en su parte activa por elementos semiconductores capaces de convertir la luz en energía eléctrica. Una celda solar es la unidad básica que se conecta en serie o paralelo con otra de su mismo tipo para la construcción de paneles solares. (International Journal of Environmental Studies, 2014).

CIE: Comisión Internacional de Iluminación (Comission Internationale de l'Eclairage), establecida en 1913 como autoridad europea internacional en temas de iluminación con sede en Viena, Austria. (International Comission on Illumination, s.f.).

DISTANCIA DE PARADA: distancia necesaria para detener un vehículo en movimiento a determinada velocidad con total seguridad (CIE, 2004).

IESNA: Sociedad de Ingeniería de Iluminación de Norte América (Illuminating Engineering Society of North America), establecida en 1906 en Nueva York. Encargada de elaborar estándares en materia de iluminación (Illuminaton engineering society, s.f).

LUMINANCIA (L): en un punto de una superficie, en una dirección, se interpreta como la relación entre la intensidad luminosa en la dirección dada producida por un elemento de la superficie que rodea el punto, con el área de la proyección ortogonal del elemento de superficie sobre un plano perpendicular en la dirección dada. La unidad de la luminancia es candela por metro cuadrado (Cd/m^2) (Ministerio de Minas y Energía, 2010).

LUMINANCIA DE UMBRAL (L_{th}): luminancia promedio de la superficie de la vía en una ubicación específica de la zona de umbral (CIE, 2004).

LUMINANCIA DE VELO EQUIVALENTE (L_{seq}): velo de luz que resulta de la dispersión ocular y se cuantifica como luminancia (CIE, 2004).

LUMINANCIIMETRO: dispositivo para medir la luminancia media sobre un área específica, este aparato posee un sistema óptico que enfoca la imagen sobre un detector, mirando a través del sistema óptico el operador puede identificar el área sobre la que está midiendo la luminancia (Ministerio de Minas y Energía, 2010).

PORTAL DE ENTRADA: parte de la construcción del túnel que corresponde al inicio de la parte cubierta por el mismo, o (cuando se usan pantallas solares) al inicio de las pantallas solares (CIE, 2004).

PORTAL DE SALIDA: parte de la construcción del túnel que corresponde al final de la parte cubierta por el mismo, o (cuando se usan pantallas solares) al final de las pantallas solares (CIE, 2004).

RADIACIÓN SOLAR: energía que el sol proporciona en forma de radiación, dicha energía es generada en el núcleo del sol gracias a la fusión de los átomos de hidrógeno en helio haciendo del sol un enorme reactor de fusión nuclear (International Journal of Environmental Studies, 2014).

TÚNEL: estructura sobre el camino que restringe la iluminación normal diurna sobre una sección del camino, de tal manera que, la habilidad del conductor para ver es sustancialmente disminuida. Un túnel tiene diferentes zonas en su interior siendo en su orden: zona de acceso, zona de umbral, zona de transición, zona interior y zona de salida (CIE, 2004).

VISIÓN ESCOTÓPICA: visión del ojo humano bajo condiciones de poca luz. Esta visión se da gracias a los bastoncillos ubicados en la retina, estos son sensibles a longitudes de onda cercanas a los 498 nm (verde - azul) y son insensibles a longitudes de onda por encima de 640 nm (rojo) (CIE, 1983).

VISION FOTÓPICA: visión del ojo humano en ambientes bien iluminados. Esta visión permite la percepción del color dado que la luz es percibida por los conos en tres diferentes longitudes de onda, 420 nm (azul), 534 nm (verde) y 640 nm (rojo) (CIE, 1990).

VISIÓN MESÓPICA: combinación o visión intermedia entre las visiones escotópica y fotópica, propia de condiciones de poca luz sin ser totalmente oscuro (CIE, 2010).

ZONA DE ACCESO: parte del camino a cielo abierto inmediatamente afuera (en frente de) del portal del túnel, cubre la distancia en la cual un conductor acercándose debe ser capaz de ver dentro del túnel. La zona de acceso inicia en el punto de distancia de parada delante del portal y finaliza en el portal de entrada (CIE, 2004).

ZONA DE SALIDA: parte del túnel donde, durante el día, la visión de un conductor que se aproxima a la salida está predominantemente influenciada por el brillo a las afueras del túnel. La zona de salida comienza al final de la zona interior y termina en el portal de salida del túnel (CIE, 2004).

ZONA DE TRANSICIÓN: parte del túnel que está directamente después de la zona de umbral. La zona de transición comienza al final de la zona de umbral y termina en donde comienza la zona interior. En la zona de transición, el nivel de iluminación va decreciendo desde el nivel de la zona de umbral hasta el nivel de la zona interior (CIE, 2004).

ZONA DE UMBRAL: primera parte del túnel, directamente después del portal. La zona de umbral inicia desde el principio del túnel o al principio de las pantallas solares cuando son instaladas. La longitud de la zona de umbral es por lo menos igual a la distancia de parada (CIE, 2004).

ZONA INTERIOR: Parte del túnel que está directamente después de la zona de transición, esta se extiende desde el final de la zona de transición hasta el inicio de la zona de salida (CIE, 2004).

RESUMEN

El presente trabajo muestra una manera alternativa de controlar el sistema de iluminación de un túnel o paso a desnivel. Para esto se concibió la energía solar fotovoltaica no solo como fuente de energía sino como fuente de una señal de control capaz de describir el comportamiento de la luminancia de umbral en el portal de un túnel en el transcurso de un día. Para lograrlo se recolectó información durante tres meses de cuatro variables directas y cuatro indirectas con el fin de encontrar la relación entre las curvas de irradiancia solar global horizontal (E), temperatura ambiente (TA), corriente de salida de un panel solar fotovoltaico de silicio policristalino (IPV) y luminancia percibida por un conductor situado en el punto de distancia de parada a la entrada de un túnel (Lth).

El análisis de la información recolectada permitió caracterizar la situación particular del deprimido de la Avenida Oriental en la ciudad de Medellín. Además se desarrolló y configuró un prototipo de control electrónico que a partir de la información suministrada por un panel solar fotovoltaico es capaz de controlar la intensidad de las luminarias a través del protocolo 0 – 10V.

PALABRAS CLAVE: Control electrónico; energía solar fotovoltaica; luminancia de umbral; paso a desnivel; sistema de iluminación; túnel vehicular.

INTRODUCCIÓN

La probabilidad que ocurra un accidente en un túnel vehicular o un paso subterráneo es menor si se compara con estadísticas en vías a cielo abierto, sin embargo, en un túnel las consecuencias de un accidente pueden ser severas dado que la atención del siniestro aumenta en complejidad (Leitner, 2001, p. 217). Por lo anterior se hace imprescindible disponer de altos estándares de seguridad en todos los aspectos técnicos de diseño y construcción de un túnel, incluyendo sistemas de evacuación y emergencia que permitan reducir la probabilidad de accidentes así como las consecuencias de los mismos (Mashimo, 2002, p.152). Tal prevención se logra, desde el punto de vista de la iluminación, proporcionando condiciones de luz artificial que permitan un adecuado proceso de adaptación del ojo humano cuando se enfrenta a la transición propia de un túnel, pasar de un ambiente iluminado por el sol hacia otro totalmente oscuro, considerando que dicha transición se da a la velocidad de tránsito del automóvil. Por otra parte, es posible minimizar el riesgo de accidente influyendo en la atención del conductor que se ve afectada por la monótona que se puede tornar la vía, con la ayuda de efectos de iluminación o diferentes guías visuales en el ambiente (Kircher & Ahlstrom, 2012, p.153).

El sistema de iluminación de un túnel, además de proporcionar visibilidad y condiciones seguras para el flujo vehicular, resalta por ser, después del sistema de ventilación, el de mayor demanda energética a causa del número de luminarias, de potencia considerable, que son necesarias para contrarrestar, de acuerdo con normas internacionales, los altos niveles de luminancia producidos por el sol en la zona de acceso al túnel. El alto consumo energético abre la puerta a propuestas que busquen contribuir al ahorro de energía sin dejar de cumplir con requisitos técnicos y de seguridad exigidos por la reglamentación internacional.

La CIE 88:2004 es el estándar europeo que, en los países que ha sido adoptado, dicta las pautas para la adecuada iluminación de túneles y pasos subterráneos. Esta norma establece que durante el día se debe iluminar la entrada al túnel de acuerdo con la intensidad lumínica aportada por el sol en la zona justo antes de la entrada al mismo, es decir, a mayor intensidad del sol antes de la entrada se debe iluminar artificialmente la zona justo después de la entrada con mayor intensidad y lo mismo ocurre con cada una de las zonas hasta el interior del túnel (CIE, 2004, p.2). Lo anterior se debe a los factores biológicos de la visión humana que, aunque se adapta automáticamente cuando hay transiciones entre ambientes iluminados y ambientes oscuros, no lo hace de manera inmediata, situación que pone en riesgo a los conductores que entran a un túnel y quedan temporalmente ciegos ante la ausencia de niveles adecuados de luz (INDAL, 2002, p. 28).

Ante el panorama expuesto es claro que con la tecnología disponible actualmente en sistemas de iluminación es necesario consumir energía en grandes cantidades con el objetivo de evitar accidentes de tránsito producidos por la ceguera temporal presente en la entrada de un túnel, sin embargo, existen dispositivos de control capaces de atenuar el flujo luminoso de las luminarias con el fin de generar ahorros en momentos cuando no es necesario usar el sistema al cien por ciento. Estos constan básicamente de sistemas alimentados por información obtenida a través de sensores conocidos como luminancímetros, estos detectan la cantidad de luz en la entrada del túnel y ajustan el flujo luminoso de cada una de las luminarias del sistema de acuerdo con las condiciones detectadas. Este tipo de control es confiable y de alta precisión, no obstante, el costo que implica la instalación, transferencia de datos a largas distancias, constante calibración y mantenimiento, hacen que no sean económicamente viables en muchos de los túneles existentes o construidos con presupuesto limitado.

El presente trabajo pretende plantear una modificación en los sistemas actuales de control de iluminación para túneles proponiendo un nuevo método para determinar el nivel de luminancia de umbral requerida, que no utilice luminancímetros sino que se pueda determinar, de acuerdo con las condiciones del sol, cuánta es la luminancia necesaria para proporcionar condiciones seguras de tránsito, propiciando así disminución de costos de instalación, operación, mantenimiento y reposición tanto de las luminarias como del sistema de control. Como remplazo de los luminancímetros, surge la hipótesis bajo la cual es posible utilizar celdas solares que, además que pueden ser aprovechadas para energizar parte de los sistemas del túnel, pueden funcionar como sensor del cual es posible adquirir una señal que registre los cambios de la intensidad del sol y brinde la información necesaria para ajustar la intensidad de las luminarias de acuerdo con las condiciones que garanticen una correcta visión al conductor.

Por último, y considerando todos los escenarios, tras la investigación se responderá la pregunta ¿de qué manera es posible relacionar la radiación solar con la luminancia a la entrada de un túnel con el fin de controlar la iluminación en tiempo real? Con este resultado se busca establecer si el método encontrado es viable a nivel técnico y económico como para ser adoptado como método alternativo para el control de iluminación en túneles.

OBJETIVOS

Objetivo General

Desarrollar un prototipo electrónico para el control del sistema de iluminación de un túnel usando celdas solares fotovoltaicas como sensor.

Objetivos Específicos

Registrar las variables: radiación solar horizontal, temperatura ambiente y corriente del panel solar durante tres meses identificando el tipo de día: soleado, nublado-seco, nublado-lluvia, haciendo uso de bases de datos y mediciones in situ con equipos solares fotovoltaicos.

Obtener la curva de luminancia, de acuerdo con la CIE 88:2004, para la entrada occidental del paso subterráneo de la Avenida Oriental de la ciudad de Medellín.

Caracterizar las curvas de radiación, temperatura, corriente y luminancia para su tratamiento matemático.

Relacionar matemáticamente las curvas de radiación, temperatura, corriente y luminancia para incluir la fórmula obtenida en el algoritmo de control.

Diseñar hardware y software que sea capaz de controlar, con base en las curvas estudiadas, el flujo luminoso de una luminaria LED

Definir límites, restricciones y configuración necesaria para que el dispositivo controle la iluminación de un paso subterráneo.

1. MARCO TEORICO

Con el fin de comprender el contexto en el que se desarrolla el presente trabajo es necesario, además de leer las definiciones mostradas en el glosario, conocer brevemente algunos conceptos luminotécnicos así como la relación de estos con diferentes condiciones físicas y biológicas que dan soporte al desarrollo propuesto.

En primer lugar se presentan las consideraciones luminotécnicas relevantes en cuanto a los túneles se refiere, cuál es la normativa internacional vigente y técnicamente de qué manera es posible maximizar ahorros energéticos en el sistema de iluminación de un túnel. En segunda instancia, se consideran las condiciones humanas que le dan particular importancia a la iluminación de túneles, y por último, se muestran las consideraciones con las que es posible relacionar los temas mencionados con la energía solar fotovoltaica.

1.1. Iluminación de Túneles y Pasos Subterráneos

Los motivos y la manera en la cual se debe iluminar tanto de día como de noche un túnel vehicular obedece a la base teórica desarrollada a lo largo de las últimas cinco décadas principalmente por aportes europeos. A continuación se presenta la evolución histórica y las consideraciones esenciales bajo las cuales se fundamenta el presente trabajo.

1.1.1. Evolución histórica.

La iluminación de túneles cobró importancia internacionalmente, por primera vez, gracias a la comunidad europea, concretamente a partir de la década de los 60's cuando Duco Schreuder presentó su tesis doctoral "The lighting of vehicular traffic tunnels" en la Universidad Técnica de Eindhoven, Holanda, construyendo así los cimientos para la normativa actual acerca de dicho tipo de iluminación (Schreuder, 1964, p.63).

A partir del trabajo de Schreuder comenzó la evolución del tema en manos de la CIE, Comisión Internacional en Iluminación (por sus siglas en francés), la cual publicó sus primeras recomendaciones en el estándar CIE 26 (1973) "International recommendations for tunnel lighting". Esta norma fue complementada 11 años después por la CIE 61 (1984) "Tunnel entrance lighting: A survey of fundamentals for determining the luminance in the threshold zone". Ambos estándares sentaron las bases para la guía internacional CIE 88 (2004) "Guide for the lighting of road tunnels and underpasses" que a la fecha de elaboración de este trabajo continúa vigente.

1.1.2. Principios básicos para la iluminación de túneles.

Para iluminar un túnel se deben cumplir requisitos totalmente diferentes ya sea de día o de noche. Durante la noche se deben suministrar al interior del túnel niveles de luminancia similares a los aportados por las luminarias dispuestas en la vía a cielo abierto,

pero durante el día el sistema adquiere complejidad debido a la capacidad visual humana. Un observador situado al interior de un carro, desplazándose a una velocidad determinada, debe ser capaz de detectar la presencia y el movimiento de los objetos sobre la vía, considerados por referencia de 0.2 m x 0.2 m, que se sitúan al frente de él, capacidad que se ve disminuida al momento de ingresar a un túnel. Por tanto, la iluminación diurna de un túnel obedece a una curva descendente de luminancia, la cual, de acuerdo con parámetros de entrada, inicia en un nivel alto de luminancia y a medida que el observador ingresa en el túnel se reduce paulatinamente dicho nivel hasta llegar a un nivel estable en el interior (CIE, 2004, p. 3).

En la Figura 1 se muestran las secciones de un túnel y la curva de variación de la luminancia de acuerdo con los requisitos para cada una de las secciones.

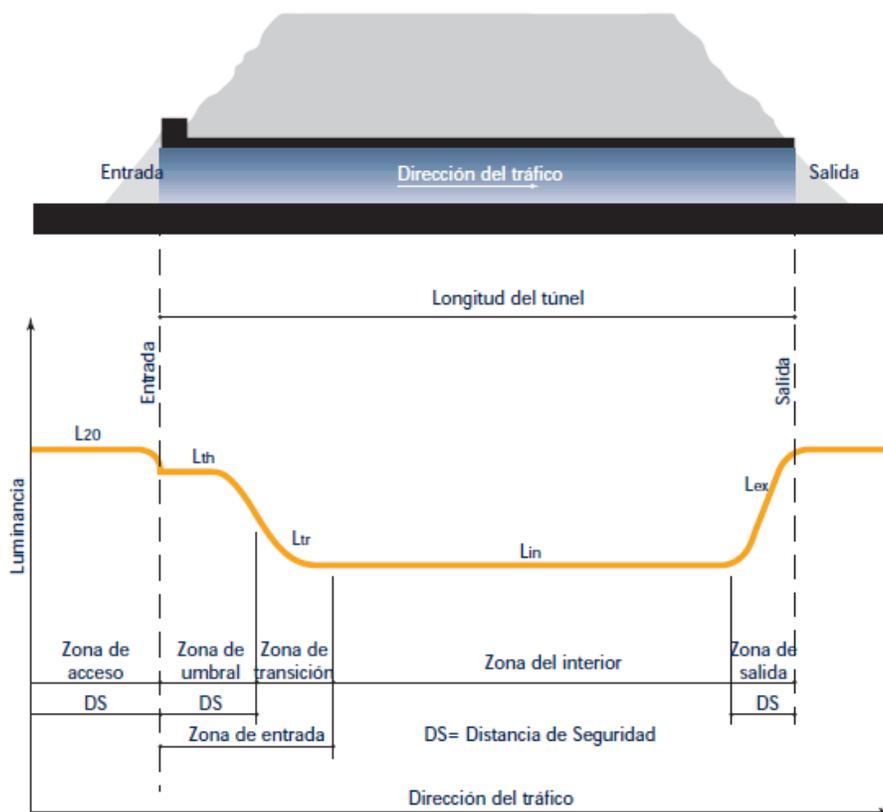


Figura 1. Requerimientos luminancia a lo largo de un túnel (INDAL, S, 2002, p. 242).

Con el fin de determinar los valores precisos se debe calcular, para cada túnel en particular, la luminancia de umbral L_{th} , ya sea por el método de contraste percibido o el método L_{20} , ambos descritos a profundidad en la norma CIE 88:2004. Para hallar dicha luminancia se debe considerar la velocidad del observador, el hemisferio en el cual se encuentra el túnel, la pendiente de la vía, la condición de piso seco o mojado y la

luminancia percibida por el ojo en un cono de visión de 20° respecto a la horizontal (CIE, 2004, p. 10).

De manera práctica se utilizará este método en la sección 3.3 del presente trabajo. Una vez hallados los parámetros de entrada se define la curva que debe seguir el sistema de iluminación a lo largo del túnel, como se muestra en la Figura 2.

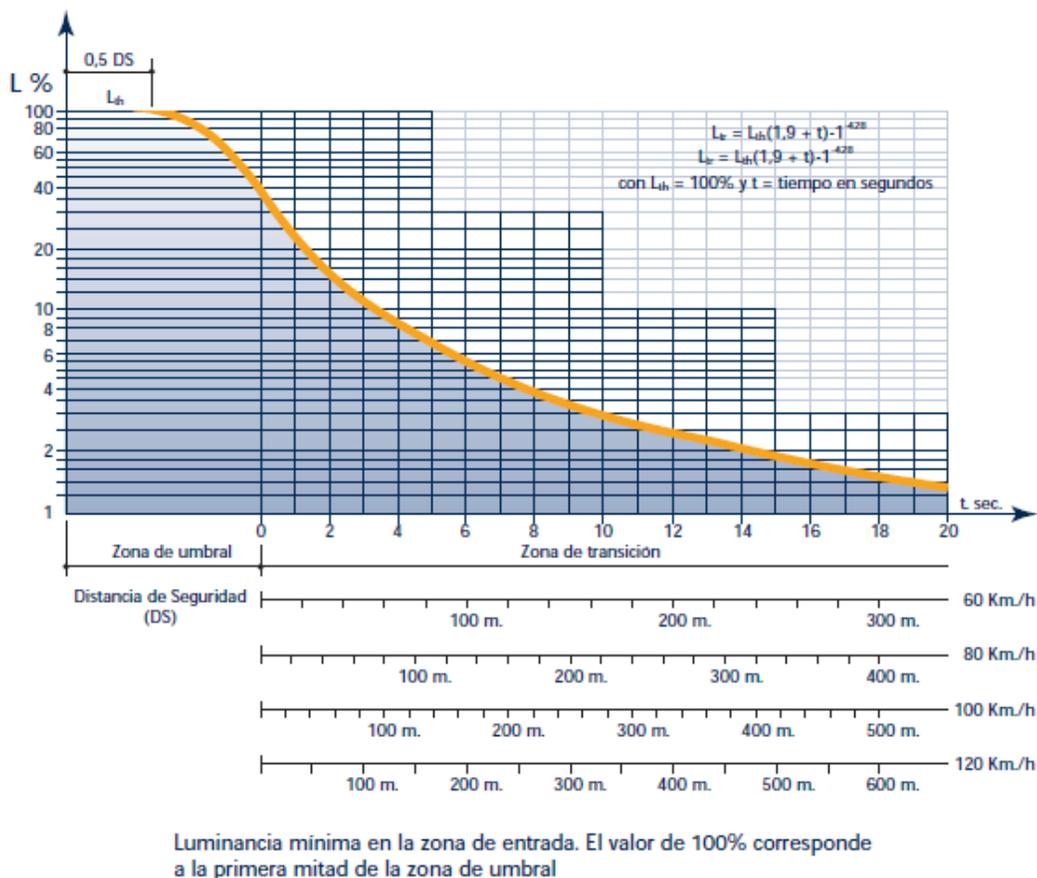


Figura 2. Nivel de luminancia en las distintas zonas de un túnel (INDAL, S, 2002, p. 247).

Debido a que el nivel de luminancia es directamente proporcional a la luminancia de umbral L_{th} , se induce que la curva no es estática, esta varía el nivel requerido de iluminación de acuerdo con las condiciones climáticas, suponiendo una L_{th} mayor los días soleados y menor en días nublados, incluso esta variación resulta en el transcurso de un día, con el valor máximo de L_{th} para el medio día e inferior tanto al amanecer como al atardecer.

1.1.3. Estructuras para sombreado.

Arquitectónicamente es posible construir estructuras justo antes de la entrada del túnel con el fin de disminuir la alta luminancia ocasionada por el sol, es decir, objetos que

hagan parte de la estructura del túnel con la finalidad de generar sombra justo antes de la entrada del mismo de tal manera que se reduzca la L_{th} requerida para el diseño luminotécnico, a menor L_{th} se requerirá un menor nivel de luminancia en la zona de entrada, lo que supone ahorro de energía. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de una estructura para sombreado con la que se logra crear sombras controladas a la entrada del túnel y por tanto es posible disminuir el nivel de iluminación requerido a lo largo de este (Salam et al., 2014, 520).



Figura 3. Estructura para reducir L_{th} en la entrada de un túnel (Salam et al., 2014, p.519).

Para este trabajo surge la idea de trabajar con este tipo de estructuras no solo con la finalidad de generar sombrar sino para que también cumplan función de soporte a celdas solares fotovoltaicas, bien sean traslucidas de capa delgada o policristalinas, que generen pequeñas cantidades de energía útiles para alimentar ya sea parte del sistema de iluminación o la señalización propia de la vía. Una vez instalados los sistemas solares fotovoltaicos en la entrada del túnel sería posible obtener de las mismas celdas una señal capaz de controlar la intensidad luminosa de las luminarias del sistema, tema en el que se centra el presente trabajo de grado.

1.1.4. Control del sistema de iluminación

Respecto al control de la iluminación, en el trabajo de Schreuder de 1964 se menciona este término orientado a la manipulación del flujo luminoso de luminarias fluorescentes, tecnología disponible en la época, con la finalidad de obtener los niveles de luminancia deseados en cada uno de los sectores del túnel. En la normativa actual se dan pautas y ciertas recomendaciones acerca del tema, haciendo claridad en que, sea cual sea el control instalado, se deben respetar los niveles mínimos exigidos para así reducir la probabilidad de accidentes (CIE, 2004, p. 19).

A nivel mundial se han producido durante los últimos años avances en materia de control de este tipo de instalaciones, tanto por parte de la academia como por parte del sector empresarial, que buscan aumentar la eficiencia del sistema para así reducir costos. En el 2011, tras la introducción de la tecnología LED se llevó a cabo un trabajo conjunto

entre las universidades chinas Hangzhou Dianzi y Nanchang Hang Kong en el cual se desarrolló un algoritmo con lógica difusa para controlar el consumo de energía en el túnel de Lengshui. Se logró tras 10 meses de implementación un ahorro de energía del 87% (Zeng et al., 2011, p.581).

En otra parte del mundo, precisamente en Italia, a través de un modelo integrado de verificación experimental instalado en un vehículo que llevaba por nombre Tiresia, equipado con sensores de luz, se pudo caracterizar fotométricamente un túnel evaluando el desempeño de su iluminación con el fin de detectar defectos en el sistema tratándolos como oportunidades de ahorro (Varilone et al., 2014, p.5).

En el ámbito empresarial también es posible encontrar contribuciones importantes acerca del tema. En Canadá se creó desde el 2008 la empresa Nyx Hemera Technologies, especialistas a nivel mundial en control de iluminación para túneles quienes implementaron su patentado sistema TLACS (Tunnel Lighting Addressable Control System). Este consta del control individual de las luminarias del sistema usando la comunicación por línea de potencia (PLC) con el fin de adaptar el brillo de cada luminaria de acuerdo con la luminancia a la entrada del túnel, definiendo de acuerdo con las necesidades del cliente estados predeterminados para el sistema que permiten ahorros de hasta un 50% en consumo de energía y retorno de la inversión inferior a tres años.

El sistema TLACS adquiere el dato de luminancia en la entrada del túnel de un luminancímetro instalado al aire libre a una distancia definida con respecto al portal (Nyx Hemera Technologies, s.f-b). Las soluciones a la medida de Nyx Hemera Technologies se pueden encontrar en funcionamiento en túneles como el de la Línea Amarilla en Perú, la Codina y Obaga Negra en España, Marina Coastal en Singapur, así como varios túneles urbanos en Nueva York, San Francisco, Milwaukee, Quebec y Montreal. En la actualidad adelantan trabajos para el control de la iluminación del Túnel de Oriente, construcción que se está llevando a cabo para conectar la ciudad de Medellín con el aeropuerto José María Córdova.

Con el desarrollo del presente trabajo se pretende remplazar el luminancímetro que se instala antes de entrar al túnel por un dispositivo como el mencionado al final de la sección 1.1.3.

1.2. Estándares Y Normas Internacionales De Referencia

Como ya se mencionó, existen diferentes organismos a nivel mundial que se encargan de elaborar los estándares técnicos bajo los cuales se rigen los trabajos con base luminotécnica. En el caso de túneles se destaca el estándar CIE 88:2004 de origen europeo y la ANSI/IES RP-22-11 de origen estadounidense, tal como se describen a continuación.

1.2.1. CIE 88:2004

Reporte europeo elaborado en el 2004 por el comité técnico 4-35 de la división cuatro de la CIE, surge como actualización del anterior estándar publicado en 1990, no se redacta de carácter mandatorio sino recomendatorio tanto para los países miembros de la CIE como cualquier otro interesado (CIE, 2004, p.2).

El estándar CIE 88:2004 plantea las recomendaciones concernientes a la iluminación de túneles tanto durante el día como durante la noche, de igual manera describe las medidas a tener en consideración para adaptar el sistema de iluminación a las fluctuaciones en el exterior o ante eventuales fallas en el suministro de energía eléctrica. El principal objetivo de esta norma es mejorar la seguridad en la vía, la cual depende de un gran número de factores y no solo de la iluminación, bajo el anterior contexto, lo que se busca con este estándar es, a través de la iluminación, darle la capacidad al usuario del túnel de visibilizar correctamente los obstáculos en el camino (CIE, 2004, p. 6).

1.2.2. ANSI/IES RP-22-11

Reporte técnico norteamericano publicado en el 2011 por la IESNA en el cual se consignan recomendaciones para el diseño en Norte América de sistemas de iluminación en túneles nuevos, aplicable a túneles existentes únicamente en el momento en que sea necesario un rediseño del sistema.

El estándar RP-22-11 se centra en la concepción de que la luz usada para iluminar túneles le permite a los motorizados conservar la velocidad y circular con seguridad. En los túneles es de especial importancia considerar el valor de la luminancia de umbral correlacionada con factores como la orientación geográfica, diseño geométrico, volumen de tráfico, velocidad de circulación, nivel de servicio, tipo de fuente usada y modos de aplicación de la luz (IESNA, 2011, p.1).

1.2.3. RETILAP

Desde marzo del 2010 rige para la república de Colombia el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público, que por sus iniciales adoptó el nombre de Retilap. En la sección 570 de este reglamento se especifican los requerimientos con los cuales debe cumplir cualquier instalación de iluminación dispuesta en un túnel dentro del territorio nacional (Ministerio de Minas y Energía, 2010, p. 173).

El Retilap fue concebido como la adaptación de diferentes normas internacionales, principalmente las publicadas por la CIE y le IESNA, es así como para la sección de túneles se hace referencia a la norma CIE 88:2004, tomándola como base para la adaptación hecha para Colombia, adaptación que no presenta ninguna alteración a la original, por el contrario, se cita la norma europea como referente nacional, pudiendo inclusive tomar referencia de cualquier otra norma internacional equivalente, es decir, la RP-22-11 tomaría validez para el país.

1.3. Visión Y Principios Biológicos

Los reglamentos y las consideraciones técnicas anteriormente presentadas se fundamentan en un hecho biológico propio de la visión humana, se trata de la pérdida temporal de la visión ocasionada por el proceso de adaptación al que se ven sometidos los ojos ante cambios abruptos en los niveles de iluminación, tal como se da en la entrada a un túnel (efecto hoyo negro) y a la salida del mismo (efecto hoyo blanco) (Zhigang et al., 2014, p.38).

En la retina del ojo humano se encuentran dos tipos de células fotosensibles, las primeras conocidas como conos se hallan principalmente en la fóvea, estas son sensibles a los colores y casi insensibles a la luz, por esta razón se encargan de percibir colores y discriminar detalles finos. Las segundas células se conocen como bastoncillos, estos se encuentran solo fuera de la fóvea, son sensibles a la luz y casi insensibles a los colores, por ende se encargan de diferenciar figuras ante bajos niveles de iluminación (INDAL, S, 2002, p. 24).

Las condiciones particulares de la visión de acuerdo con el tipo de células en funcionamiento se describen a continuación.

1.3.1. Visión fotópica y escotópica.

Ambas células fotosensibles, conos y bastoncillos, cumplen funciones opuestas. Los conos se encargan de percibir imágenes bajo condiciones óptimas de iluminación, como por ejemplo durante el día al aire libre. Por el contrario, en condiciones de baja iluminación, como por ejemplo dentro de un recinto cerrado sin iluminación, son los bastoncillos los encargados de percibir la luz que forma las imágenes para luego ser procesadas por el cerebro. A estos dos tipos de visión se les conoce por el nombre de fotópica y escotópica respectivamente, cada una con curva de sensibilidad como se muestra en la Figura 4 (INDAL, S, 2002, p. 26).

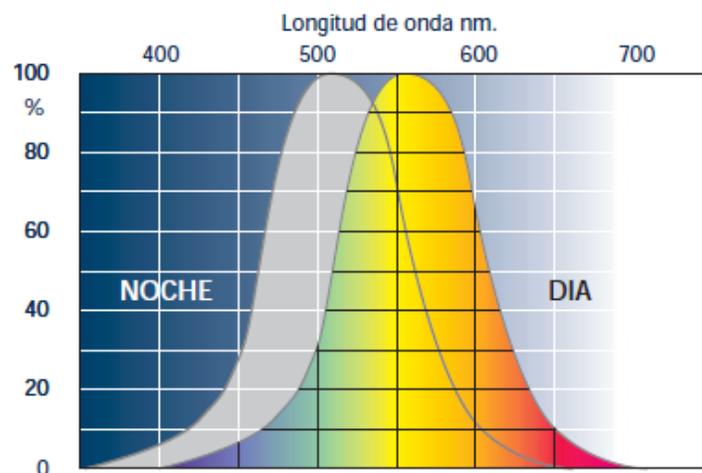


Figura 4. Sensibilidad del ojo para visiones fotópica y escotópica (INDAL, 2002, p. 26).

El proceso por el cual se pasa de un tipo de visión a la otra es conocido como adaptación, este proceso es automático pero no es instantáneo, hacen falta varios minutos para que el ojo humano pueda utilizar en su totalidad unas u otras células fotosensibles (INDAL, 2002, p.26).

El proceso de adaptación adquiere importancia en el efecto que se genera en la entrada de un túnel, el conductor durante el día se encuentra en un ambiente con condiciones de elevada luminancia mientras transita a cielo abierto, al entrar al túnel se pasa abruptamente a condiciones de baja iluminación activando el proceso de adaptación del ojo humano (Barbur y Stockman, 2010, p. 328). Si se considera que durante el proceso de adaptación la visión es limitada y que además se está en un vehículo a alta velocidad, se puede considerar que la probabilidad de accidentalidad aumenta.

1.3.2. Visión mesópica.

Existe una visión intermedia entre la visión fotópica y la escotópica, esta recibe el nombre de visión mesópica y se caracteriza por ser propia de condiciones bajas de iluminación pero no totalmente nulas; visión ubicada en la banda ubicada entre el umbral de los conos y la saturación de los bastoncillos, es decir, ambos tipos de células fotosensibles contribuyen para la respuesta visual (Barbur y Stockman, 2010, p. 323)

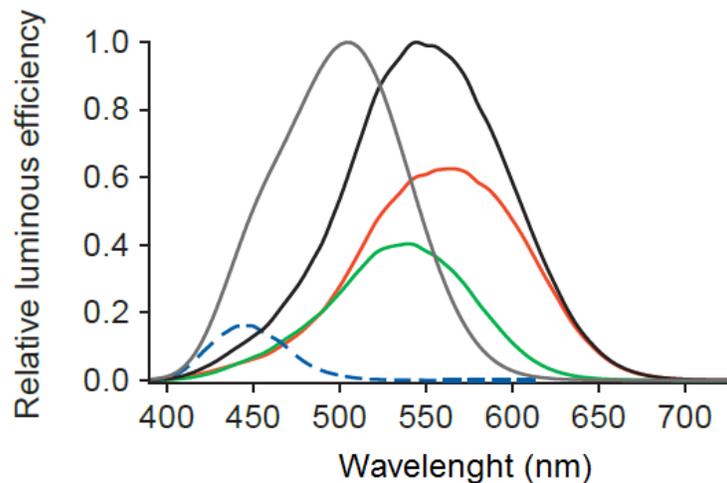


Figura 5. Sensibilidad del ojo para la visión mesópica (Barbur y Stockman, 2010, p. 325).

La Figura 5 muestra la sensibilidad del ojo ante diferentes longitudes de onda, sobre el eje horizontal la longitud de onda (Wavelength) y sobre el eje vertical la eficiencia luminosa relativa, se observa que para este tipo de visión se tienen la contribución tanto de la visión fotópica como la escotópica con baja percepción de color (Barbur y Stockman, 2010, p. 325).

La percepción del color varía de acuerdo con los cambios en la iluminancia, presentando las variaciones más considerables en niveles cercanos, tanto por encima

como por debajo, a los diez luxes (10 lx), valor cercano al límite entre la visión mesópica alta y la fotópica baja, razón por la cual en la visión mesópica es posible distinguir objetos y colores, pero ambas cualidades en condiciones precarias (Shin, Yaguchi, y Shioiri, 2004, p.270).

Tras las consideraciones tenidas en cuenta acerca de la visión y enmarcándolas en el escenario de los túneles, se tiene una situación en la cual durante el día, un conductor va a cierta velocidad en carretera a cielo abierto percibiendo objetos y colores con la visión fotópica gracias al funcionamiento de los conos, al entrar a un túnel sin iluminación, los niveles de luminancia se reducen drásticamente obligando a los bastoncillos a funcionar, dando como resultado visión mesópica por un corto lapso. Al llegar al interior del túnel, en oscuridad total, funcionarían únicamente los bastoncillos y se perdería por completo la percepción del color.

El objetivo de la iluminación artificial en los túneles, enmarcado en el escenario mencionado, es atenuar la caída drástica de luminancia y llevar al ojo al interior del túnel a niveles bajos de luminancia sin llegar nunca a niveles propios de la visión escotópica, incluso llegando a niveles de visión mesópica únicamente en condiciones de emergencia en donde se deben garantizar 10 lx promedio sobre la vía, es decir, límite entre visión mesópica alta y visión fotópica baja (CIE, 2004, p. 20).

1.4. Radiación Solar

El sol es un enorme reactor de fusión nuclear que convierte el hidrógeno en energía, solo una pequeña porción de esta energía alcanza la superficie terrestre, porción que es suficiente como para cubrir las necesidades energéticas de la humanidad actual 10.000 veces, es decir, solo sería necesario aprovechar el 0.01% de la energía que llega del sol a la superficie de la tierra para cubrir en su totalidad las necesidades del planeta (Sonnenenergie, 2008, p. 9).

Se considera 1367 W/m^2 como la constante solar, es decir, el valor promedio de la irradiancia presente en el planeta tierra pero por fuera de su atmósfera, dicha intensidad, al ingresar a la atmósfera, reduce su valor a causa de la reflexión, absorción (por ozono, vapor de agua, oxígeno y dióxido de carbono) y dispersión (por moléculas de aire, partículas de polvo o contaminación). Debido a los fenómenos presentes en la atmósfera se distinguen básicamente dos tipos de radiación, la directa que es la que llega a la superficie terrestre directamente del sol y la difusa que primero es dispersada por la bóveda celeste y no tiene una dirección definida (Figura 6) (Sonnenenergie, 2008, p. 10).

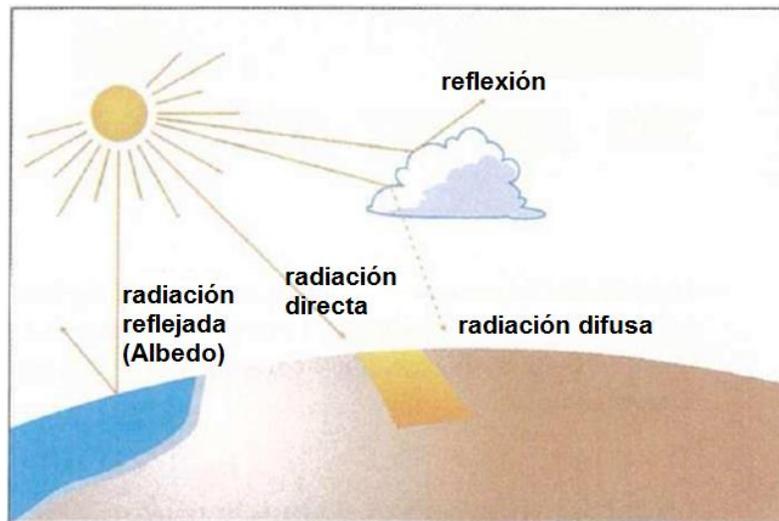


Figura 6. Radiación solar a través de la atmósfera

La luminancia de umbral (L_{th}) depende del índice de reflectancia de los alrededores de la entrada del túnel (ver Tabla 1), a mayor índice de reflexión, como por ejemplo nieve, mayor será el requerimiento de L_{th} , a menor índice de reflexión, como por ejemplo rocas, menor será el valor de L_{th} . En definitiva, la luz que proviene del sol, cuya intensidad es proporcional a la radiación solar directa, se refleja sobre los alrededores del portal del túnel y llegan hasta los ojos del observador, dando como resultado una luminancia de umbral dependiente de la intensidad luminosa del sol sobre la superficie y el índice de reflectancia de los alrededores.

Este trabajo pretende encontrar una manera de controlar la iluminación artificial de un túnel tomando como entrada del sistema la variación de la radiación solar y como configuración inicial la reflectancia de los alrededores, teniendo como resultado un sistema capaz de detectar el valor de luminancia de umbral (L_{th}) requerido de acuerdo con las condiciones de radiación solar directa.

1.5. Energía Solar Fotovoltaica

Se conoce como energía solar fotovoltaica al producto de la conversión de la luz solar en energía eléctrica a través de materiales semiconductores. La luz solar incide sobre el material y debido a reacciones a nivel atómico se genera una diferencia de potencial que a su vez produce una corriente en el momento en que se conecta una carga (Crabtree y Lewis, s/f).

El efecto fotovoltaico se produce en elementos comúnmente llamados celdas solares, estos deben contener en su estructura un material capaz de absorber luz en forma de fotones para de esta manera liberar electrones. Entre los materiales más ampliamente utilizados con la capacidad de absorber luz se encuentra el silicio en diferentes configuraciones estructurales: monocristalino, policristalino y amorfo (Parida, Iniyán, y Goic, 2011, p.1627). Este material es fabricado en pequeñas unidades conocidas como

'wafer', las cuales son dispuestas en arreglos serie y paralelo entre ellas para formar un panel solar con voltaje determinado: de circuito abierto y corriente de corto circuito (Rehman, Bader, y Al-Moallem, 2007, p.1846).

Para la instalación de un conjunto de celdas solares es necesario considerar factores externos como la acumulación de polvo relacionada con la contaminación, ángulos de inclinación asociados a la instalación del panel solar, recorridos del sol de acuerdo con la latitud y mes del año, entre otros (Kelly y Gibson, 2011, p.113).

1.5.1. Corriente en celdas solares fotovoltaicas.

La condición que se pretende aprovechar de la energía solar fotovoltaica para este trabajo es la relación existente entre la corriente producida por la radiación solar en un arreglo de celdas de silicio policristalino. Los cambios en la irradiancia afectan la corriente de manera directamente proporcional, a mayor irradiancia mayor corriente y viceversa (Sonnenenergie, 2008, p. 57).

Por lo anterior, se pretenden detectar los cambios en la radiación a través de la corriente medida a la salida de un panel solar, así, a mayor radiación se medirá mayor corriente y esto se entenderá como mayores requerimientos en la luminancia de umbral, y menores requerimientos en el sentido contrario.

1.5.2. Voltaje en celdas solares fotovoltaicas.

El voltaje permanece relativamente constante ante los cambios de irradiancia, pero se ve afectado severamente por los cambios de temperatura, a medida que aumenta la temperatura el voltaje disminuye, es así como, en países con estaciones, es posible obtener una diferencia considerable en el voltaje de los paneles si se compara el invierno con el verano, obteniendo valores más altos durante el invierno (Sonnenenergie, 2008, p. 88).

Aunque la temperatura no incide directamente en la corriente de una celda solar, y por lo consiguiente no es posible determinar variaciones de la radiación a través del voltaje, se considerará esta variable, 'voltaje', como un factor que puede incidir indirectamente en el control a desarrollar.

2. METODOLOGÍA

Se llevó a cabo un proceso investigativo compuesto por tres fases: recolección de datos, caracterización y diseño electrónico.

2.1. Recolección De Datos

Durante esta fase se recogieron datos desde varios frentes y con diferentes equipos, los cuales son descritos a profundidad en la sección 2.1.1 de este trabajo. Lo que se pretendía era obtener información de siete variables experimentalmente y de una teóricamente (Tabla 1) con intervalos de un minuto durante 12 horas diarias, las mismas en las cuales la luz del sol está disponible sobre territorio colombiano, es decir, desde las 6:00am hasta las 6:00pm.

Tabla 1
Variables registradas

Directas	Corriente en el panel solar	I_{PV}
	Temperatura ambiente	T_A
	Radiación solar	E
	Luminancia de umbral	L_{th}
Indirectas	Voltaje en el panel	V_{PV}
	Voltaje en la batería	V_B
	Corriente en la carga	I_C
	Temperatura en la batería	T_B

(Elaboración propia)

Las variables directas son aquellas que fueron consideradas, desde la concepción del proyecto de investigación, como las determinantes para la caracterización del fenómeno buscado. Las variables indirectas son aquellas que pueden influir de cierta manera en el control buscado pero no se conoce si lo pueden hacer de manera considerable.

La luminancia de umbral L_{th} se halló de manera teórica de acuerdo con lo descrito en el estándar internacional CIE 88:2004 (Ver sección 1.2.1).

La información anterior se recolectó durante tres meses continuos desde diciembre de 2018 hasta febrero de 2019, todos estos datos se pueden encontrar en el disco compacto (CD) anexo al trabajo.

2.1.1. Equipos de medida.

Se tomaron medidas con cuatro equipos diferentes: un equipo solar fotovoltaico, un medidor de corriente, tres piranómetros y tres termómetros.

Equipo solar fotovoltaico.

Se instaló en un lugar seguro del barrio Belén Fátima de la ciudad de Medellín, un sistema solar fotovoltaico (Tabla 2) con batería para almacenamiento de energía y un inversor para alimentar una carga a 110VAC, se consideró conveniente de estas características dado que durante el funcionamiento normal del dispositivo que se pretende desarrollar, el panel y su control no servirá únicamente como sistema para adquisición de datos sino como alimentación para parte de la carga del túnel.

Tabla 2

Equipo Solar Fotovoltaico



PANEL SOLAR	
Marca	Trinasolar
Referencia	TSM-250PC05A
Potencia máxima	250Wp
Voltaje circuito abierto	38 V
Corriente corto circuito	8.79 A
CONTROLADOR MPPT	
Marca	Morningstar
Referencia	PS-MPPT-25M
INVERSOR	
Marca	Morningstar
Referencia	SureSine 300
Potencia máxima de salida	300W
Voltaje de salida	115 Vac
Corriente máxima de salida	2.5 A
BATERÍA	
Marca	Mtek
Referencia	MT122050
Voltaje	12 Vdc
Capacidad	205 AH

(Elaboración propia)

Se obtuvieron las cuatro variables indirectas con este equipo más un adaptador UMC-1, propio de la marca del controlador, el software MSView (Morningstar Corp, 2015) y un computador portátil, como se muestra en la Figura 7.

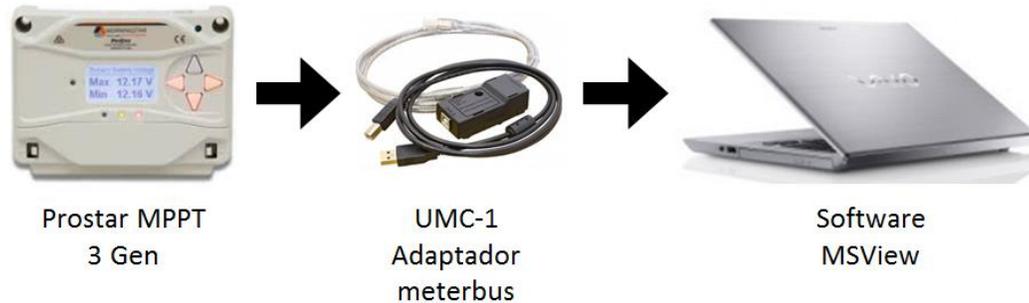


Figura 7. Esquema de adquisición de datos

La información se almacenó en archivos digitales formato CSV (Valores Separados por Coma), se obtuvieron datos cada minuto para cada variable, con un total de 720 registros diarios para cada variable.

Medidor de corriente

Con el fin de medir la variable directa “Corriente en el panel”, se desarrolló un medidor de corriente usando el sensor WCS1800 (Figura 8) y la plataforma Arduino. El dispositivo es capaz de medir corriente directa en el rango de 0 hasta 35 amperios, a la salida entrega, con una sensibilidad de 66 mV/A, un voltaje variable en función de la corriente medida.

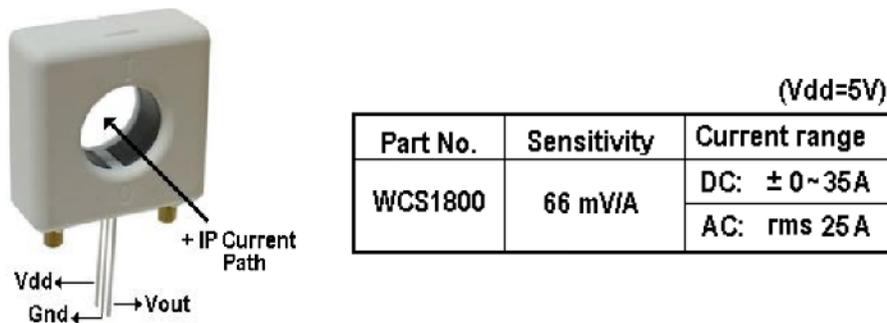


Figura 8. Sensor de corriente no invasivo

La conversión de la señal analógica en información digital se hizo a través de comunicación serial a un baud rate de 9600 bits/s, una tarjeta Arduino UNO y la plataforma de programación Arduino (Arduino, 2018) en la cual se programó el código del ANEXO 1.1.

La ecuación de la recta utilizada para determinar el valor de la corriente en miliamperios se extrajo de la ficha técnica entregada por el fabricante que muestra en el

eje horizontal la corriente medida por el sensor y en el eje vertical el voltaje de salida entre los pines Vout y Gnd del WCS1800 (Figura 9).

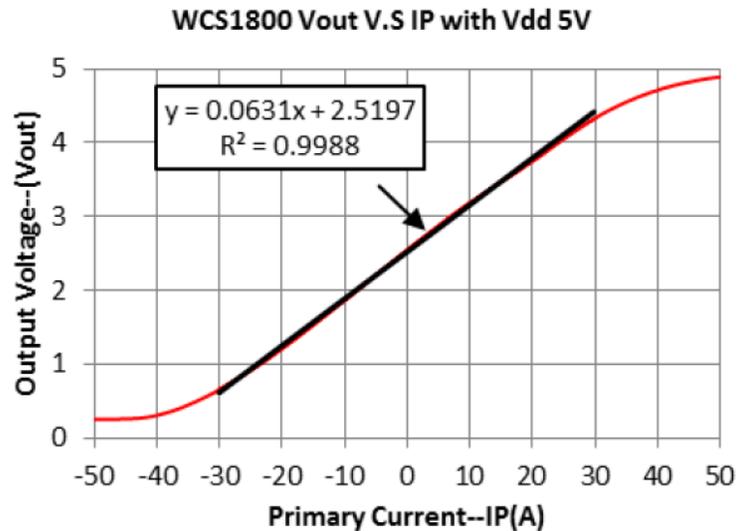


Figura 9. Ecuación de la curva que relaciona V e I en el sensor

Los datos de corriente que se midieron fueron almacenados en un archivo en formato CSV, archivo creado a partir del software Processing (Processing Foundation, 2018) con el código que se muestra en el ANEXO 1.2.

La información se almacenó en un archivo digital formato CSV, al igual que con las variables indirectas, se obtuvo el dato de corriente cada minuto entre las 6:00 am y las 6:00 pm.

El error presente en la medida a causa de las mismas propiedades del sensor es de $\pm 100\text{mA}$ en DC, por motivos prácticos no se guardó el dato incluyendo este error en el archivo CSV.

El hardware implementado y la manera como se instaló dentro del gabinete de la Tabla 2 se muestran en Figura 10 y Figura 11.

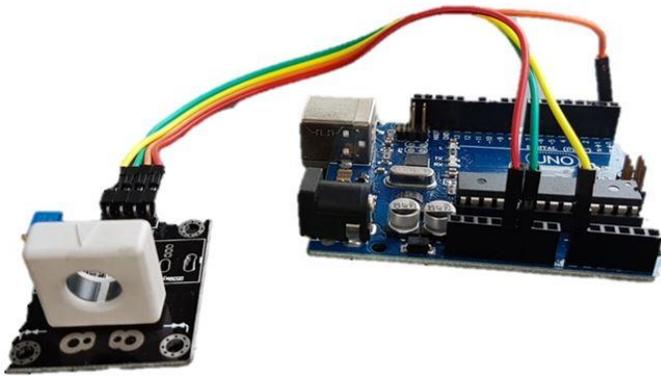


Figura 10. Hardware para medición de corriente

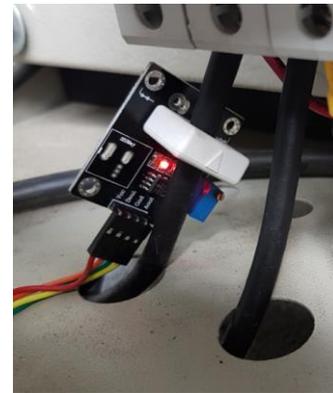


Figura 11. Instalación de sensor en equipo solar fotovoltaico

En la Figura 11 se muestra la manera como se dispuso el sensor dentro del gabinete. Por el orificio del sensor pasa el cable positivo (+) del panel solar que inmediatamente después llega a las protecciones propias del sistema.

Piranómetros y termómetros

La variable directa 'Radiación solar' se obtuvo de tres de las cinco estaciones meteorológicas del SIATA (Sistema de Alertas Tempranas del Valle de Aburrá) que cuentan con piranómetro y están ubicadas adentro de la ciudad de Medellín (Tabla 3), estas son: Área Metropolitana, Institución Educativa Joaquín Vallejo y Torre SIATA.

Tabla 3

Estaciones SIATA de interés

	Estación SIATA		
	Área Metropolitana	I.E Joaquín Vallejo	Torre SIATA
Latitud	6.24219	6.2551	6.2593
Longitu	-75.57429	-75.5427	-75.5887

d



(Elaboración propia)

La información obtenida de las tres estaciones se contrastó para obtener un valor ajustado a la zona donde se dispuso el equipo solar fotovoltaico para medición.

Con respecto a la variable directa restante ‘Temperatura ambiente’, se obtuvo el valor medido en dos de las estaciones SIATA las cuales disponían de termómetros, estas fueron las estaciones Torre SIATA y Área Metropolitana.

Cámara de video

Con la finalidad de determinar la variación de niveles de luz y su relación con la radiación solar promedio sobre la ciudad, se instaló una cámara de video para grabar una panorámica de la ciudad con vista hacia el sur, registrando la salida del sol a la izquierda de la pantalla y la puesta del mismo a la derecha de la pantalla.

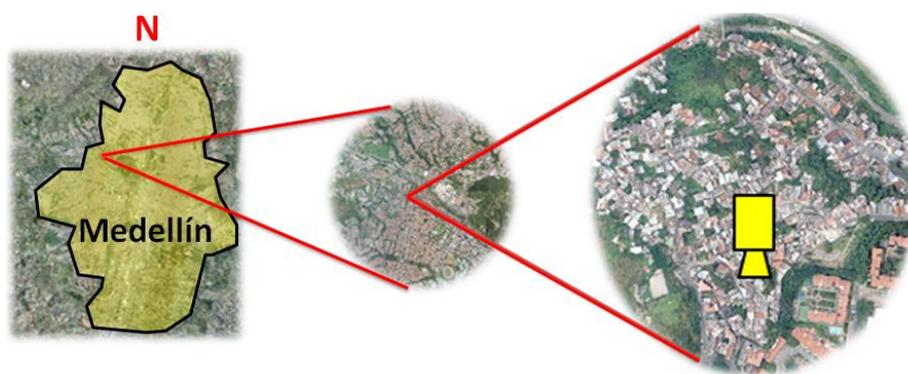


Figura 12. Ubicación y orientación de cámara de video

La cámara se ubicó en la posición geográfica y con la orientación mostrada en la Figura 12. Los videos grabados se compararon con las mediciones y los resultados teóricos de luminancia de umbral. El análisis se muestra en la sección 3 del presente trabajo.

En el planteamiento de la metodología se consideró ubicar la cámara en frente del portal considerado como aplicación (Ver sección 2.1.5) pero no fue posible debido a las condiciones de vandalismo del sector.

2.1.2. Ubicación geográfica equipo SPV

El equipo solar fotovoltaico y el medidor de corriente fueron instalados adentro de las instalaciones de la Unidad Alumbrado de EPM, lugar indicado en la Figura 13.



Figura 13. Localización de equipo solar fotovoltaico

Las coordenadas del punto fueron x: 832971; y: 1181521 en el sistema Magna Bogotá. Esta localización obedeció a temas de seguridad para los equipos y disponibilidad de carros canasta necesarios tanto para la instalación como para el periódico chequeo del estado de los equipos de medida.

Las únicas tres estaciones SIATA de la ciudad de Medellín que cuentan con piranómetro instalados fueron tomadas como fuente de información, estas se localizan en los puntos indicados en la Figura 14 con las respectivas distancias aproximadas.



Figura 14. Ubicación estaciones SIATA

2.1.3. Condiciones climáticas

Teniendo en cuenta que se definió la temperatura ambiente como una de las variables que inciden directamente en el desarrollo del prototipo de control, se considera necesario conocer las condiciones climáticas del lugar donde se lleva a cabo el estudio.

La ciudad de Medellín se caracteriza por tener un clima templado semi húmedo, con temperatura anual que oscila entre 17°C y 28°C y precipitaciones máximas de 226mm y

170mm para los meses de octubre y abril respectivamente (IDEAM, 2010). El rango de oscilación de la temperatura es estrecho si se compara con el propio de países que cuentan con estaciones, se puede decir entonces que la temperatura en Medellín es relativamente constante, condición que hace suponer que el voltaje en los paneles solares no se verá dramáticamente afectado por los cambios en esta variable, sin embargo, la expectativa es de valores más altos de voltaje en los períodos de temperatura cercana a los 17°C y más bajos para temperaturas cercanas a 28°C.

2.1.4. Condiciones de radiación solar

Este trabajo presenta la manera de relacionar la radiación solar con el nivel de luminancia de umbral L_{th} , es decir, la L_{th} obtenida en diseño se relaciona con la máxima radiación solar medida en la ciudad de Medellín, de tal manera que ante la presencia de nubes en el cielo se reduce la radiación solar incidente en cercanías a la entrada del túnel y así mismo se reduce el nivel de luminancia requerido (CIE, 2004, p. 19). Dicha relación no implica que para lugares del mundo con mayor radiación solar global se requiera un nivel mayor de luminancia de umbral, sino que el valor de L_{th} hallado teóricamente para cada túnel en cualquier parte del mundo se relaciona con el nivel máximo de iluminancia durante el día.

Para la ciudad de Medellín, y de acuerdo con datos del IDEAM, se dispone de una radiación global horizontal que típicamente oscila entre 4 kWh/m² y 4,5 kWh/m² en el transcurso del año (IDEAM, 2014), tal como lo muestra la Figura 15.

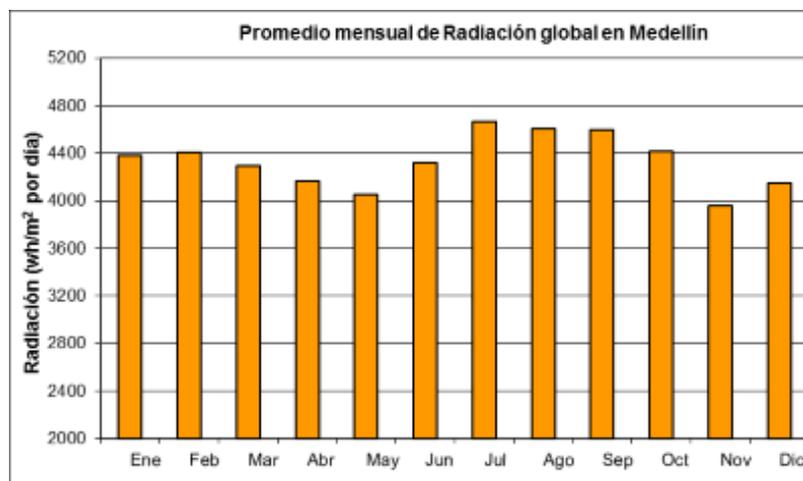


Figura 15. Promedio mensual de radiación global en Medellín (IDEAM, 2014).

La imagen anterior da cuenta de una ciudad en la que no se presentan cambios drásticos en la radiación solar, esto se debe a lo estable del clima gracias a la cercanía de la ciudad a la línea del Ecuador.

La radiación solar está disponible diariamente en Medellín entre cuatro y cinco horas promedio, con mayor cantidad de horas en julio y menos en abril (IDEAM, 2014).

2.1.5. Luminancia de umbral.

De acuerdo con la metodología de diseño planteada por la CIE 88:2004, cada túnel requiere una luminancia de umbral L_{th} dependiente de los alrededores de la entrada al túnel, la dirección de conducción y la velocidad a la que circulan los automóviles. Este valor de luminancia se halla de manera teórica para cada túnel en particular.

La Figura 16 presenta el comportamiento de la luminancia de umbral L_{th} en el transcurso de un día típico, con valores bajos al amanecer y atardecer pero con el valor más alto en horas cercanas al medio día (Nyx Hemera, s/f-b).

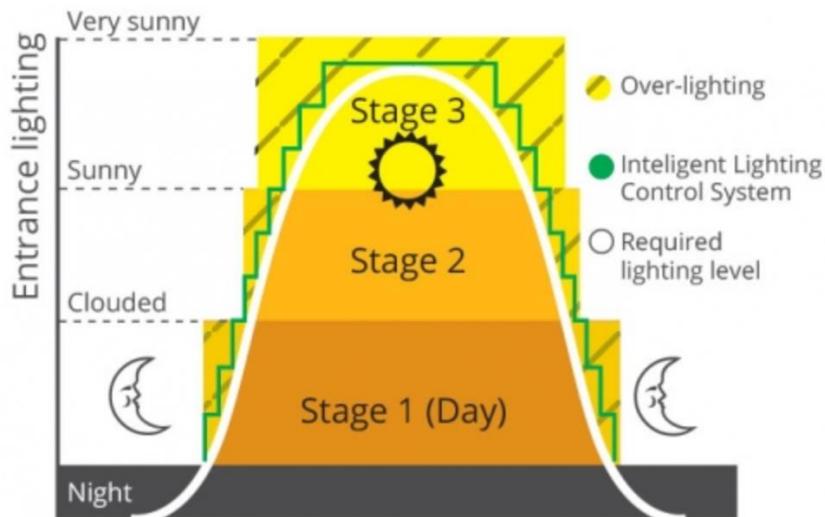


Figura 16. Luminancia en el transcurso de un día. (NYX Hemera)

Como no es posible hablar de valores exactos en cd/m^2 para la luminancia de umbral debido a la particularidad de cada caso, se toma como referencia teórica para este trabajo una curva de luminancia proporcional a la curva de radiación, sin embargo, y buscando una aplicación concreta, se desarrolla el ejercicio considerando las condiciones del paso a desnivel de mayor longitud ubicado en la ciudad de Medellín, se trata del Deprimido de la Avenida Oriental (Figura 17), con una longitud de 370 metros aproximadamente y del cual se analizará únicamente el portal de entrada en la dirección occidente – oriente.



Figura 17. Ubicación deprimido Avenida Oriental. CL 58 x CR 53, Medellín. MapGIS V5

Por razones de vandalismo en la zona no se consideran pruebas en el mismo túnel con el prototipo desarrollado.

2.2. Caracterización

En esta etapa del proceso investigativo se consolidó y analizó la información recolectada identificando cuatro curvas de interés: radiación solar (E), temperatura ambiente (T), corriente del panel (I) y luminancia en el portal (L_{th}). La Figura 18 muestra el perfil típico para la curva de cada variable directa recolectada.

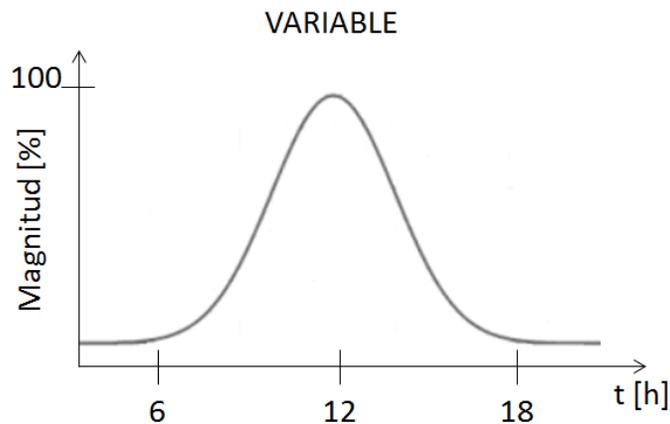


Figura 18. Curva típica para cada variable directa

El análisis consistió en la búsqueda de la correlación entre las cuatro variables de interés con el fin de obtener una curva resultante para ser usada como señal de control para la iluminación de todo el túnel, así, ante el incremento de la radiación solar global se tendrá un aumento proporcional de luminancia provocada por el sol en la entrada del

túnel. Así mismo, al incrementar la radiación aumentará la corriente generada por el panel solar (Sonnenenergie, 2008, p. 57).

Lo que se busca es encontrar una función matemática que represente el siguiente fenómeno (Figura 19): al aumentar la luminancia en el portal (mayor radiación solar) se incrementa el flujo luminoso emitido por las luminarias al interior del túnel. Así mismo, al reducir la luminancia en la entrada (menor radiación solar), disminuirá el flujo de las luminarias y se obtendrán ahorros energéticos con un sistema funcionando en tiempo real que además de controlar el sistema de iluminación pueda suministrar energía para parte de los sistemas eléctricos del túnel gracias a la generación distribuida.

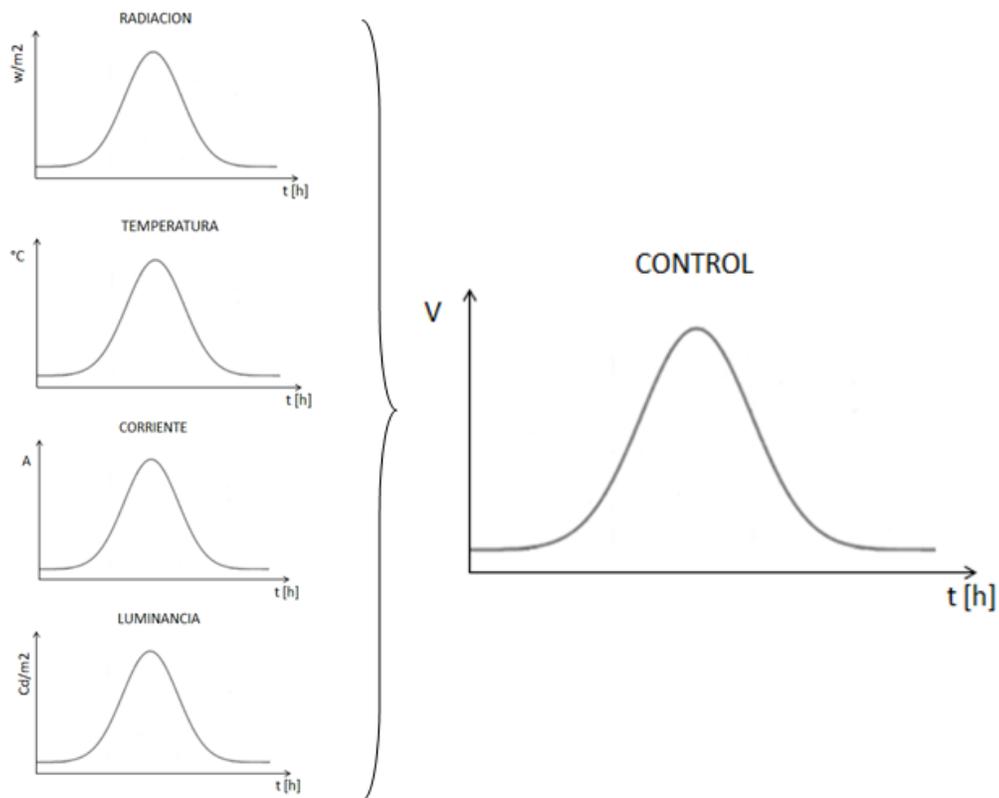


Figura 19. Señales adquiridas y señal resultante para control estándar 0 – 10 V

La magnitud de cada una de las variables de interés se obtuvo en función del tiempo para cada día con periodicidad de un minuto. En un día típico se obtuvieron los valores máximos alrededor del mediodía, por este motivo es que cada una de las curvas mostradas en la Figura 19 se representan con el pico máximo en la mitad del eje horizontal.

Debido a la semejanza gráfica entre las cuatro variables se tuvo como resultado una señal de control con perfil semejante (ver sección 3. Resultados), con los valles al amanecer y anochecer así como el pico máximo alrededor del mediodía.

La función matemática que mejor describía el fenómeno entre radiación solar y luminancia de umbral fue implementada en el sistema electrónico de control desarrollado bajo el estándar 0 – 10 V. Se escogió este estándar debido a su amplia difusión entre fabricantes de luminarias.

2.3. Diseño Electrónico

El prototipo electrónico funcional fue diseñado en dos componentes: maestro y esclavo. El dispositivo maestro incorpora la función matemática obtenida en la etapa de caracterización, el dispositivo esclavo recibe comandos del maestro y actúa sobre cada luminaria. El prototipo en su primera versión incorpora un algoritmo que, en tiempo real, modifica el flujo luminoso de cada luminaria de acuerdo con la variación de la radiación solar, como se representa en la Figura 20.

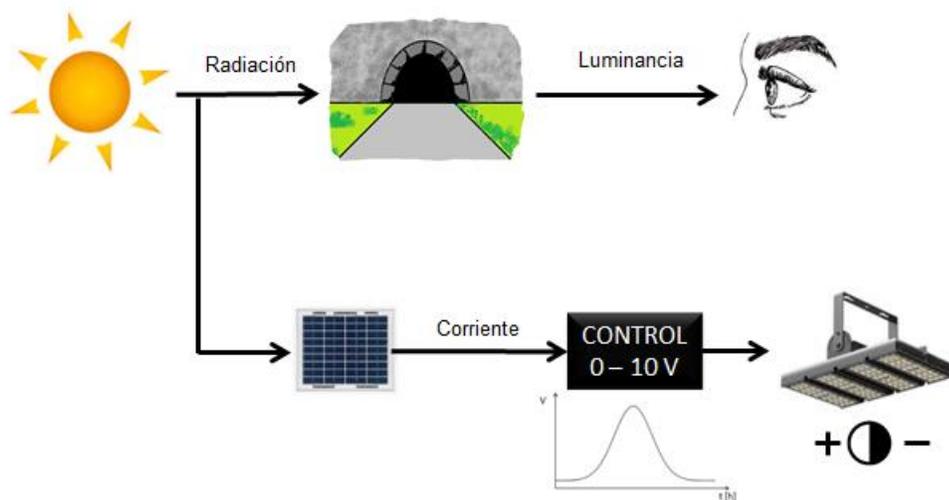


Figura 20. Esquema para la situación de control

La salida del control se dividió en 10 estados de igual magnitud y proporcionales a los rangos de luminancia L_{th} tal como se muestra en la figura 26, siendo el primer estado el de menor L_{th} para el amanecer y atardecer, y el estado 10 el de mayor L_{th} requerida para el mediodía (Figura 21). El tiempo de respuesta del sistema de control será segundo a segundo con cambios instantáneos, ya sea incrementando o disminuyendo, de no más de tres estados, esto por razones de comodidad visual para los conductores.

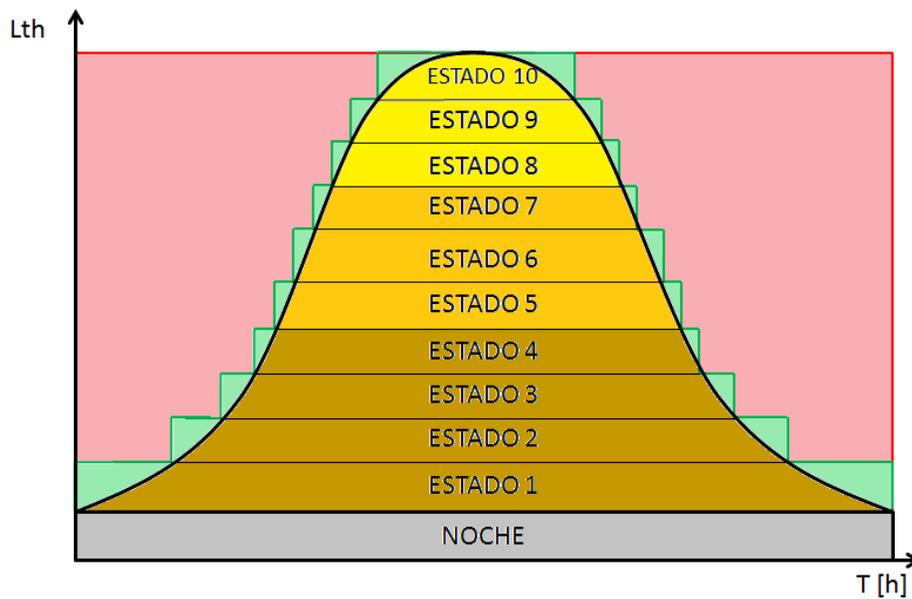


Figura 21. Estados del sistema de control desarrollado.

El área sombreada de color rojo en la Figura 21 representa la energía que es desperdiciada por el sistema de iluminación sin control. De color verde la energía que se consumiría después de instalado el control, cuyo porcentaje de ahorro puede incrementar a medida que se incluya mayor cantidad de estados.

El dispositivo maestro es apto para instalación dentro del gabinete de control del sistema solar, para esta primera versión se instala un dispositivo esclavo diferente para cada luminaria y reciben los comandos a ejecutar de manera inalámbrica (Figura 22).

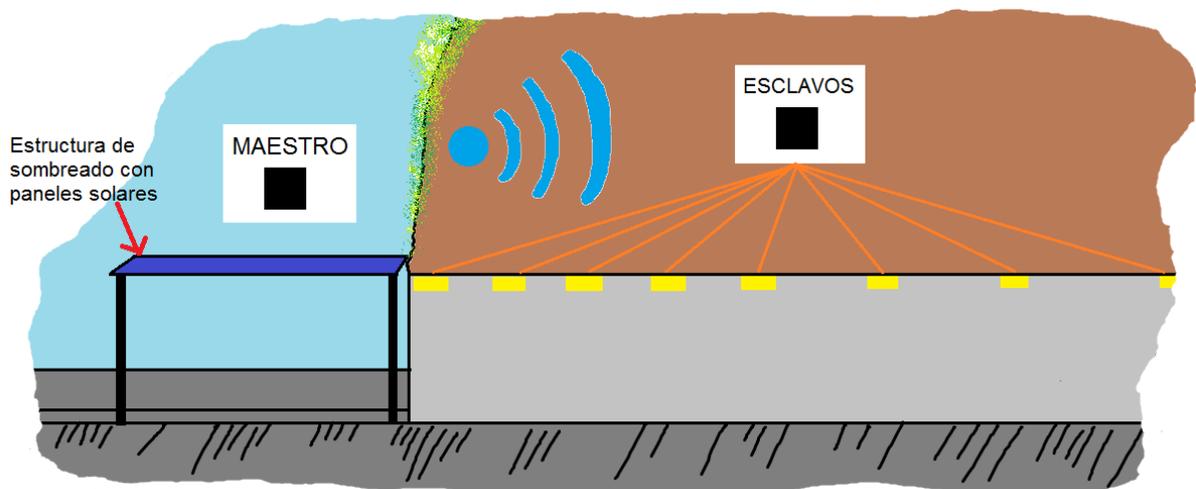


Figura 22. Ubicación de dispositivos en el túnel.

Debido al uso del estándar 0 – 10V se hace necesario un esclavo para cada luminaria o, dependiendo de cada caso particular, para un conjunto pequeño de luminarias en las que la distancia entre ellas no supere los cinco metros, esto por caída de tensión y pérdida de la señal por atenuación debido a la distancia.

3. RESULTADOS

Luego de tomar medidas de cada una de las variables propuestas durante los meses de diciembre de 2018, enero y febrero de 2019, se obtuvieron los siguientes resultados.

3.1. Radiación Solar (E)

Esta variable, como se dijo en la sección 2.1.1, fue tomada de tres estaciones SIATA de la ciudad de Medellín y se obtuvieron valores minuto a minuto en unidades de W/m^2 . Con el fin de obtener un sistema de control para ser instalado en cualquier punto de la ciudad, se halló, para cada minuto, el valor promedio de la radiación de estas tres estaciones, con el fin de determinar un solo valor de radiación aplicable a la ciudad de Medellín.

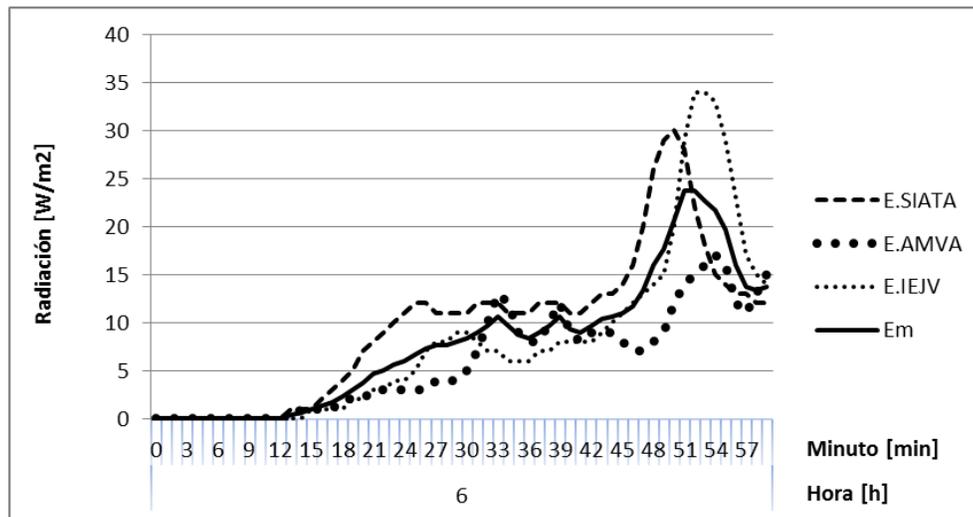


Figura 23. Radiación solar de las tres estaciones y radiación promedio para el 24 de diciembre de 2018 entre las 6:00 y 6:59.

La Figura 23 se extrajo de una hora y de un día de medición, esto con el fin de ilustrar la manera en cómo se trató la información para cada hora de cada día en estudio.

De la información recolectada se pudo detectar que la radiación máxima en el período de medición fue registrada por la estación AMVA con un dato de $1464 W/m^2$ el 28 de febrero a las 12:44, dato que si se compara con la información de la figura 18 representa la radiación para un mes promedio en la ciudad de Medellín, puesto que estaría por debajo de la máxima que posiblemente se presente en el mes de julio y la mínima posible en el mes de noviembre.

No fue posible obtener más datos de radiación solar en la ciudad de Medellín dado que no hay más piranómetros con información disponible de acceso público, sin embargo se considera que dado el caso que se instalen mayor cantidad de estaciones se podría obtener un valor de radiación solar mejor ajustado para toda la ciudad.

Para la presente investigación no se consideró medir radiación solar global localmente debido a los costos de la adquisición y operación del sensor. No obstante, de acuerdo con la correlación hallada entre la radiación promedio y la radiación registrada por cada una de las estaciones, se determinó que el ajuste para la muestra de datos es confiable en un 90% aproximadamente como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4

Coefficiente de correlación entre radiaciones registradas

	<i>Radiación Torre SIATA</i>	<i>Radiación AMVA</i>	<i>Radiación IE Joaquín V</i>
Radiación promedio	0.90	0.89	0.89

(Elaboración propia)

3.2. Temperatura Ambiente (T_a)

La variable temperatura tuvo el mismo procesamiento, de las dos estaciones seleccionadas, se adquirió el valor de temperatura y se halló el promedio con el fin de trabajar con un único valor de temperatura. La Figura 24 muestra el registro para una sola hora al inicio del día 24 de diciembre de 2018.

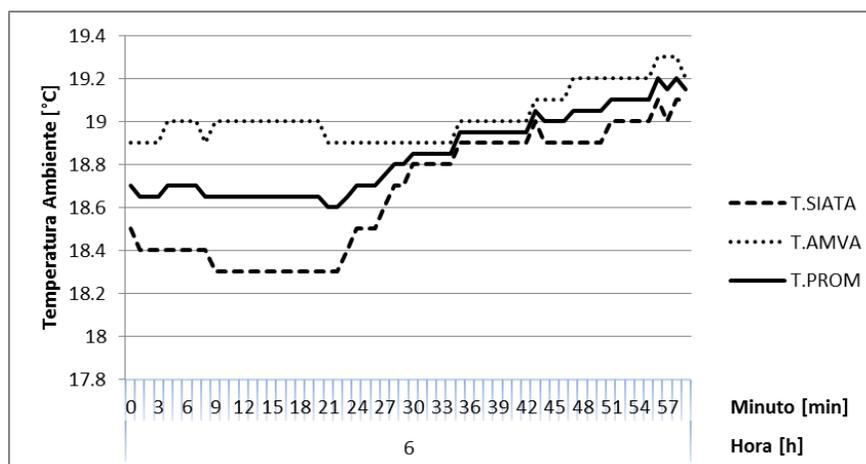


Figura 24. Temperatura de las dos estaciones y temperatura promedio para el 24 de diciembre de 2018 entre las 6:00 y 6:59.

La temperatura de la ciudad durante el período medido fue estable oscilando entre una máxima de 31°C el 22 de febrero de 2019 a las 14:49 y mínima de 16.6°C el 09 de enero de 2019 a las 6:51.

El índice de correlación entre la temperatura promedio y cada una de las temperaturas medidas (Tabla 5) en las dos estaciones es casi del 100%, dato que da a entender la confiabilidad que se puede tener en el dato de temperatura promedio para los análisis posteriores.

Tabla 5

Coeficiente de correlación para temperaturas registradas

	Torre SIATA [°C]	AMVA [°C]
Promedio [°C]	0.991	0.993

(Elaboración propia)

La temperatura se definió como una variable indirecta en la sección 2.1, aunque en la hipótesis inicial se descartó esta variable como una de las de incidencia directa para la relación Corriente panel – Luminancia de umbral, es en la sección 3.9 donde se analizará su incidencia para el sistema a desarrollar.

3.3. Corriente En El Panel Solar (I_{pv})

La corriente medida con el sensor de corriente, en miliamperios (mA), se registró de igual manera que la radiación y la temperatura, un valor para cada minuto entre las 6:00 y las 17:59.

La Figura 25 muestra los valores registrados por el medidor de corriente durante la primera hora del 24 de diciembre de 2018.

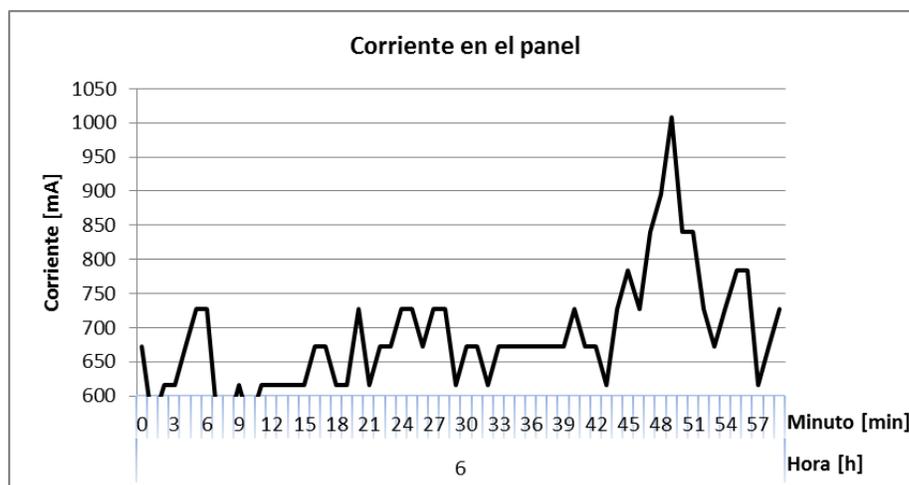


Figura 25. Corriente del panel solar para el 24 de diciembre de 2018 entre las 6:00 y 6:59.

La corriente máxima registrada se dio el 20 de febrero a las 12:59 con 9.576 mA, minuto en el que se registró una radiación promedio de 1.089 W/m^2 . Análogamente, la corriente registrada en el minuto de mayor radiación en una de las estaciones (28 de febrero a las 12:44 en la estación AMVA) fue de 8.008 mA, intervalo para el cual se registró una radiación promedio de 1064 W/m^2 .

3.4 Luminancia En El Portal (*L_{th}*)

Se definió una curva de luminancia ajustada al perfil de radiación, sin embargo, y como aplicación práctica, se realizó el ejercicio usando el método del contraste percibido en el portal occidente – oriente del deprimido de la Avenida Oriental, ubicado en el centro de la ciudad de Medellín. Los datos iniciales para el diseño se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6

Datos para diseño luminotécnico

Dimensiones del portal:	9.5m x 4.5m
Velocidad de diseño:	60 km/h = 16.66 m/s
Sentido de conducción:	Occidente – Oriente
Hemisferio:	Norte (N)
Dirección del tráfico:	Unidireccional
Factor de mantenimiento:	0.7
Iluminación:	Simétrica (SL)

(Elaboración propia)

3.4.1. Distancia De Parada

En primera instancia se halla la distancia de parada, la cual se caracteriza por estar compuesta de dos diferentes distancias: distancia recorrida durante el tiempo de reacción y distancia recorrida durante el frenado hasta detenerse completamente. Esta distancia total se encuentra con la siguiente expresión (Ecuación 1):

$$SD = u \cdot t_0 + \frac{u^2}{2 \cdot g \cdot (f \pm s)} \quad (1)$$

Dónde: *SD*: Distancia de parada
u: Velocidad del vehículo
t₀: Tiempo transcurrido hasta $u = 0 \text{ m/s}$
g: Gravedad
f: Coeficiente de fricción
s: Pendiente

Sin ningún valor particular, se puede tomar t_0 igual a un segundo ($t_0 = 1 \text{ s}$) y f se extrae de la curva de coeficiente de fricción para pavimento mojado en función de la velocidad de diseño (Figura 26) (CIE, 2004, p. 30).

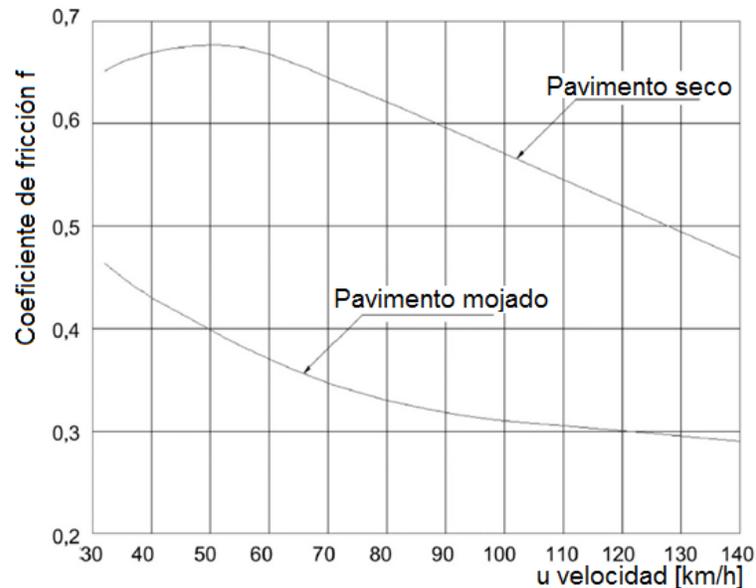


Figura 26. Coeficiente de fricción en función de la velocidad para pavimento seco y mojado

Por lo anterior se tiene que la distancia de parada es igual a la Ecuación (2).

$$SD = 16.66 \frac{m}{s} \cdot 1 \text{ s} + \frac{\left(16.66 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot \left(9.8 \frac{m}{s^2}\right) \cdot (0.37 + 0)} \quad (2)$$

$$SD = 54.93 \text{ m}$$

3.4.2. Método del contraste percibido.

El método del contraste percibido busca determinar, a través de una fotografía, la luminancia de velo equivalente L_{seq} construida a partir del aporte de luminancias provenientes desde las superficies presentes en el campo de visión. Conociendo el valor de L_{seq} es posible calcular el valor óptimo de luminancia de umbral L_{th} con el que se debe trabajar el diseño de iluminación.

En la Figura 27 se representan, sobre la fotografía del portal del deprimido tomada el domingo 24 de febrero de 2019 al mediodía desde la distancia de parada, las secciones necesarias definidas por la CIE para aplicar el método del contraste percibido (CIE, 2004, p. 11).

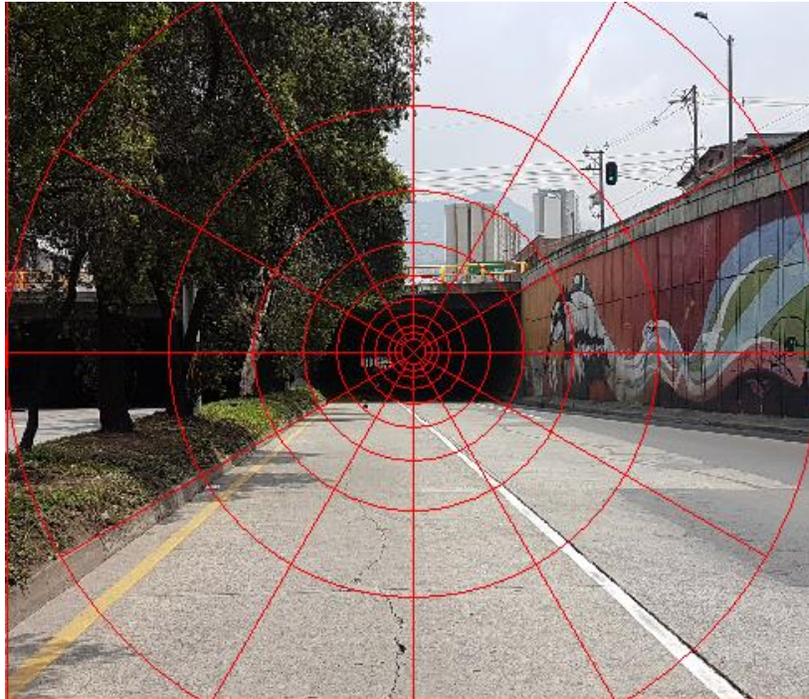


Figura 27. Fotografía del portal deprimido Av Oriental desde la distancia de parada

En la Figura 27 se dividió la imagen del portal en 108 secciones, para cada una de las secciones se debe determinar el porcentaje que se observa de vía, edificios, cielo, rocas y prado. Superficies definidas por la Tabla 6.2.3 del estándar (tabla 8) (CIE, 2004, p. 10).

Tabla 7

Ejemplos de luminancias en el portal de un túnel

Dirección de conducción (Hemisferio norte)	L_c (cielo) kcd/m ²	L_r (vía) kcd/m ²	L_e (ambiente) kcd/m ²			
			Rocas	Edificios	Nieve	Prado
N	8	3	3	8	15 (V) 15(H)	2
O – E	12	4	2	6	10 (V) 15 (H)	2
S	16	5	1	4	5 (V) 15 (H)	2

(CIE, 2004, p. 10)

Con la información anterior se construyó la matriz L_{ij} de luminancias con i representando los anillos, desde 1 hasta 9, siendo 1 el anillo interior y 9 el exterior, j representa las secciones, siendo 1 donde el reloj indica el medio día hasta llegar a 12 en el sentido de las manecillas del reloj. El procedimiento para el desarrollo de esta matriz se deja consignado en el ANEXO 2.

Definidos los valores hallados para las luminancias de cada una de las celdas sobre la fotografía, se halla la luminancia promedio para cada celda (

Tabla 8).

Tabla 8
Luminancia promedio para cada anillo y sección

		ANILLO									SUMA
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	[kcd/m ²]
SECCIÓN	1	0	0	0	0	4.8	9.6	9.6	12	NC	36
	2	0	0	0	0	0	4.2	6	8.4	11.4	30
	3	0	0	0	0	0	0	6	6	6	18
	4	0	0	0	0	0	0	6.4	5	4.8	16.2
	5	0	0	0	0	1.2	4	4	4	4	17.2
	6	0	0	0	0	4	4	4	4	NC	16
	7	0	0	0	0	4	4	4	4	NC	16
	8	0	0	0	0	1.2	4	4	4	4	17.2
	9	0	0	0	0	0	0.2	2	2	2.4	6.6
	10	0	0	0	0	0	2	2	2	3.2	9.2
	11	0	0	0	0	1	2	2	2	2	9
	12	0	0	0	0	2.8	4	4	4.5	NC	15.3
Lij										206.7	

(Elaboración propia)

Cada una de las luminancias calculadas en la

Tabla 8 se multiplica por 0.8 debido al factor de transmisión del parabrisas y se incrementa de acuerdo con la luminancia del mismo parabrisas. Como constantes se consideraron la luminancia de velo ($L_{ws}=100 \text{ cd/m}^2$) y la luminancia atmosférica ($L_{atm}=200 \text{ cd/m}^2$).

Tabla 9

Matriz L_{ij} con contribución de L_{atm} y L_{ws}

		ANILLO									
SECCIÓN		1	2	3	4	5	6	7	8	9	SUMA [kcd/m ²]
	1	0.1	0.1	0.1	0.1	3.9	7.8	7.8	9.7	NC	29.6
	2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	3.5	4.9	6.8	9.22	24.9
	3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	4.9	4.9	4.9	15.3
	4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	5.2	4.1	3.94	13.86
	5	0.1	0.1	0.1	0.1	1.1	3.3	3.3	3.3	3.3	14.66
	6	0.1	0.1	0.1	0.1	3.3	3.3	3.3	3.3	NC	13.6
	7	0.1	0.1	0.1	0.1	3.3	3.3	3.3	3.3	NC	13.6
	8	0.1	0.1	0.1	0.1	1.1	3.3	3.3	3.3	3.3	14.66
	9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	1.7	1.7	2.02	6.18
	10	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1.7	1.7	1.7	2.66	8.26
	11	0.1	0.1	0.1	0.1	0.9	1.7	1.7	1.7	1.7	8.1
	12	0.1	0.1	0.1	0.1	2.3	3.3	3.3	3.7	NC	13.04
										Lij	175.76

(Elaboración propia)

Con el resultado obtenido para L_{ij} se halla L_{seq} de acuerdo con la ecuación(3).

$$L_{seq} = (5.1 \times 10^{-4}) L_{ij} \quad (3)$$

$$L_{seq} = (5.1 \times 10^{-4}) \cdot 175.76 \text{ kcd/m}^2$$

$$L_{seq} = 89.64 \text{ cd/m}^2$$

Por último, con el valor obtenido de luminancia de velo equivalente se halla la luminancia de umbral mínima requerida. Para este ejercicio se considera instalación de iluminación simétrica y la expresión de la ecuación (4).

$$L_{th} = \frac{L_m}{\frac{1}{C_m} \left(\frac{\rho}{\pi \cdot q_c} - 1 \right) - 1} \quad (4)$$

En donde L_{th} : Luminancia de umbral

L_m : Luminancia mínima de umbral

C_m : Contraste percibido mínimo requerido

r : Reflectancia de la vía

q_c : Coeficiente de contraste de revelación

Considerando la expresión de la ecuación (5)

$$L_m = \frac{(\tau_{WS} \cdot L_{atm} + L_{WS} + L_{seq})}{\tau_{WS} \cdot \tau_{atm}} \quad (5)$$

En donde L_m : Luminancia mínima de umbral
 τ_{WS} : Coeficiente de transmisión del parabrisas
 L_{atm} : Luminancia percibida de la atmósfera
 L_{WS} : Luminancia percibida del parabrisas
 L_{seq} : Luminancia de velo equivalente
 τ_{atm} : Coeficiente de transmisión atmosférico

En (5) se remplazan los valores encontrados y se halla L_m

$$L_m = \frac{(0.8 \cdot 200 \text{ cd/m}^2 + 100 \text{ cd/m}^2 + 89.64 \text{ cd/m}^2)}{0.8 \cdot 1}$$

$$L_m = 437.047 \text{ cd/m}^2$$

Por lo tanto, remplazando en (4) se obtiene L_{th} para sistema de iluminación simétrica

$$L_{th} = \frac{437.047 \text{ cd/m}^2}{\frac{1}{-0.28} \left(\frac{0.2}{\pi \cdot 0.2} - 1 \right) - 1}$$

$$L_{th} = 304.6 \text{ cd/m}^2$$

El resultado obtenido para la luminancia de umbral representa la cantidad de luz que se debe reflejar hacia los ojos del conductor desde la calzada en la zona de entrada del túnel, nivel que se debe alcanzar con iluminación artificial teniendo en cuenta que al no estar a cielo abierto no es posible aprovechar la luz del sol.

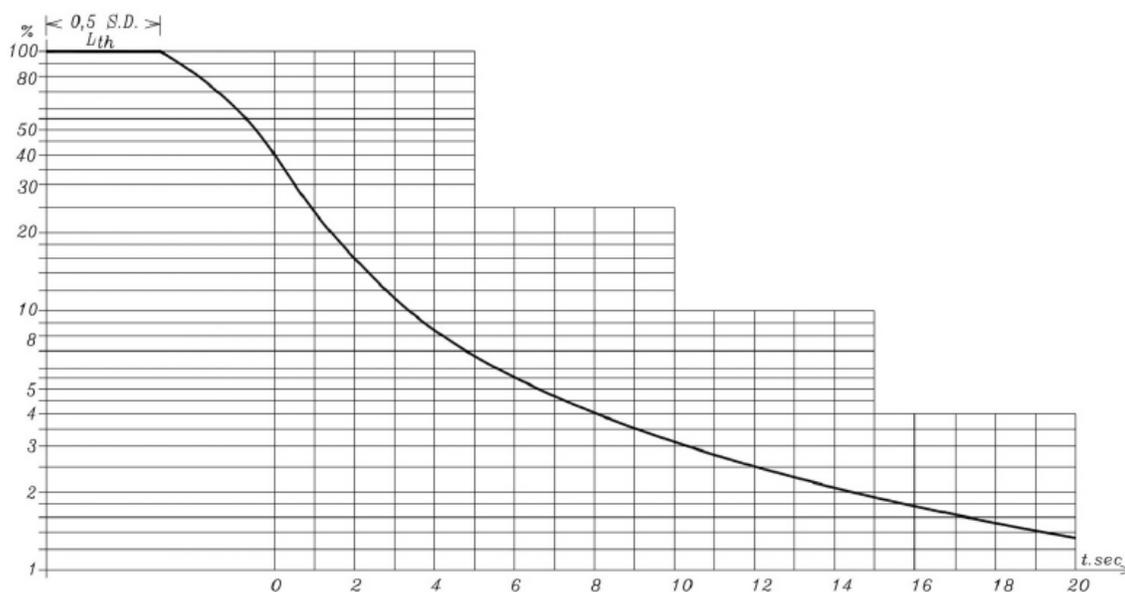


Figura 28. Curva de luminancia para el caso de estudio

La Figura 28 muestra la disminución de la luminancia promedio desde el portal hasta la zona interior del túnel. Los primeros 27 metros del deprimido se deben iluminar con una luminancia promedio mantenida de 304 cd/m^2 ; desde ese punto y hasta los 55 metros, fin de zona de transición, se decrece la luminancia hasta llegar a 121 cd/m^2 continuando con la disminución hasta la zona interior que cuenta con aproximadamente 6 cd/m^2 .

La Tabla 10 muestra el nivel de luminancia que se debe percibir en la entrada por un observador situado en la distancia de parada de acuerdo con el porcentaje de radiación solar que sea irradiado sobre la zona de entrada al túnel.

Tabla 10

Luminancia de umbral para cada estado

ESTADO	PORCENTAJE DE LUMINANCIA RESPECTO AL MÁXIMO	LUMINANCIA DE UMBRAL [Cd/m^2]
Noche	--	6
1	10	30.4
2	20	60.8
3	30	91.2
4	40	121.6
5	50	152
6	60	182.4
7	70	212.8
8	80	243.2
9	90	273.6
10	100	304

(Elaboración propia)

3.5. Voltaje En El Panel (V_{pv})

Inicialmente se consideró esta variable como una variable indirecta dado que se consideraba, por conocimiento previo, que su variación no es dependiente de la radiación solar sino de la temperatura ambiente (Sonnenenergie, 2008, p. 57).

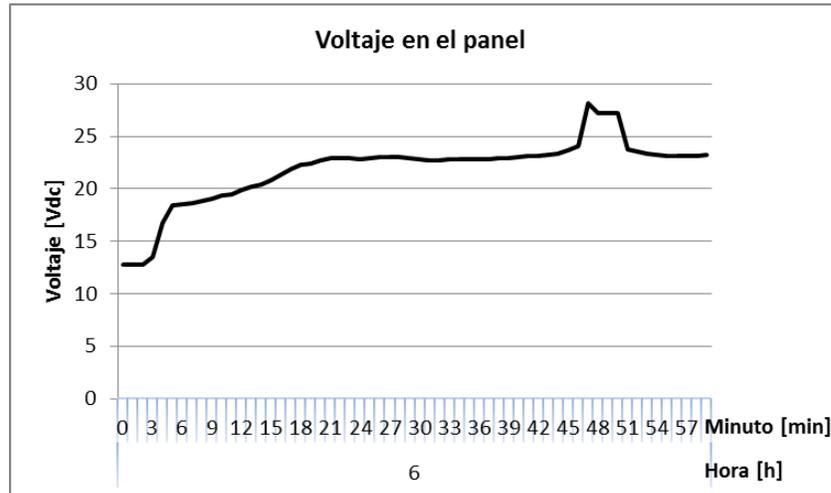


Figura 29. Voltaje en el panel solar para el 24 de diciembre de 2018 entre las 6:00 y 6:59

La Figura 29 muestra, al igual que las figuras de las variables directas, el comportamiento del voltaje en el panel solar para una pequeña fracción de tiempo.

El voltaje máximo registrado fue de 35.69 V y se dio el 29 de diciembre a las 14:39, instante en el que la temperatura promedio de la ciudad era de 27.2°C, análogamente, para el 22 de febrero a las 14:49, instante de la temperatura máxima registrada, se obtuvo un voltaje en el panel de 27.31 V. Lo anterior da cuenta de la relación inversa que existe entre el voltaje en el panel y la temperatura ambiente.

3.6. Voltaje En La Batería (V_B)

De igual manera y a iguales intervalos de tiempo se registró el voltaje en la batería, no obstante en el transcurso de la prueba se realizó una modificación en la carga, razón por la cual el comportamiento del voltaje en la batería cambió. La Figura 30 muestra el registro de la primera hora del día, a la izquierda para el 24 de diciembre a las 6:00, a la derecha para el mismo intervalo de tiempo pero del día 20 de febrero de 2019.

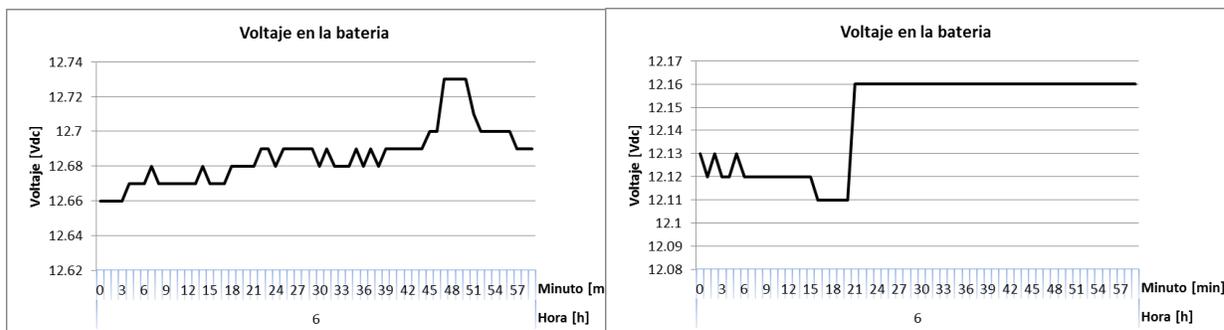


Figura 30. Voltaje en la batería el 24 de diciembre de 2018 y 20 de febrero de 2019 entre las 6:00 y 6:59

La anterior figura muestra una curva proporcional con la radiación solar del momento y da cuenta de una batería que se encuentra en el inicio del ciclo de carga, específicamente en estado de abultamiento (bulk) gracias a la presencia de energía proveniente del sol. La diferencia de las fechas radica en el rango de trabajo de la batería, para el inicio de la prueba la carga funcionaba durante las 12 horas nocturnas y el ciclo de carga iniciaba al día siguiente alrededor de los 12.66 Vdc, una vez detectado que el sistema de carga limitaba la corriente cuando se llegaba al ciclo de absorción, aproximadamente 90% de la capacidad de la batería, se optó por mantener la luminaria encendida las 24 horas y así no limitar la corriente del panel solar, es decir, se llevó la batería al límite de permanecer en ciclo de abultamiento durante todo el día.

Después de hacer el cambio el 4 de febrero de 2019, la batería iniciaba el ciclo de carga cada mañana desde los 12.12 Vdc aproximadamente, como se ve al lado derecho de la Figura 30.

El encendido de la luminaria durante el día se logró gracias la fotocelda Ubicell como parte del sistema de telegestión Ubicquia (Ubicell, s/f), Mediante la aplicación web (Figura 31) fue posible mantener la luminaria encendida aun cuando la fotocelda detectaba la presencia de luz solar.

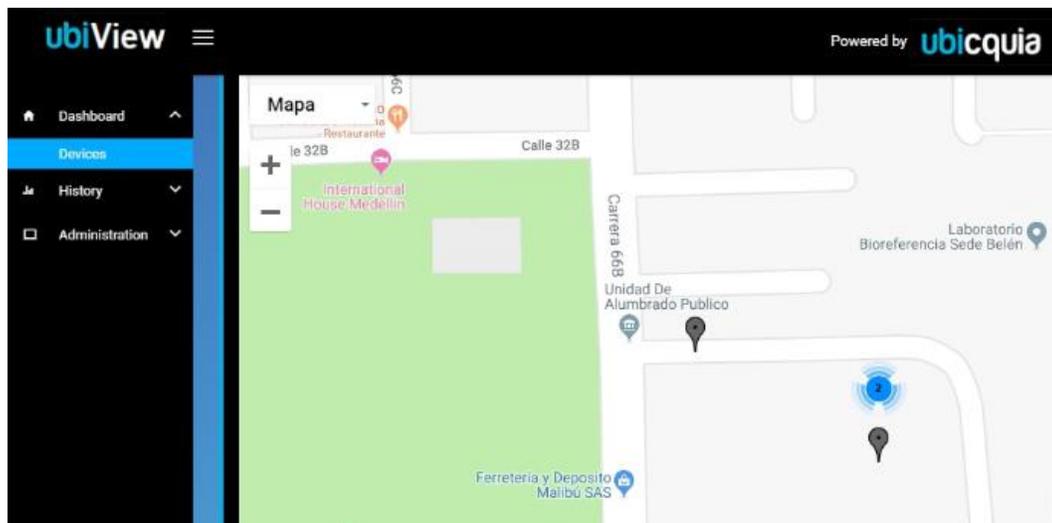


Figura 31. Aplicación web UbiView propia de la marca Ubicquia

3.7. Corriente En La Carga (I_c)

La carga se registró de igual manera, la Figura 32 muestra lo medido en la misma fracción de tiempo mostrada en las variables anteriores.

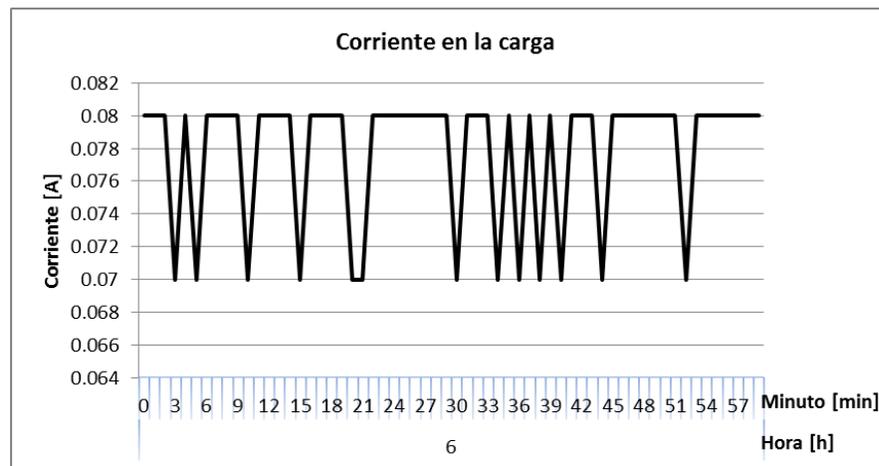


Figura 32. Corriente en la carga para el 24 de diciembre de 2018 entre las 6:00 y 6:59

Para efectos del sistema como fue instalado, la batería hacía las veces de carga, y la corriente registrada, es la corriente que le entregaba el panel solar a la batería a través del controlador.

Puesto que la corriente entregada a la luminaria era suministrada por la batería y no por el panel solar, la variación que se tuvo desde el 4 de febrero con el encendido de la luminaria durante las 24 horas no se vio reflejada en las mediciones de esta variable en cuanto magnitud sino en cuestión de duración. La Figura 33, que registra una curva para todo un día de medición, muestra a la izquierda el comportamiento de la corriente cuando esta se le entregaba a la batería solo en la mañana, es decir, cuando la luminaria

permanecía apagada durante el día; al lado derecho de la figura se muestra cómo la corriente se entregaba a la batería durante todo el día dado que la luminaria no se apagaba en ningún momento.

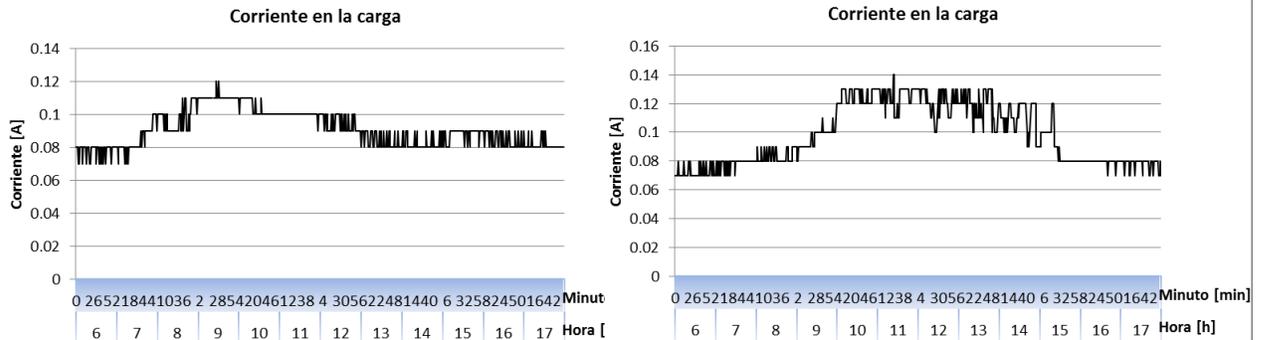


Figura 33. Corriente en la carga para el 24 de diciembre de 2018 y 20 de febrero de 2019

3.8. Temperatura En La Batería (T_B)

La temperatura en la batería se registró durante el mismo período de tiempo que las demás. En la Figura 34 se muestra el comportamiento de esta variable durante todo el 24 de diciembre de 2018, se evidencia un comportamiento similar al de la temperatura ambiente pero de mayor magnitud, alcanzando los 47°C alrededor del mediodía.

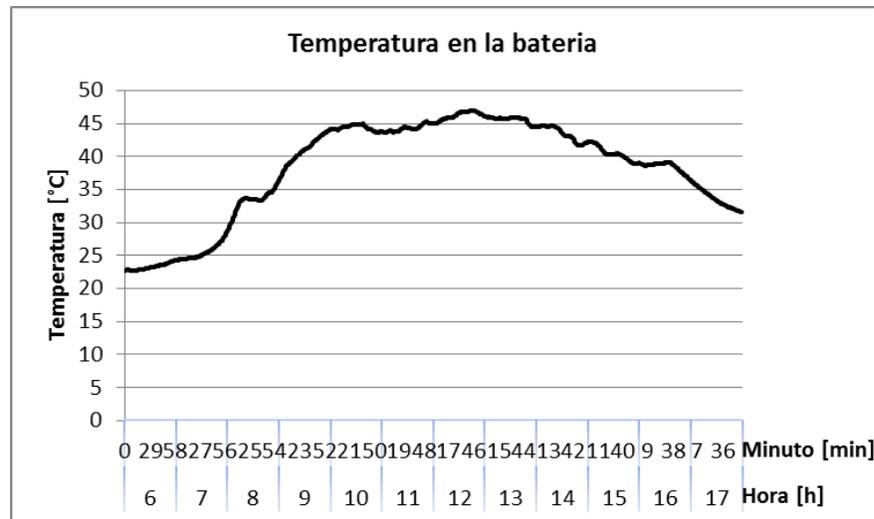


Figura 34. Temperatura en la batería para el 24 de diciembre de 2018 entre las 6:00 y 17:59

Esta variable considerada indirecta será útil en el análisis posterior para determinar si influye o no sobre el prototipo construido y qué tan viable o útil es la inclusión de batería en el sistema solar que acompañará el prototipo desarrollado.

3.9. Correlación Entre Variables Directas $E - T_A - I_{PV} - L_{th}$

Una vez obtenido el comportamiento de cada una de las variables se procedió a encontrar de qué manera se relacionan las variables entre sí, esto con el fin de definir qué tanto influye cada una de ellas en la relación entre radiación y luminancia.

La llave radiación (E) – luminancia de umbral (L_{th}) es la base para el desarrollo del control electrónico, sin embargo, la primera variable de la llave se encontró de manera experimental, mientras que la segunda de manera teórica, por tal razón se sitúa entre las dos la variable *corriente en el panel* (I_{PV}), esta última sirve de enlace y hace posible traducir las variaciones de radiación solar en la luminancia requerida para la zona de umbral.

3.9.1. Radiación solar (E) - Corriente en el panel (I_{PV}).

De acuerdo con el marco teórico presentado al principio del trabajo se sabe que la radiación solar es directamente proporcional a la corriente producida por una celda solar fotovoltaica, por consiguiente se verificó dicha afirmación a través de las mediciones registradas por tres meses.

El coeficiente de correlación de Pearson es una medida de la fuerza con la que se relacionan dos variables cuantitativas, mientras el coeficiente sea más cercano a uno (1) la relación es más fuerte, mientras más cercano a cero es más débil, si se da una relación negativa es porque las dos variables son inversamente proporcionales (Laerd Statistics, s/f). Con base en lo expuesto, se halló el coeficiente de correlación de Pearson para cada día entre las dos variables en estudio obteniendo el resultado de la Tabla 11.

Tabla 11
Coeficiente de Pearson para cada día completo

Día	Dic	Enero	Febrero	Fuerza de asociación	Coeficiente r	Color
1		0.22		Muy pequeña	0-0.59	
2		0.22		Pequeña	0.60-0.79	
3		0.23		Mediana	0.80-0.89	
4		0.10		Grande	0.90-1	
5	0.31	0.41				
6	0.12	0.29				
7	0.36	0.26				
8	0.24	0.14				
9	0.10	0.63				
10	0.07	0.47				
11	0.78	0.16				
12	0.37	0.28				
13	0.15	0.20	0.26			

14	0.28	0.78	0.87
15	0.55	0.04	0.78
16	0.20	0.19	0.83
17	0.18	0.50	
18	0.30	0.21	0.86
19	0.18	0.31	0.93
20	0.28	0.21	0.91
21	0.30	0.23	0.79
22	0.08	0.25	0.85
23	0.01	0.03	0.87
24	0.22	0.33	0.93
25	0.06	0.45	0.82
26	0.37	0.50	0.9
27	0.13	0.52	0.85
28	0.23	0.86	0.83
29	0.51	0.15	
30	0.20	0.09	
31	0.21	0.24	

(Elaboración propia)

Los días en los que no se tiene coeficiente de correlación se debe a la ausencia de datos en una o ambas variables, entre las causas se distinguen el fallo de los piranómetros en cualquiera de las estaciones SIATA o por fallas en el sensor de corriente debido a ausencia de energía eléctrica para el computador.

Los límites para los intervalos que clasifican la fuerza de asociación de las dos variables fueron seleccionados de acuerdo con criterios propios de la investigación y se pretende trabajar solo con datos que tengan coeficiente de Pearson igual o superior a 0.8 y determinar la causa de la baja correlación en los demás días.

Con los días en los que se tiene alta fuerza de asociación, por ejemplo el 26 de febrero de 2019, se demuestra que la corriente y la radiación son directamente proporcionales, fenómeno reflejado en la gráfica de la Figura 35.

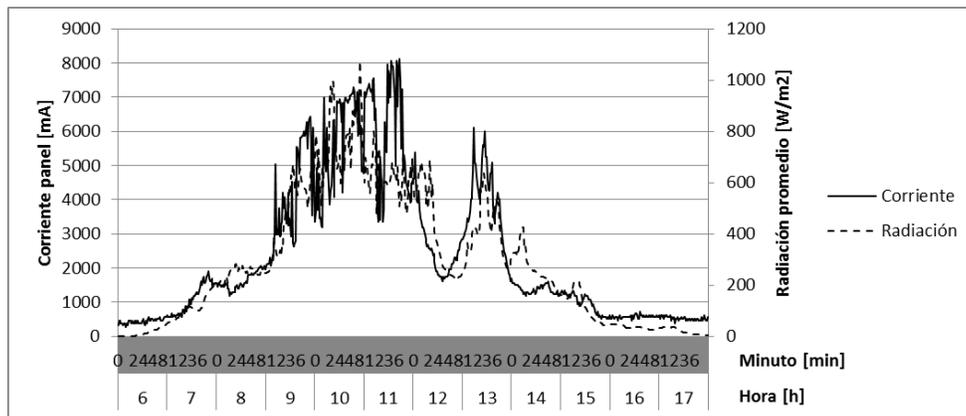


Figura 35. Ipv vs E para el 26 de febrero de 2019

Sin embargo, y en vista que el mayor porcentaje de los coeficientes dan cuenta de una pobre correlación, se analizaron varios días observando que ambas variables presentaban el mismo comportamiento hasta cierta hora de la mañana, aproximadamente las 10:00 horas, y a partir de este momento la corriente y la radiación perdían su proporcionalidad (Figura 36).

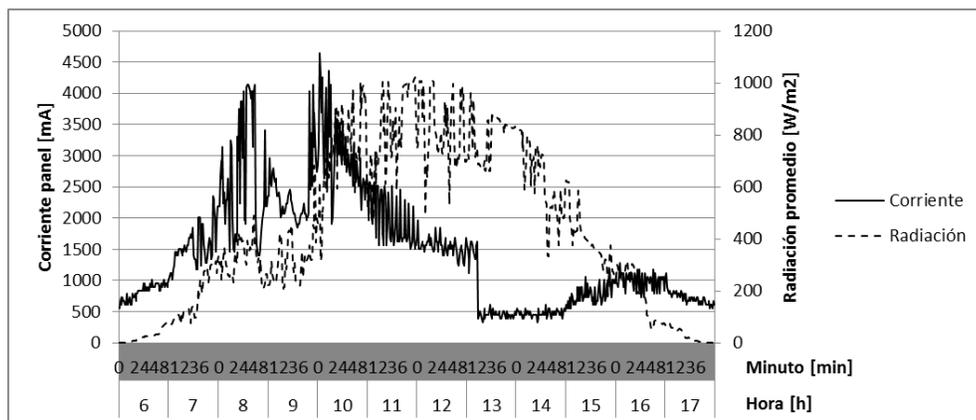


Figura 36. Ipv vs E para el 16 de diciembre de 2018 entre las 6:00 y las 17:59

La Figura 36 muestra el mismo comportamiento para las dos variables hasta las 10:00 am aproximadamente, a partir de ese instante aunque la radiación solar crece se evidencia que la corriente del panel solar decrece, fenómeno detectado en gran parte del registro de datos. De igual manera se cumple lo anterior para todos los días en los que el coeficiente presenta baja fuerza de asociación (Figura 37).

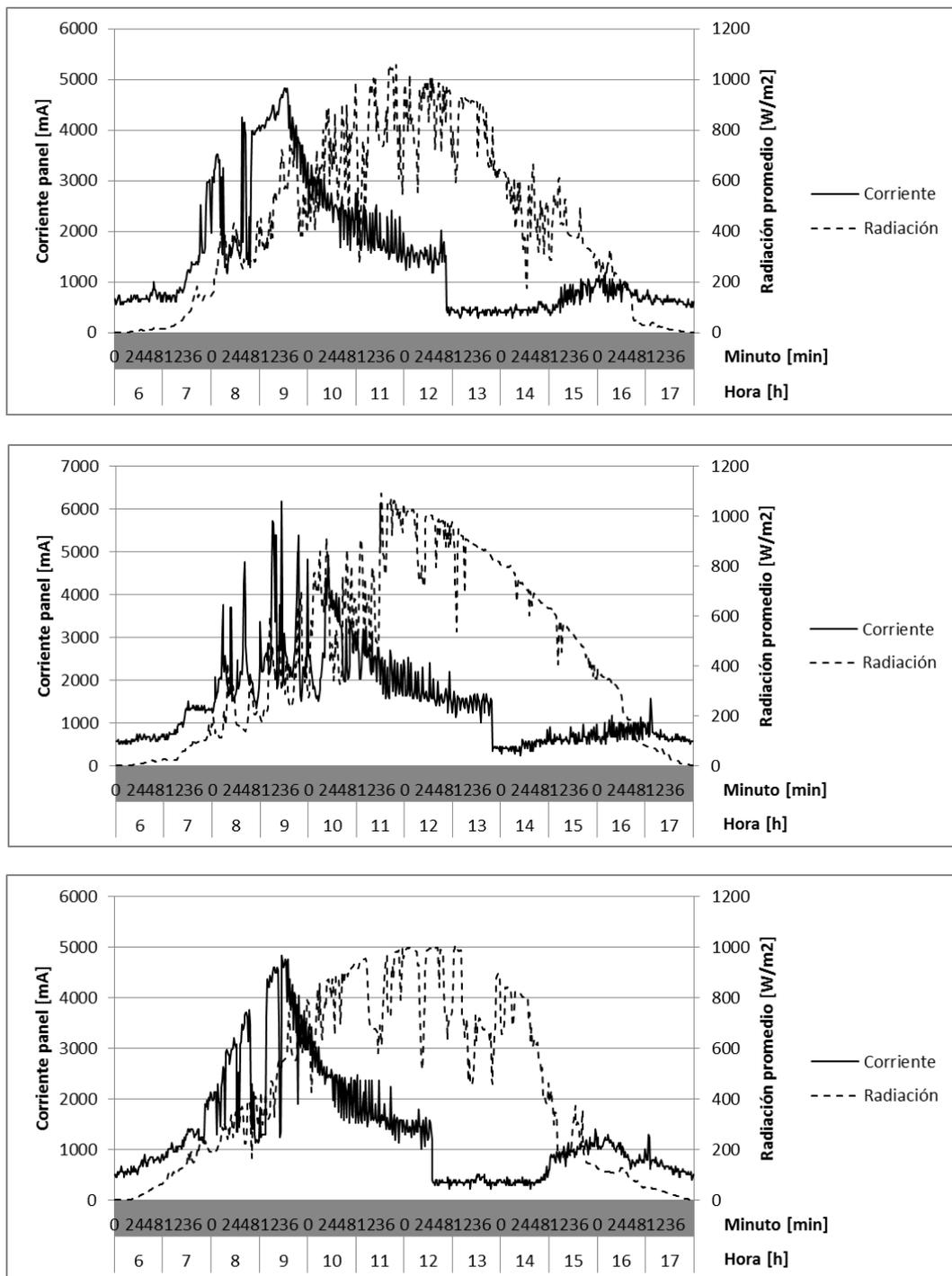


Figura 37. Ipv vs E para los días 24, 31 de diciembre de 2018 y 11 de enero de 2019

En la Figura 37 se observa que la corriente en el panel es proporcional a la radiación solar desde que inicia la mañana hasta aproximadamente las 10:00 horas; en ese instante la radiación continúa creciendo pero la corriente decrece. Este comportamiento se debe al

algoritmo con el cual el controlador de carga PS-MPPT-25M garantiza los ciclos de carga de la batería, es así como, mientras la batería se encuentra en estado de abultamiento no se ejerce ninguna acción sobre la corriente, en el instante que la batería llega al 90% del estado de carga (SOC) el controlador limita la corriente permitiendo que la batería entre en el estado de absorción, permanece así por aproximadamente dos horas y termina limitando la corriente completamente cuando la batería está cargada totalmente y se llega a la etapa flotante (Morningstar Corp, s/f, p. 37). El fenómeno anterior aparece graficado en la Figura 38.

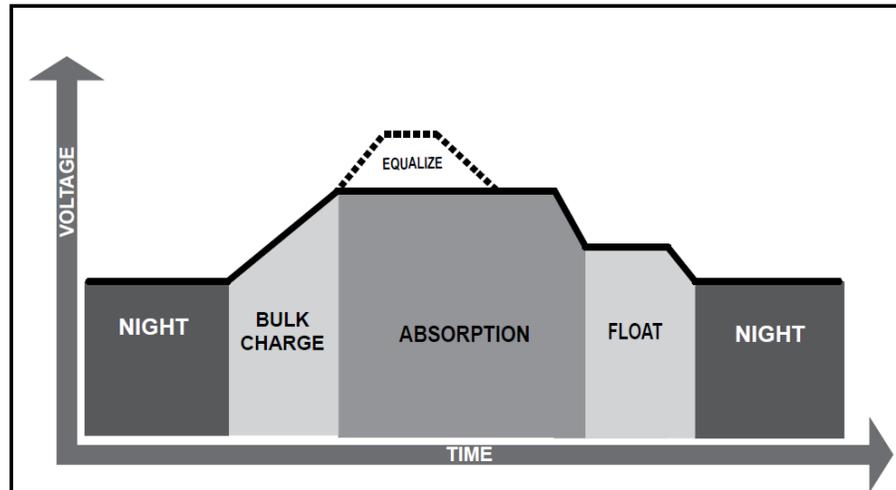


Figura 38. Estados de carga según el algoritmo del PS-MPPT-25M

Tras el hallazgo se obligó al sistema a trabajar, desde mediados de febrero, sin salir del estado de abultamiento (bulk charge) de tal manera que el controlador nunca limitara la corriente suministrada por el sistema, razón por la cual se observan en la Tabla 11 altas fuerzas de asociación entre las variables para la última mitad del mes de febrero.

Teniendo en cuenta lo anterior, se decidió trabajar con los datos diarios teniendo en cuenta solo la etapa de abultamiento, es decir, hasta las 10:00, condición que arroja los coeficientes de correlación de la Tabla 12.

Tabla 12

Coficiente de Pearson para cada día hasta las 10:00

Dí	Dic	Enero	Febrero	Fuerza de asociación	Coficiente r	Color
1		0.84		Muy pequeña	0-0.59	
2		0.89		Pequeña	0.60-0.79	
3		0.9		Mediana	0.80-0.89	
4		0.93		Grande	0.90-1	
5	0.96	0.96				
6	0.8	0.88				

7	0.82	0.93	
8	0.82	0.73	
9	0.81	0.88	
10	0.89	0.7	
11	0.93	0.81	
12	0.89	0.85	
13	0.9	0.94	0.67
14	0.9	0.89	0.98
15	0.97	0.94	0.98
16	0.81	0.83	0.91
17	0.91	0.82	
18	0.74	0.89	0.98
19	0.81	0.76	0.8
20	0.8	0.87	0.96
21	0.77	0.88	0.92
22	0.9	0.8	0.98
23	0.7	0.89	0.89
24	0.85	0.93	0.96
25	0.88	0.98	0.95
26	0.93	0.94	0.91
27	0.91	0.92	0.85
28	0.88	0.96	0.94
29	0.61	0.94	
30	0.88	0.85	
31	0.71	0.78	

(Elaboración propia)

Tras el ejercicio se concluyó que la radiación solar y la corriente son directamente proporcionales y lo seguirán siendo para el sistema siempre y cuando se actúe sobre los ciclos de carga de la batería o se disponga de un sistema solar fotovoltaico en línea sin almacenamiento de energía, en el cual, se utilice la energía en el mismo instante que es generada.

3.9.2. Radiación solar (E) - Temperatura ambiente (T_A).

De acuerdo con lo expuesto en el marco teórico acerca de la energía solar fotovoltaica, un ambiente óptimo para este tipo de sistemas es un lugar con alta radiación solar pero con relativamente baja temperatura ambiente, por consiguiente, con la información recolectada se trató de encontrar la manera en la que la temperatura pudiera afectar la radiación solar, y por consiguiente, la luminancia de umbral requerida para el sistema de iluminación del túnel.

Como se dijo en la sección 3.2, la temperatura en la ciudad de Medellín fue estable durante los tres meses de mediciones, incluso se puede hacer la misma afirmación teniendo en cuenta los datos históricos del IDEAM y la condición de ser una ciudad en la que no se presentan estaciones. Teniendo en cuenta lo anterior, se cruzó la información de ambas variables para el día con mayor temperatura promedio (Figura 39) y el día con menor temperatura promedio (Figura 40).



Figura 39. Día de mayor temperatura promedio durante el período de medición. Fecha: 22/02/2019. Temperatura promedio: 26.4°C. Horario de arriba a abajo: 09:00:05, 12:00:48, 15:00:0

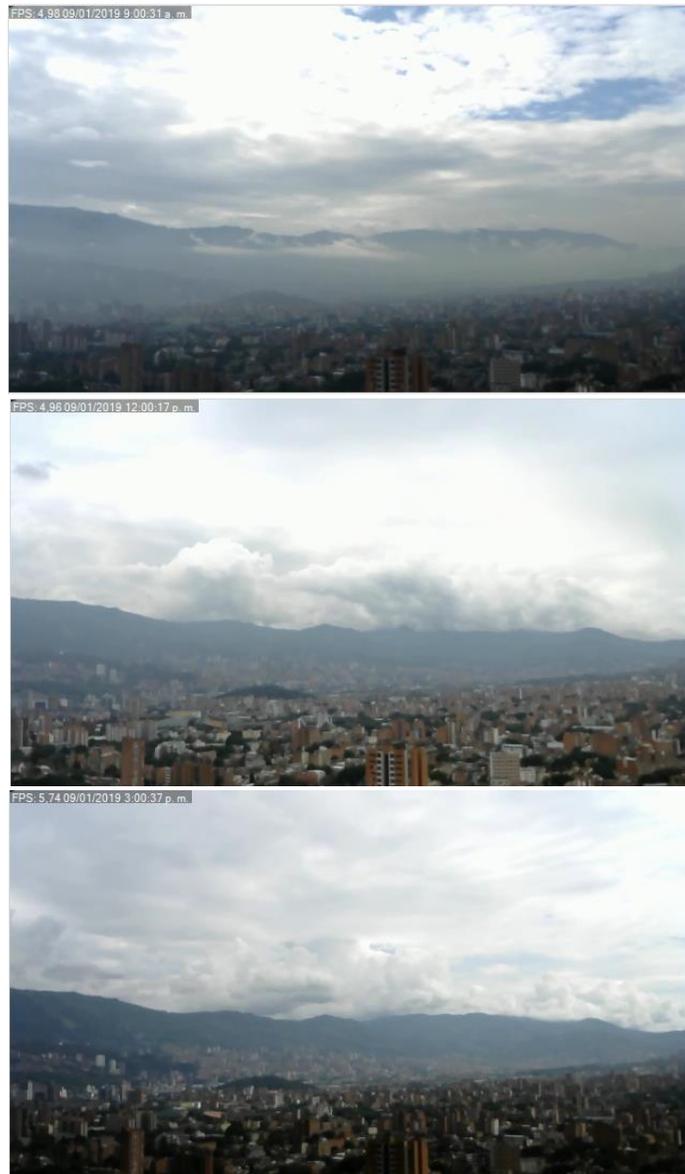


Figura 40. Día de menor temperatura promedio durante el período de medición. Fecha: 09/01/2019. Temperatura promedio: 21.5°C. Horario de arriba a abajo: 09:00:31, 12:00:17, 15:00:3

El día 22 de febrero de 2019 se registró la mayor temperatura promedio, dato que es coherente con la *Figura 39* que muestra un cielo despejado y la *Figura 40*, en la cual, aunque se ven altibajos en la radiación producto de las nubes, se evidencia un patrón de radiación propio de días relativamente despejados. Así mismo, se observa una curva de temperatura que incrementa desde la mañana hasta alcanzar su pico máximo alrededor de las 14:30 registrando 31°C.

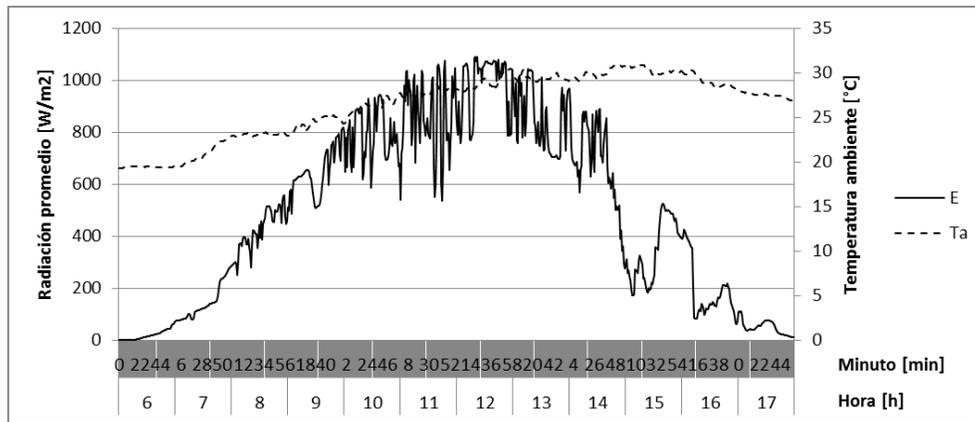


Figura 41. E vs T_A para el día de mayor temperatura promedio

Siguiendo el mismo procedimiento de correlación, se halló el coeficiente Pearson obteniendo el resultado de la Tabla 13.

Para el día 9 de enero de 2019, el de menor temperatura promedio registrada, se observa una curva de radiación de menor magnitud y con unos cuantos picos que para el promedio del día se pueden considerar como altos, aunque el mayor de ellos alcanza los $50W/m^2$ aproximadamente (

Figura 42).

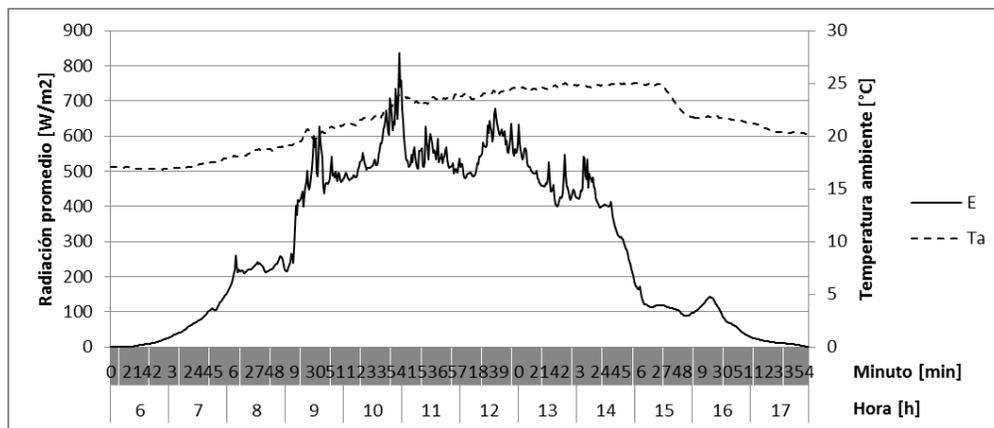


Figura 42. E vs T_A para el día de menor temperatura promedio

Del mismo modo, se halló el coeficiente de correlación mostrado en la Tabla 13.

Tabla 13

Coeficiente Pearson entre E y T_A

Día más caluroso	Día más frío
------------------	--------------

0.527

0.511

(Elaboración propia)

Se concluyó que para las condiciones climáticas de la ciudad de Medellín las dos variables son directamente proporcionales pero su correlación no es alta debido al rango de horario en el que se tomaron los datos, en un rango estrecho cercano al mediodía se tendría un coeficiente mayor, esto quiere decir que para horario cercano a las 12:00 se podría relacionar la temperatura con la luminancia en el portal, sin embargo, el comportamiento de la radiación sigue siendo de mayor confianza para tratar de seguir el patrón descrito por la luminancia a lo largo de un día.

Por último, la temperatura tiene cierto grado de correlación con la radiación para la ciudad de Medellín, sin embargo, no se consideró esta variable en el algoritmo de control desarrollado dado que, teniendo la información de la radiación, la temperatura se vuelve una variable despreciable para el propósito.

3.9.3. Temperatura ambiente (T_A) - Corriente en el panel (I_{PV}).

De acuerdo con el marco teórico presentado, la temperatura ambiente no tiene relación ninguna con la corriente que es capaz de producir una celda solar fotovoltaica, para comprobar dicho postulado se verifican los datos recolectados.

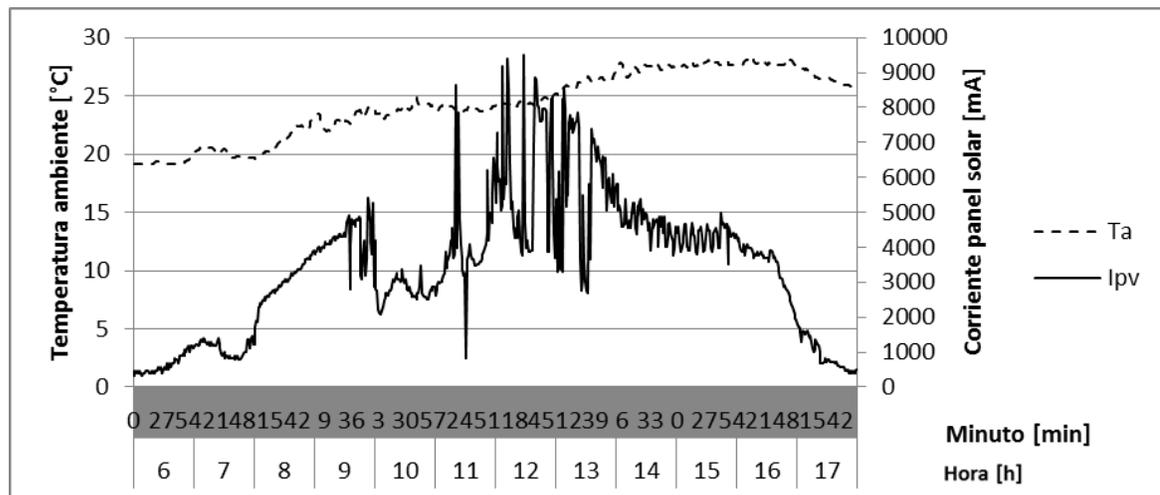


Figura 43. T_A vs I_{PV} para el día con menor temperatura promedio

La Figura 43 muestra los perfiles de curva obtenidos para las dos variables de interés, a simple vista se podría concluir que ambas variables no son proporcionales y no se correlacionan.

Por lo anterior y de acuerdo con la conclusión del numeral 3.9.2 se decide no incluir la temperatura ambiente en el algoritmo de control.

3.9.4. Radiación solar (E) - Luminancia de umbral (L_{th}).

La radiación solar se relaciona directamente con la luminancia de umbral, esto se evidenció tras la comparación que se hizo entre el registro que se tiene de la ciudad en video y el seguimiento minuto a minuto de las variables de interés. Para esto se tomaron tres días como base de análisis, en la Tabla 14 un día soleado (26 de enero de 2019), en la Tabla 15 un día nublado (08 de enero de 2019) y por último, en la Tabla 16 un día lluvioso (21 de enero de 2019).

Tabla 14

Proporcionalidad entre L_{th} y E_m para un día soleado

	<p>Fecha: 26/01/2019 Hora: 06:00:00 Radiación promedio: 0 W/m^2</p>
	<p>Fecha: 26/01/2019 Hora: 09:30:37 Radiación promedio: 225 W/m^2</p>
	<p>Fecha: 26/01/2019 Hora: 12:00:35 Radiación promedio: 1031 W/m^2</p>
	<p>Fecha: 26/01/2019 Hora: 15:30:12 Radiación promedio: 560 W/m^2</p>

	<p>Fecha: 26/01/2019 Hora: 17:59:10 Radiación promedio: 6 W/m²</p>
<p>(Elaboración propia)</p>	
<p>Tabla 15 <i>Proporcionalidad entre Lth y Em para un día nublado</i></p>	
	<p>Fecha: 08/01/2019 Hora: 06:00:01 Radiación promedio: 0 W/m²</p>
	<p>Fecha: 08/01/2019 Hora: 09:30:32 Radiación promedio: 711 W/m²</p>
	<p>Fecha: 08/01/2019 Hora: 12:00:16 Radiación promedio: 971 W/m²</p>
	<p>Fecha: 08/01/2019 Hora: 15:30:11 Radiación promedio: 310 W/m²</p>

	<p>Fecha: 08/01/2019 Hora: 17:59:32 Radiación promedio: 0 W/m²</p>
---	---

(Elaboración propia)

Tabla 16
Proporcionalidad entre *L_{th}* y *E_m* para un día lluvioso

	<p>Fecha: 21/01/2019 Hora: 06:00:05 Radiación promedio: 0 W/m²</p>
	<p>Fecha: 21/01/2019 Hora: 10:15:22 Radiación promedio: 340 W/m² Radiación SIATA: 105 W/m²</p>
	<p>Fecha: 21/01/2019 Hora: 12:00:16 Radiación promedio: 321 W/m²</p>
	<p>Fecha: 21/01/2019 Hora: 15:30:34 Radiación promedio: 435 W/m²</p>



Fecha: 21/01/2019
Hora: 17:59:10
Radiación promedio:
 8 W/m²

(Elaboración propia)

Las tres tablas anteriores presentan el seguimiento de tres días diferentes a través de varias imágenes. Las fotografías dan cuenta de la intensidad lumínica proporcionada por el sol sobre la superficie de la ciudad, mientras que en la columna de la izquierda se muestra el nivel de radiación solar promedio registrada por los piranómetros.

Debido a la distancia entre los tres piranómetros escogidos se pudo comprobar que, en algunas circunstancias, las nubes cubren ciertas partes de la ciudad mientras otras no, dando como resultado mediciones altas de radiación solar en las estaciones con cielo despejado y bajas medidas en las estaciones cubiertas por nubes, tal como sucedió para el día lluvioso que registra una radiación solar promedio de 340 W/m² mientras que en la estación SIATA que es la más cercana a la zona enfocada por la cámara, se registró una radiación de 105 W/m².

De lo anterior se concluye que, aunque no se hayan tomado medidas de luminancia, los valores teóricos hallados de dicha variable se pueden relacionar directamente con la radiación solar. Esta relación de variables se construyó en la Tabla 17 tomando como punto inicial la relación entre el valor máximo registrado de radiación solar con el valor máximo de luminancia encontrado de manera teórica.

Tabla 17

Relación entre Radiación solar (E) y Luminancia de umbral (L_{th})

RADIACIÓN SOLAR [W/m²]	PORCENTAJE DE RADIACIÓN RESPECTO AL MÁXIMO	LUMINANCIA DE UMBRAL [Cd/m²]
0	0	6
112.6	10	30.4
225.2	20	60.8
337.8	30	91.2
450.4	40	121.6
563.0	50	152.0
675.6	60	182.4
788.2	70	212.8
900.8	80	243.2

1013.4	90	273.6
1126.0	100	304.0

(Elaboración propia)

El punto de partida fue la radiación máxima registrada en el período de medición, sin embargo, y de acuerdo con la *Figura 18* en la que el IDEAM (2014) muestra la radiación promedio para cada mes del año en la ciudad de Medellín, se prevé que para el mes de julio se presentará mayor radiación, y por lo tanto, la escala mostrada en la Tabla 17 debe ser replanteada para dar como resultado mayores ahorros de energía, puesto que, para pasar de un estado al superior (mayor consumo de energía) se debe superar un umbral de radiación superior.

Para trabajos futuros se puede contemplar la inclusión de *machine learning* en el sistema, para que de esta manera el control se vaya adaptando a las particularidades del túnel donde sea implementado.

3.9.5. Corriente en el panel (I_{PV}) - Luminancia de umbral (L_{th})

Dada la correlación entre las variables Corriente en el panel (I_{PV}) y Radiación solar (E) mostrada en la sección 3.9.1, y la correlación entre Radiación solar (E) y la Luminancia de umbral (L_{th}) de la sección 3.9.4, se construye una relación directa entre la Corriente en el panel (I_{PV}) y la Luminancia de umbral (L_{th}) tomando la Radiación solar (E) como variable común.

Observando el comportamiento de las dos variables para los primeros meses de medición (Figura 44), se concluye, como era de esperar, que ambas variables son directamente proporcionales hasta el instante de tiempo que el controlador de carga limita la corriente, es decir, hasta aproximadamente las 10:00 para cada día.

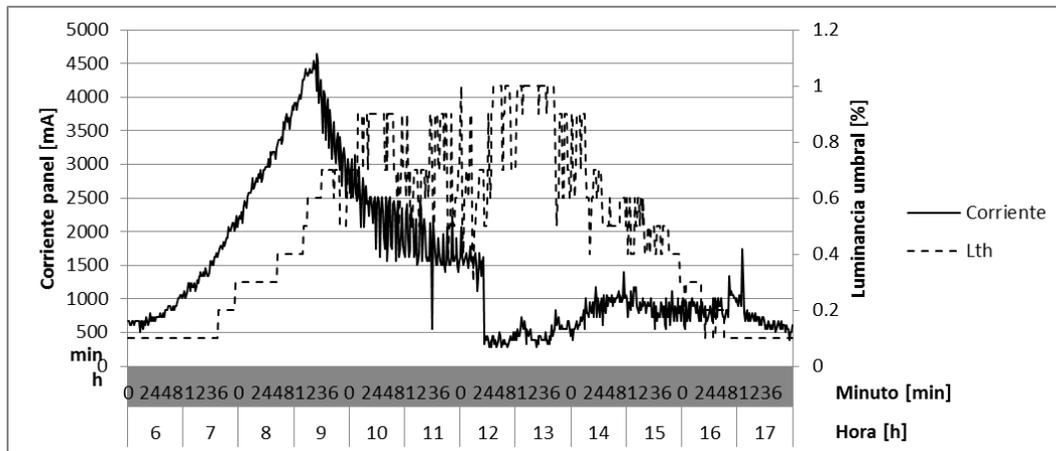


Figura 44. I_{PV} vs L_{th} para el día 27 de diciembre de 2018

Para los días en los que se forzó al sistema, al no limitar la corriente se obtuvo el comportamiento mostrado en la Figura 45.

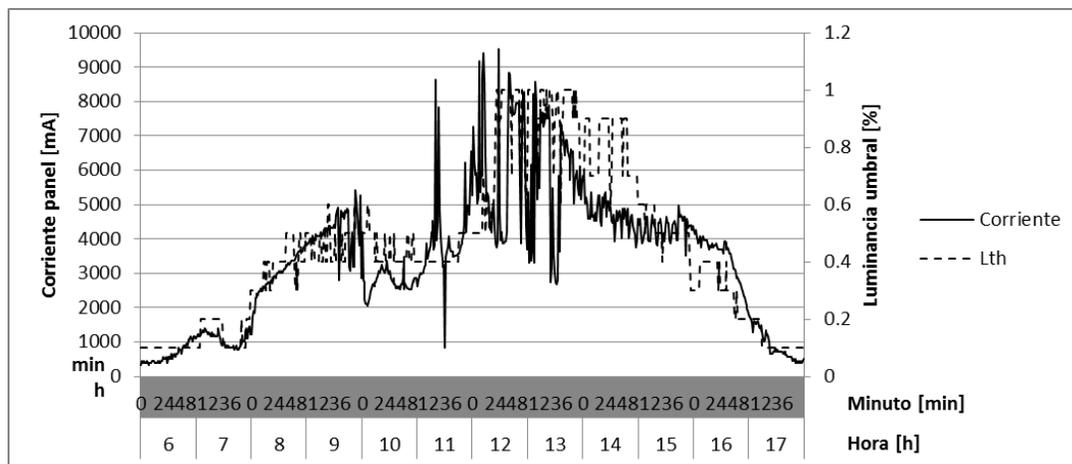


Figura 45. I_{PV} vs L_{th} para el día 25 de febrero de 2019

De las gráficas se observa que la corriente es una variable que describe el comportamiento de la luminancia de umbral, por tal motivo se tomó esta variable como la base para el desarrollo del código para el control.

3.10. Correlación Entre Corriente En El Panel Y Variables Indirectas

Por el análisis hecho hasta el momento se tiene que la variable que mejor se ajusta al comportamiento de la luminancia de umbral es la corriente en el panel, por esto se analiza esta variable desde el punto de vista de la influencia que pueden tener sobre ésta las demás variables indirectas registradas durante la recolección de datos.

3.10.1. Corriente en el panel (I_{PV}) – Voltaje en el panel (V_{PV}).

Tanto voltaje y corriente en una celda solar son cambiantes a lo largo del día, el producto entre estas dos variables da como resultado la potencia que se le entrega al sistema, por tanto, la función del controlador PS-MPPT-25M es balancear voltaje y corriente para entregar siempre la máxima potencia disponible, así mismo, este controlador está en la capacidad de limitar la corriente para proteger la batería y la carga.

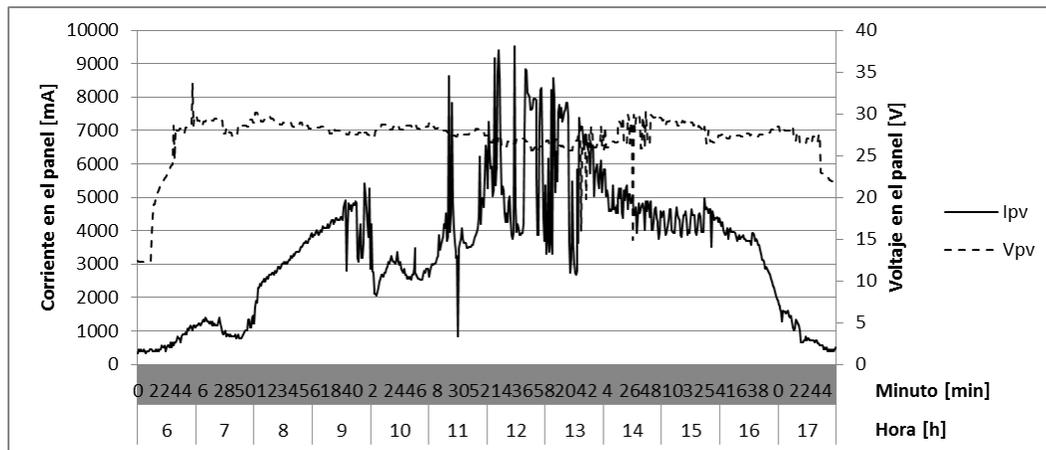


Figura 46. I_{PV} y V_{PV} para el 25 de febrero de 2019

La Figura 46 muestra que el voltaje, a pesar de las variaciones en la radiación solar, permanece relativamente constante alrededor de los 28 voltios, por el contrario, la corriente describe el mismo comportamiento de la radiación solar. Por lo anterior, se determinó que el voltaje en el panel no sería una variable a considerar en el control.

3.10.2. Corriente en el panel (I_{PV}) – Voltaje en la batería (V_B)

Se observó el comportamiento de las dos variables durante todo el período de medición, en la Figura 47 se muestra el resultado para el 25 de febrero de 2019. Se observa que estas dos variables son directamente proporcionales pero con magnitudes diferentes, mientras la corriente en el panel osciló durante el día entre los 0 y los 9500 miliamperios, el voltaje en la batería lo hizo entre 12.3 y 13.5 voltios.

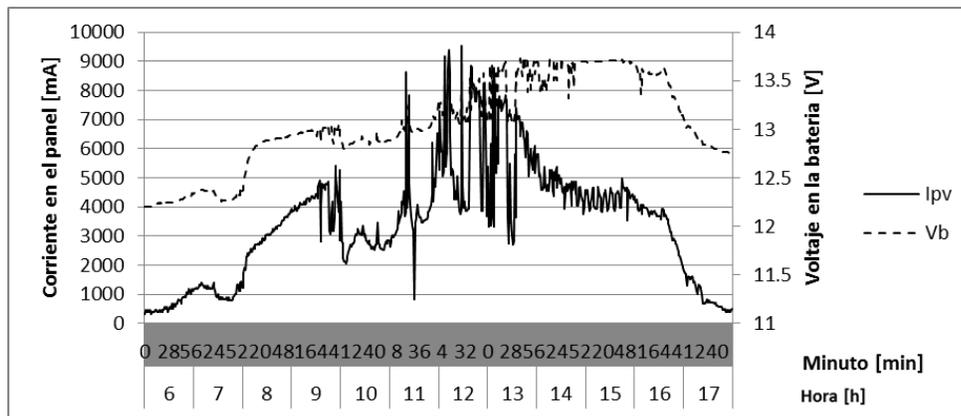


Figura 47. I_{pv} y V_b para el 25 de febrero de 2019

Esta relación es útil mientras la batería permanezca todo el día en estado de abultamiento, en el instante que pasa al estado de absorción se pierde correlación de cualquiera de las dos variables con la radiación solar (E) que es de vital importancia para el control, tal como se expuso en la sección 3.9.1.

La Figura 48 muestra que aun cuando el controlador de carga limita la corriente se conserva la proporcionalidad entre la corriente en el panel y voltaje en la batería, sin embargo, no es de utilidad debido a la no correlación con la radiación solar, y por ende, con la luminancia de umbral.

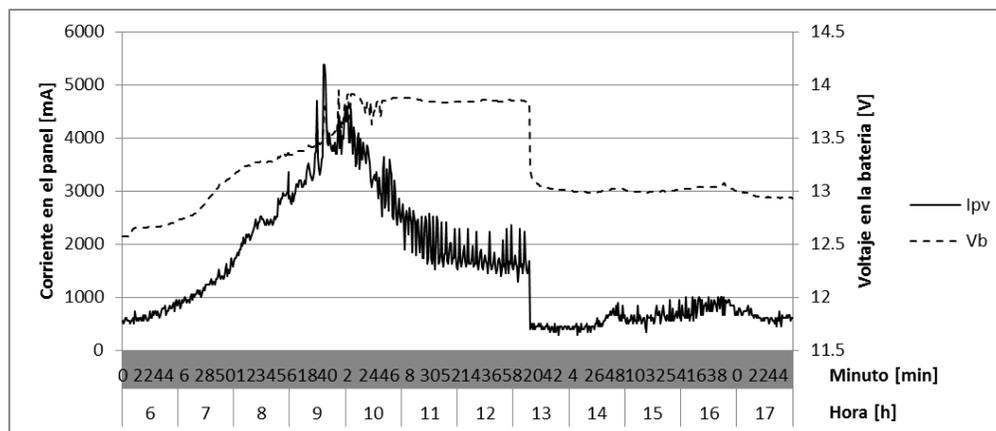


Figura 48. I vs V para el 5 de enero de 2019

De lo dicho se concluyó que la variable voltaje en la batería puede ser tenida en cuenta para el control siempre y cuando esta nunca salga del estado de abultamiento durante los ciclos de carga, condición que degradaría rápidamente la batería.

3.10.3. Corriente en el panel (I_{PV}) – Corriente en la carga (I_C)

De acuerdo con los registros se tiene que ambas corrientes son proporcionales en la medida que se considere a la batería como la carga, es decir, es la batería la que está consumiendo y almacenando durante el día la energía producida por el arreglo solar fotovoltaico. Desde este punto de vista, ambas variables son proporcionales pero, al igual que se expuso en el numeral 3.10.2, al limitar la corriente por cambio en estado de carga se pierde la proporcionalidad con la variable radiación solar (E) que es de primera importancia.

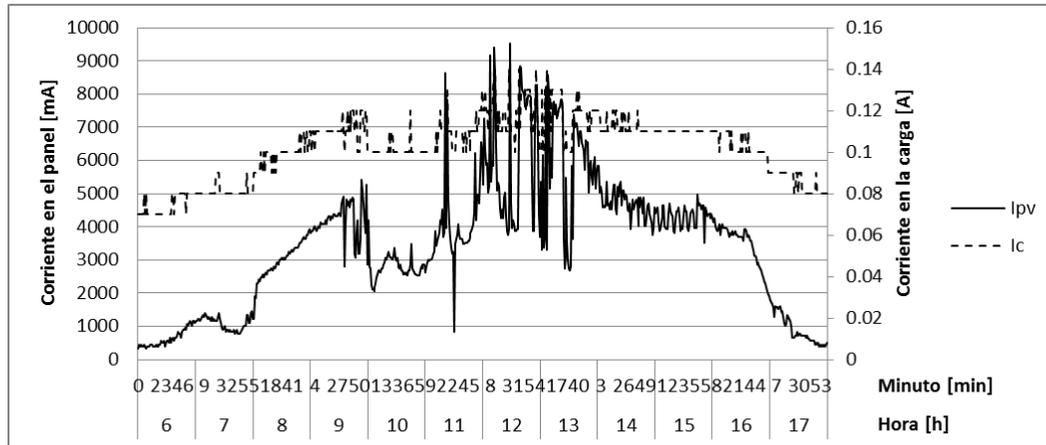


Figura 49. I_{PV} vs I_C para el 25 de febrero de 2019

La Figura 49 muestra la proporcionalidad de las dos variables, pero de igual manera, la utilidad de la corriente en la carga se ve limitada a la condición de los estados de carga de la batería, en el momento que la batería pase del estado abultamiento al estado absorción se pierde correlación con la variable radiación solar, y por tanto, con la luminancia de umbral.

Se concluyó que la variable *corriente en la carga* es útil para el control siempre y cuando la batería permanezca durante todo el día en estado de abultamiento, o en su defecto, pensando en un sistema solar fotovoltaico sin almacenamiento, sería útil la corriente que esté siendo consumida por una carga conectada al sistema a través de un regulador.

3.10.4. Corriente en el panel (I_{PV}) – Temperatura en la batería (T_B)

Como se observa en la Figura 50, ambos perfiles de curva guardan cierta semejanza en el transcurso del día, pero se pierde en los picos altos de corriente, es decir, cuando la radiación aumenta abruptamente debido, en ciertos casos, a la ausencia de nubes.

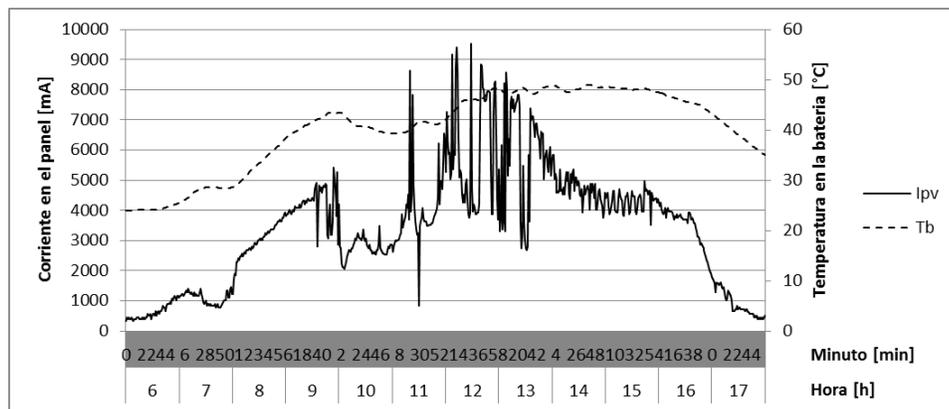


Figura 50. I_{PV} vs T_B para el 25 de febrero de 2019

Sin embargo, esta semejanza se atribuye, en principal medida, a la corriente que es consumida por la batería (carga) durante su ciclo de carga. La Figura 51 muestra cómo influye directamente sobre la temperatura de la batería la corriente que llega a la misma, incluso en mayor medida que la temperatura ambiente.

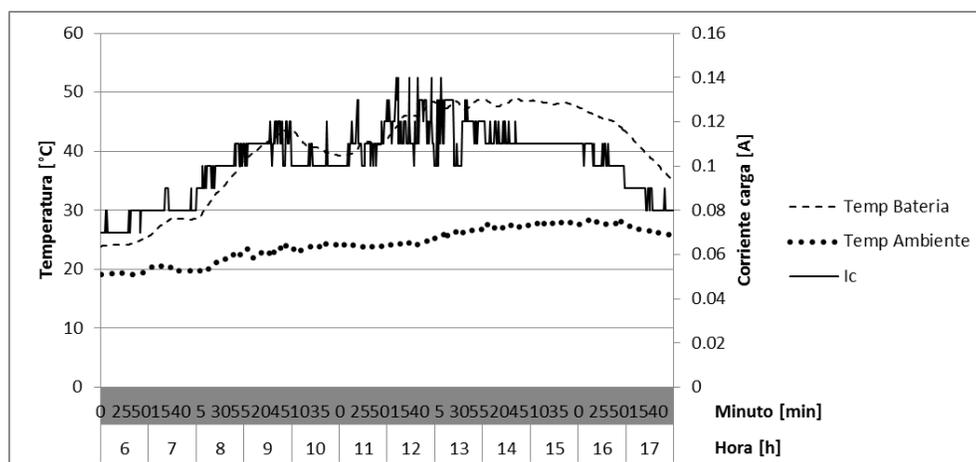


Figura 51. Temperatura en la batería

Ante lo expuesto se llegó a la conclusión que la temperatura en la batería se puede relacionar con la corriente en el panel indirectamente a través de la corriente de la carga (batería), relación que se ve condicionada, al igual que en el numeral 3.10.3, por los ciclos de carga de la batería.

4. PROTOTIPO ELECTRÓNICO

El prototipo desarrollado (Figura 52) se compone de dos dispositivos, el maestro, encargado de recibir la señal de entrada, procesarla y enviar una señal de control, y el esclavo, con la tarea de recibir la señal enviada por el maestro y convertirla en un nivel de tensión entre 0 y 10 voltios.



Figura 52. Prototipo maestro - esclavo

La comunicación entre el dispositivo maestro y esclavo en la primera versión se hizo inalámbricamente mediante comunicación por radio frecuencia, de esta manera se elimina la necesidad de cableado de control a lo largo del túnel, y la potencia a la que se hace la transmisión aunque no es alta, es apropiada para la comunicación entre dispositivos con línea de vista a pesar del lugar confinado (Baronti et al., 2007, p.1670).

4.1. Dispositivo Maestro

En la Figura 53 se muestra la vista externa del prototipo maestro, construido en una caja plástica estándar en la que se dispusieron botones de encendido y apagado, así como controles de operación, sensor de corriente y antena para transmisión de datos.

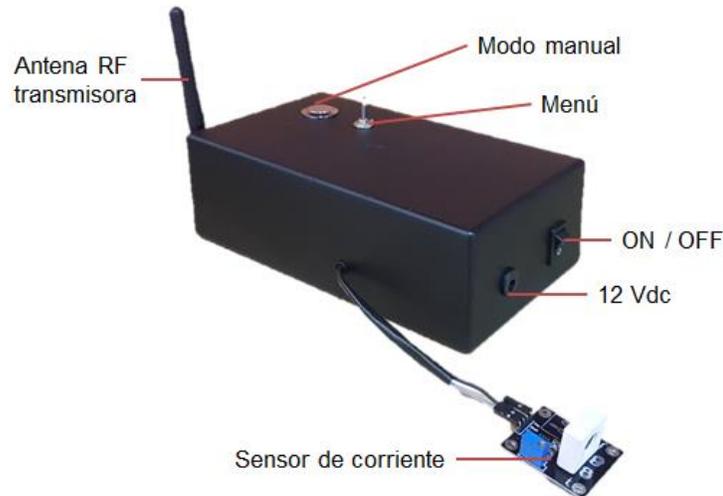


Figura 53. Vista externa del prototipo maestro

En la parte interna se dispuso el hardware electrónico compuesto por dos módulos electrónicos, uno para comunicación RF y otro para medición de corriente, así como una tarjeta que se ensambló para el funcionamiento de los controles y la tarjeta de procesamiento.

El menú para el primer prototipo se compone de tres modos, perilla arriba para el modo “Automático”, perilla en el medio para modo “Manual” y perilla abajo para modo “Mantenimiento”. En el mismo panel (Figura 54) se dispuso de un botón que se utiliza para cambiar de estado mientras se tiene seleccionado el modo manual, cada vez que se pulsa el botón se pasa al siguiente estado hasta llegar al estado 10, una vez se llega a éste inicia nuevamente la cuenta desde el estado 0.

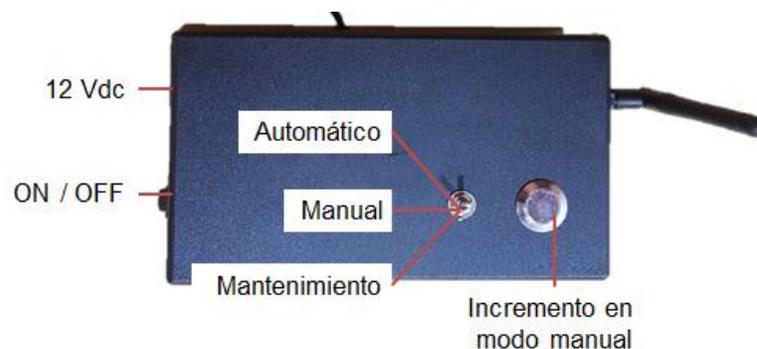


Figura 54. Modos en el panel del dispositivo Maestro

El dispositivo maestro toma como señal de entrada la corriente proveniente del panel solar y la procesa de acuerdo con el esquema representado en la Figura 1.

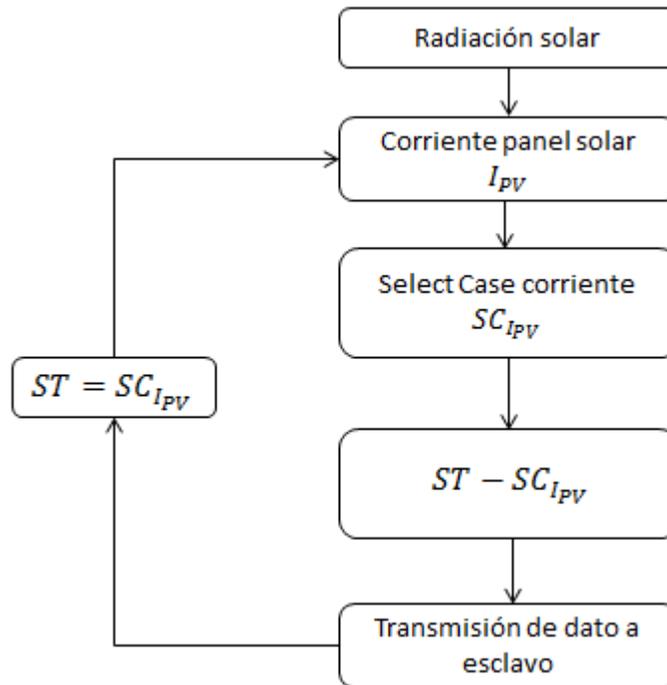


Figura 55. Diagrama de flujo en dispositivo Maestro

El dispositivo maestro registra la corriente proveniente del panel solar que está ligada directamente a la radiación solar, con el dato medido se comprueba la diferencia entre el estado anterior (ST) y el estado actual ($SC_{I_{pv}}$) con el fin de enviar la señal a ejecutar por parte del esclavo. La figura 62 muestra el esquema bajo el cual se construyó el prototipo Maestro.

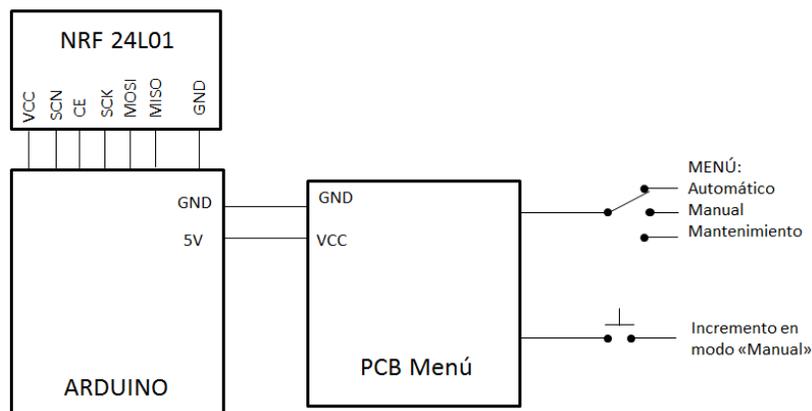


Figura 556. Esquema de circuito en el Maestro

4.1.1. Codificación

Como se pretenden tener 10 estados diferentes más uno de noche, se definen 11 valores diferentes de voltaje, cada uno para un estado, siendo cero voltios (0 V) el estado noche y diez voltios (10 V) el estado 10. Para determinar cuánto flujo luminoso es emitido por cada luminaria en cada una de las escalas, se verifica el funcionamiento del control con la ayuda del goniofotómetro Photoglobe II (Figura 567), el cual posee 19 sensores de iluminancia, de los cuales se usará únicamente el ubicado en $g=0^\circ$, es decir, el ubicado en el nadir del proyector a 1.25m de distancia (SEDIS, s/f).

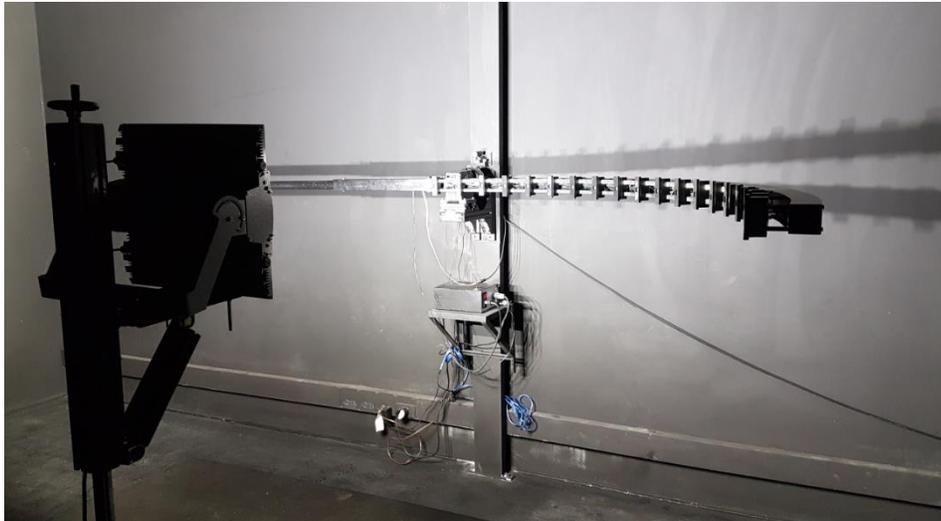


Figura 567. Goniofotómetro Photoglobe II. Laboratorio CELSA S.A.S

Experimentalmente se ubicó un proyector CosmoLED-EV marca CELSA (figura 58), en el goniofotómetro y se construyó la Tabla 18.



Figura 578. Luminaria para túneles CosmoLED-EV marca CELSA. Potencia: 374W, flujo luminoso: 45.750 lm, temperatura de color: 4000K, control: 0 – 10 V, voltaje entrada: 220V

Tabla 18
Variación de iluminancia ante señal de control

Voltaje de control [V]	Iluminancia sobre eje central [lx]				Potencia [W]	Porcentaje sobre iluminancia máxima [%]
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio		
0	1.029	1.032	1.030	1.030	43	11.5
1	1.036	1.039	1.040	1.038	43	11.6
2	2.245	2.243	2.254	2.247	82	25.2
3	3.506	3.501	3.496	3.501	125	39.2
4	4.685	4.686	4.700	4.690	168	52.5
5	5.829	5.815	5.818	5.821	212	65.2
6	6.870	6.861	6.859	6.863	257	76.9
7	7.874	7.859	7.868	7.867	303	88.2
8	8.849	8.845	8.849	8.848	351	99.2
9	8.916	8.918	8.920	8.918	356	99.9
10	8.921	8.919	8.918	8.919	356	100.0

(Elaboración propia)

Con los datos obtenidos tras la experimentación, en la Tabla 18 se evalúa el comportamiento del flujo luminoso ante el aumento secuencial del voltaje de control, comenzando en 0 voltios y terminando en 10 voltios con incremento de un voltio. Con lo obtenido se elaboró la curva de comportamiento de voltaje de control e iluminancia (Figura 585), la cual depende de las características electrónicas del driver de corriente de la luminaria CosmoLED-EV en prueba.

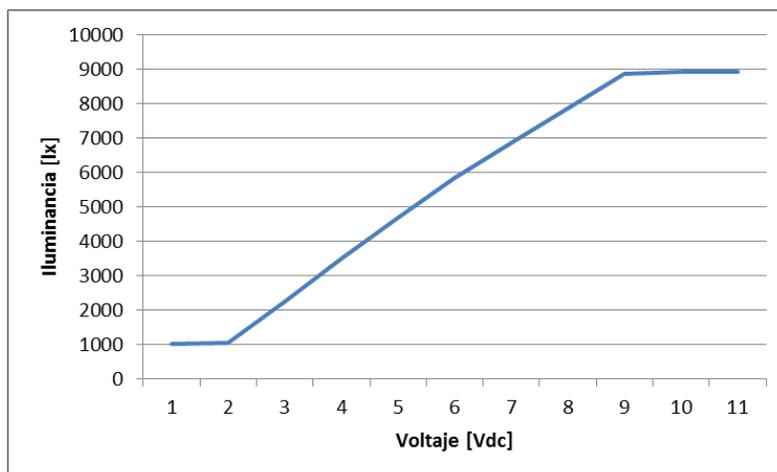


Figura 589. Curva de control 0 - 10 para la luminaria Cosmoled-EV

Tras el resultado obtenido, en la Tabla 19 se determinó un valor de voltaje fijo para cada uno de los estados definidos para el control, tomando únicamente los voltajes que tienen relación lineal con la iluminancia, es así como se parte desde 2 voltios (noche) hasta llegar a 9 voltios (estado 10). El voltaje mínimo, 2 voltios, se relaciona con el nivel mínimo de iluminancia (0 lx), de la misma manera el voltaje máximo, 9 voltios, se relaciona con el valor máximo de iluminancia medido (8.919 lx), los valores intermedios se obtienen con la relación lineal hallada en la Figura 5859.

Tabla 19

Voltaje de control y consumo para cada estado

<i>Estado</i>	<i>Voltaje de control [Vdc]</i>	<i>Iluminancia a 1.25m en nadir [lx]</i>	<i>Potencia [W]</i>
Noche	2	0	0
1	2.7	892	36
2	3.4	1.784	71
3	4.1	2.676	107
4	4.8	3.568	142
5	5.5	4.460	178
6	6.2	5.351	214
7	6.9	6.243	249
8	7.6	7.135	285
9	8.3	8.027	320
10	9.0	8.919	356

(Elaboración propia)

Los datos consignados en la Tabla 19 son los que sirvieron para determinar ante una conversión D-A (Digital - Análoga) el valor que corresponde en programación para cada uno de los estados de iluminación que se pretenden tener en el túnel. Por último, se relacionó la corriente medida en el panel solar con cada uno de los estados de iluminación de acuerdo con los datos consignados en la Tabla 20, así:

Tabla 20

Relación corriente panel – estado de iluminación

<i>Estado de iluminación</i>	<i>Corriente panel [mA]</i>
Noche	0
1	958
2	1915
3	2873
4	3830
5	4788
6	5746

7	6703
8	7661
9	8618
10	9576

(Elaboración propia)

4.1.2. Software Maestro

Considerando todo lo anterior, se desarrolló y programó el código del Anexo 1.3 en la placa Arduino dispuesta para el dispositivo maestro.

4.2. Dispositivo Esclavo.

El dispositivo esclavo se construyó siguiendo los mismos parámetros del dispositivo maestro, así fue como se utilizó una caja plástica estándar para alojar el hardware, tal como se presenta en la Figura 605960.

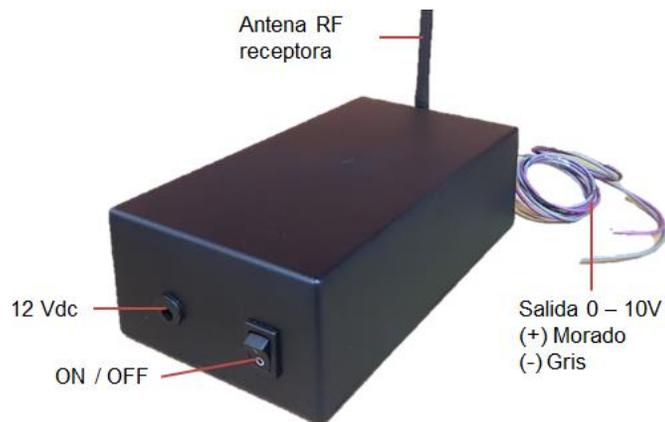


Figura 6059. Vista externa del prototipo esclavo

El dispositivo esclavo se encarga de recibir la señal enviada por el maestro para convertirla en una señal analógica entre 0 y 10 voltios con la finalidad de que sea leída por una luminaria LED con driver electrónico apto para este tipo de control.

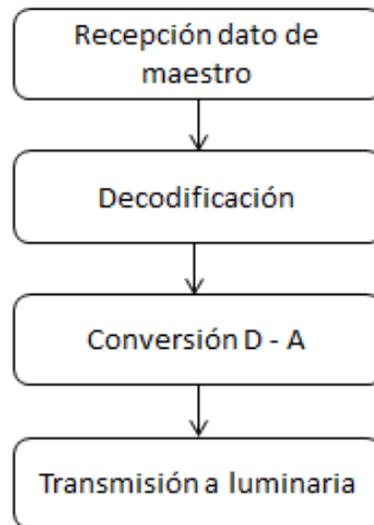


Figura 601. Diagrama de flujo para ejecución de comandos en esclavo

La Figura 601 muestra las etapas en las que opera el dispositivo esclavo, y en la Figura 612 se muestra el circuito implementado.

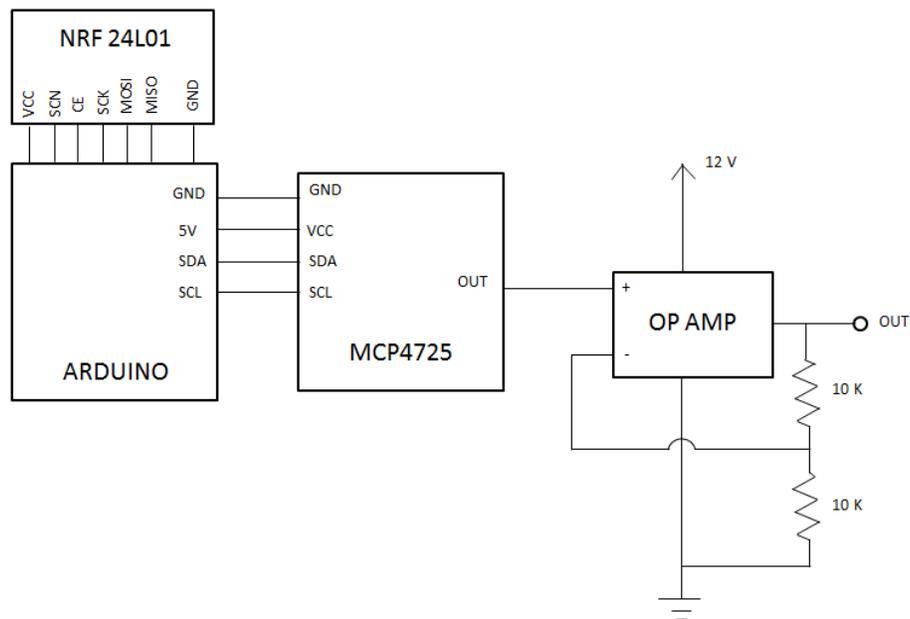


Figura 612. Circuito esquemático del dispositivo esclavo

4.2.1. Recepción dato de maestro

El dato transmitido en la banda ISM es recibido por el dispositivo esclavo, este recibe una variable numérica tipo entero que oscila entre 0 y 10, este valor representa el estado en el que debe estar el sistema de iluminación del túnel, así, si se recibe cero es porque el

sistema debe estar en estado Noche, si recibe el dato 10 es porque el sistema debe estar en su nivel máximo de salida luminosa.

4.2.2. Decodificación: convertor D - A

El esclavo decodifica la señal enviada por el maestro y debe convertirla en una señal análoga para que pueda ser leída por el driver electrónico que poseen la luminaria LED en prueba de acuerdo con los valores calculados en la Tabla 20.

Se desarrolló un convertor análogo – digital (DAC) con el módulo MCP4725 que convierte la señal digital de 12 bits en un valor de voltaje entre 0 y 5 voltios, paso seguido el amplificador operacional LM358 recibe ese nivel de tensión y lo duplica gracias a que se configuró como amplificador no inversor con dos resistencias externas de acuerdo con la ecuación (6) (Franco, S, 2002, p. 9).

$$V_{OUT} = V_{IN} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (6)$$

$$V_{OUT} = V_{IN} \left(1 + \frac{10K}{10K} \right)$$

$$V_{OUT} = 2 \times V_{IN}$$

De acuerdo con lo anterior y con la Tabla 19, el valor digital correspondiente a cada valor de voltaje de control se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21
Equivalencia análoga digital para control 0 – 10V

<i>Estado</i>	<i>Análogo [Vdc]</i>	<i>Digital [12 bits]</i>
Noche	2	819
1	2.7	1.105
2	3.4	1.391
3	4.1	1.678
4	4.8	1.964
5	5.5	2.250
6	6.2	2.536
7	6.9	2.822
8	7.6	3.109
9	8.3	3.395
10	9.0	3.681

(Elaboración propia)

4.2.3. Transmisión a luminaria: Control 0 – 10 V

La señal que transmite el esclavo a la luminaria es una señal análoga con valor de voltaje entre 0 y 10 voltios, de tal manera que la salida de flujo luminoso de la luminaria se escala siendo 10 voltios el 100% del flujo luminoso y 0 voltios la mínima luminosidad (Illuminet, 2016). Por lo anterior, se dispuso de dos cables a la salida del dispositivo esclavo, uno de color morado y el otro de color gris, cumpliendo así con el estándar de colores adoptado a nivel internacional para el protocolo de control 0 – 10V.

Los cables mencionados se deben conectar físicamente a la entrada del driver de cada luminaria, este driver dispone de dos cables de los mismos colores, por tanto se debe conectar haciendo coincidir cada uno de los colores.

4.2.4. Software Esclavo

De igual manera como se hizo con el prototipo maestro, se programó el código incluido como Anexo 1.4 en la placa Arduino incorporada para el dispositivo esclavo.

4.3. Integración Maestro Esclavo

La interacción entre maestro y esclavo se concibió teniendo en cuenta la tendencia mundial de concebir el alumbrado público y exterior como plataforma para una ciudad inteligente, gracias a su omnipresencia y posibilidad de ubicar equipos de sensores y telecomunicación en promedio cada 30 metros (Esmartcity, 2017). Para lograr lo dicho, se integran los dos componentes del sistema a través de comunicación inalámbrica por radiofrecuencia, lo cual le dará el potencial a este prototipo de ser aprovechado en trabajos futuros para otros fines y adaptado incluso a diferentes tecnologías inalámbricas con el objetivo final de hacer de este dispositivo tan solo un componente de una gran red para la prestación de diferentes servicios, como por ejemplo, comunicación con redes de emergencia, información de otros sistemas del túnel, plataforma para labores de mantenimiento, entre otros.

Los elementos electrónicos y protocolos utilizados en el desarrollo de este control obedecen a la necesaria búsqueda del balance apropiado entre comunicación y capacidad para el procesamiento de datos (Buratti et al., 2009, 6891).

4.3.1. Comunicación inalámbrica.

Ambos dispositivos, maestro y esclavo, interactúan inalámbricamente por radiofrecuencia en la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical), protocolo desarrollado para redes inalámbricas de bajo costo, bajo consumo de energía y baja transferencia de datos con alto grado de confiabilidad (Sikora y Groza, 2005, p. 1786).

Se utilizaron los módulos NRF 24L01 con antena integrada, estos transceptores se comunican en la banda 2.4 – 2.5 GHz ISM y constan de un sintetizador de frecuencias totalmente integrado, un amplificador de potencia, oscilador de cristal, demodulador, modulador y protocolo Enhanced ShockBurst™. Estos módulos pueden usar 125 canales

diferentes, por lo tanto es posible configurar una red en topología estrella con un maestro y 124 esclavos.

Las librerías necesarias para la utilización de estos módulos en Arduino™ se obtuvieron en las plataformas de trabajo colaborativo dispuestas para la misma marca (Nedelkovski, D, s/f). Dichas librerías se usaron y se adaptaron para la necesidad específica de este proyecto.

4.3.2. Modos de operación.

La circulación de vehículos a través de los túneles no siempre es constante, ante ciertas circunstancias es necesario modificar las características de circulación por un túnel, principalmente la velocidad, ésta se ve afectada ante anomalías propias de construcciones como estas, es así como, ante operaciones de mantenimiento o incluso durante alto flujo vehicular se reduce la velocidad de circulación en la vía. Esta reducción en la velocidad supone condiciones diferentes para el cálculo de la luminancia de umbral (ver sección 3.4.2) provocando así condiciones en las que es posible ahorrar un porcentaje adicional de energía.

Por lo anterior, en la primera versión del prototipo se definen tres modos de funcionamiento para el sistema.

Modo manual.

Modo en el cual es posible seleccionar el estado deseado del sistema, es apropiado para comprobar el estado de la comunicación y la salida cada vez que se haya hecho alguna labor de mantenimiento o alguna reparación en el sistema de iluminación. El diagrama de bloques de la Figura 62 muestra el funcionamiento.

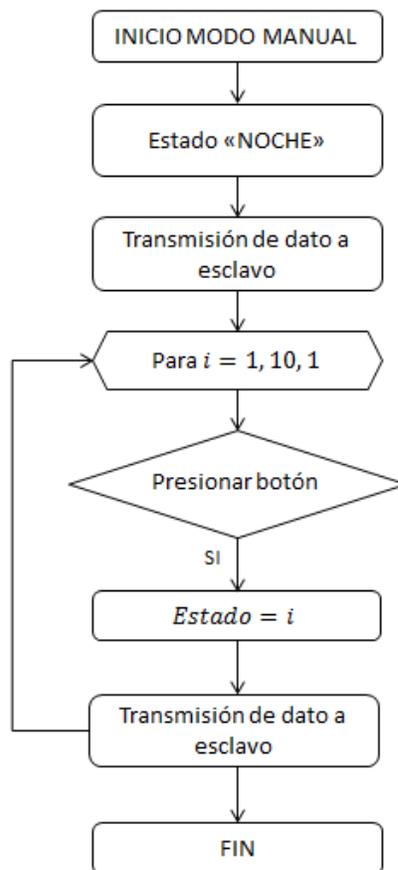


Figura 623. Diagrama de flujo para el modo "manual"

En el modo manual se prueba la salida del sistema de control y la salida de flujo luminoso de las luminarias desde el estado 'Noche' hasta el estado '10', cada transición se hace solo después de pulsar un botón que estará ubicado en el módulo maestro. Con esta metodología se comprueba que el sistema responde adecuadamente después de un mantenimiento, reparación o una falla en cualquier sistema ajeno a la iluminación.

Modo automático.

El modo 'Automático' se debe seleccionar cuando el flujo vehicular en el túnel transcurre de manera normal sin ninguna eventualidad, es decir, cuando los vehículos circulan a la velocidad permitida en la vía y no hay ningún tipo de obstáculo en la vía, como por ejemplo hombres trabajando, un accidente, entre otros.

El diagrama que representa el flujo de la información es el mostrado en la Figura , en donde el control está constantemente evaluando, respecto a la radiación solar, el estado anterior y el estado actual de la iluminación con el fin de determinar el flujo conveniente para cumplir con lo requerido fotométricamente en el túnel y a la vez ahorra energía.

Modo mantenimiento.

Durante el mantenimiento de un túnel, ya sea mantenimiento de la carpeta asfáltica, intervención en el sistema de ventilación, de emergencia, eléctrico, de iluminación o cualquier otro mantenimiento requerido, la velocidad de circulación se reduce, típicamente en un 30% aunque la autoridad de cada túnel es la competente de determinar dicha reducción. Lo que se pretende con este modo (Figura 634) es proporcionar mayor ahorro de energía dado que, ante una menor velocidad de circulación el requisito de luminancia de umbral se reduce, pudiendo tener así niveles menores de iluminación a lo largo de todo el túnel.

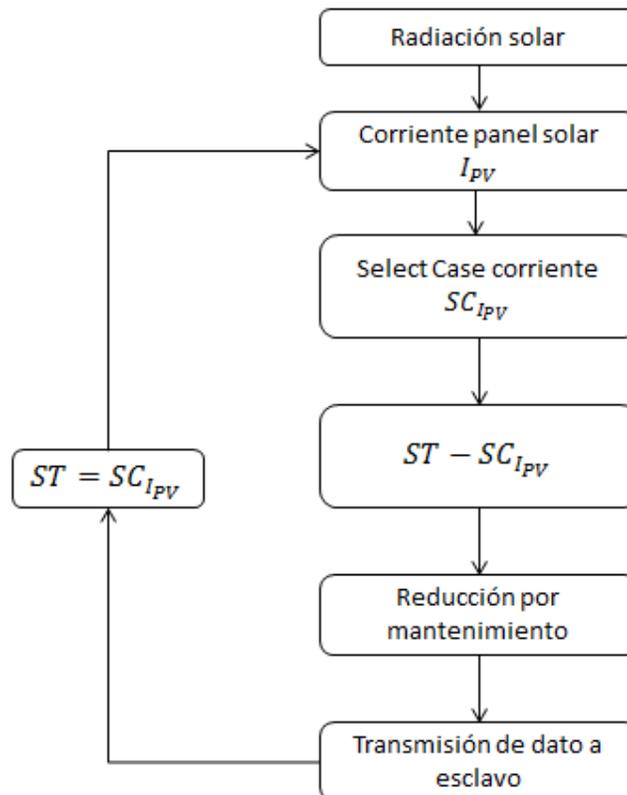


Figura 634. Diagrama de flujo para el modo 'mantenimiento'

Adicional a las condiciones mencionadas en los modos de esta primera versión se pueden considerar modos como 'Congestión', el cual haría parte del modo automático y se encargaría de reducir los requisitos de L_{th} ante la reducción de velocidad causada por congestión vehicular, sin embargo, en este desarrollo no se considera este evento, sí para un trabajo futuro puesto que no es posible con los sensores propuestos detectar la velocidad a la que se desplazan los automóviles.

No se considera modo 'Emergencia' dado que esta situación se debe mitigar desde el diseño de iluminación con la disposición de fuente no interrumpible de energía y con señalización luminosa o reflectiva de las rutas de evacuación a baja altura.

5. ANÁLISIS MULTIDIMENSIONAL

La utilización o no de un prototipo como el desarrollado en este trabajo depende de los beneficios, ventajas o desventajas que se detecten del dispositivo desde diferentes puntos de vista, para efectos del presente trabajo se analiza el prototipo propuesto desde dos puntos de vista: el energético y el económico.

En vista que se calculó la luminancia de umbral para el caso particular del paso a desnivel de la Avenida Oriental en la ciudad de Medellín, se toma éste como caso de estudio y sobre éste se aplica el análisis multidimensional.

El paso a desnivel en cuestión cuenta a la fecha con una carga total instalada como se muestra en la Tabla 22

Tabla 22

Cantidades instaladas en deprimido Avenida Oriental

POTENCIA DE LUMINARIA [W]	CANTIDAD [Uds]	SUBTOTAL [kW]
485	126	61,110
322	22	7,084
285	62	17,670
TOTAL	210	68,194

(Elaboración propia)

Las cantidades instaladas operan en dos modos, modo día y modo noche. En el modo día la totalidad de las luminarias están encendidas, durante la noche se apagan cerca del 75% de las mismas para tratar de igualar los niveles de iluminación al interior del deprimido con los niveles aportados por el alumbrado público tanto a la entrada como a la salida del mismo. Por lo anterior, y teniendo en cuenta que el control operará solo durante el día, se considera el consumo desde las 6:00 hasta las 18:00, lapso del día en el que está presente la luz solar.

Con base en lo dicho, se calcula el consumo de energía para las 12 horas de luz solar multiplicando el total de la carga por las 12 horas de operación, obteniendo así un consumo de 818,328 kWh diarios. Aunque se sabe que la iluminación funcionará durante la noche con un consumo menor, esta energía no se tiene en cuenta dado que, con o sin control, el consumo nocturno es constante, y haya o no haya control su exclusión no afectará los datos para la comparación.

5.1. Análisis Energético

La energía consumida a lo largo de un día por el sistema de iluminación actual se representa gráficamente en la Figura 64. A las 6:00, gracias a un reloj o *timer* incorporado en el gabinete eléctrico, se enciende todo el sistema, permanece encendido durante 12 horas y a las 18:00 se apaga hasta el día siguiente.

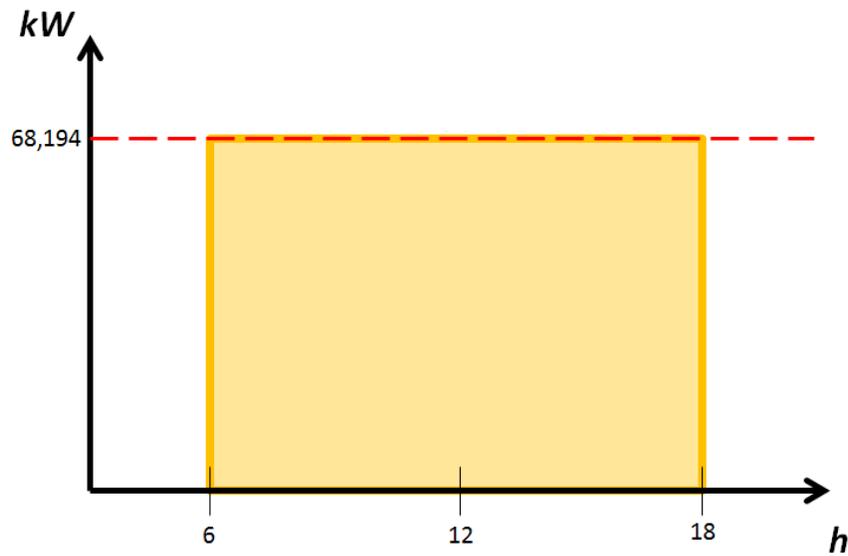


Figura 645. Consumo energético para el sistema de iluminación sin control

Con la incorporación del control es posible disminuir el área de gráfica que representa el consumo de energía y ajustar el consumo a la luminancia de umbral cambiante durante el día. La Figura 65 muestra, para un día ideal, de color verde la porción de energía que es posible ahorrar gracias al control.

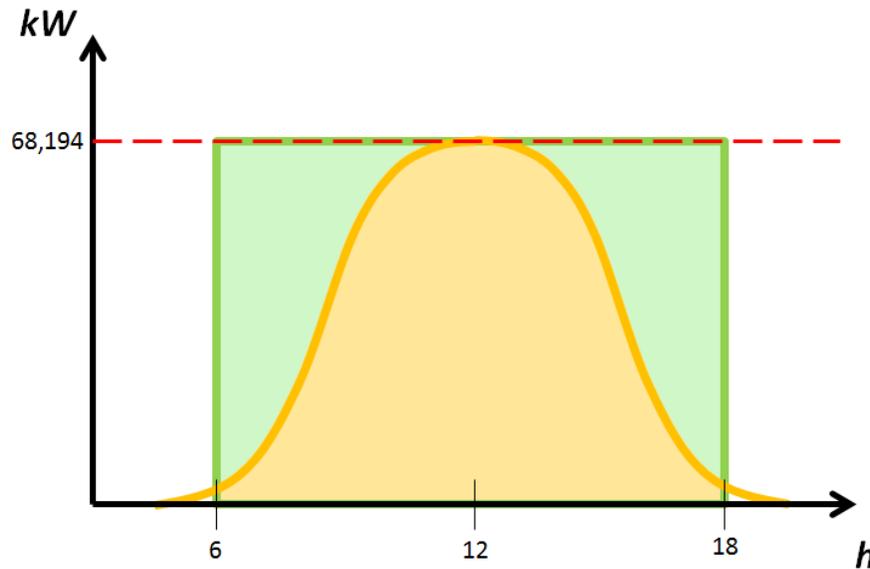


Figura 656. Consumo energético para el sistema de iluminación con control

La figura 66 muestra cómo un sistema de iluminación para un túnel puede llegar a ser ineficiente, sin control, sobre todo al amanecer y al atardecer, pero por el contrario, en horas cercanas al mediodía se tiene un sistema eficiente consumiendo la energía necesaria para su correcto funcionamiento.

De acuerdo con lo observado en la Figura 64 se puede concluir que el ahorro de energía, con un sistema perfectamente ajustado a la curva de luminancia a lo largo del día podría representar ahorros de hasta un 50% (Nyx Hemera, s.f-a), es decir, hasta 409,164 kWh diarios.

Con base en el caso de estudio, se analizan tres escenarios (Tabla 23): túnel sin control de iluminación (estado actual), túnel con control de iluminación con luminancímetros y túnel con control de iluminación con paneles solares.

Tabla 23
Análisis energético por escenario

Escenario	Ahorro	Observaciones
Sin control	0	Solo control de encendido y apagado para transiciones noche-día y día-noche
Control con luminancímetros	Hasta 50%	Dependiendo de la cantidad de estados que soporte el sistema
Control con sistema SPV	Hasta 50% + Capacidad SPV instalada	Dependiendo de la cantidad de estados que soporte el sistema y la capacidad instalada con sistema SPV

(Elaboración propia)

La Tabla 23 muestra, como es evidente, la desventaja de un sistema de iluminación de túneles sin ningún tipo de control, por el contrario, con sistema de control se pueden generar ahorros considerables que se verán traducidos en dinero a lo largo de la vida útil del proyecto.

Los posibles ahorros con control no dependen del tipo de sensor que se incorpore, es así como se puede llegar a ahorros de hasta 50% ya sea con luminancímetros o con sistema SPV. Por lo tanto, se concluye que el sistema desarrollado no representa ninguna ventaja respecto a los controles tradicionales en cuanto ahorro de energía se refiere, sin embargo, y considerando la posibilidad de utilizar la energía producida por los paneles solares para el autoconsumo, se podrían tener ahorros adicionales que dependerían de la magnitud de la capacidad instalada con celdas fotovoltaicas, así, una instalación igual a ocho veces la utilizada para este proyecto, se tendría una capacidad de 2kWp (kilovatios pico) que considerando la disponibilidad del recurso en Medellín, con aproximadamente 4.5 HPS (horas pico solares), se traduciría en cerca de 9 kWh/d.

5.2. Análisis Económico

Se analizan los tres escenarios propuestos en la sección 5.1 considerando para el tercer escenario un sistema SPV de 2 kWp para cada portal y para una proyección a 20 años, tiempo de vida útil estimado para una luminaria LED (Hong y Narendran, 2004).

Tabla 24
Evaluación de económica de escenarios a 20 años

ESCENARIO	ITEM	AÑO		SUBTOTAL	TOTAL
		0	1 al 20		
1	Sistema de control	\$ -		\$ -	\$2,192,382,545
	Consumo de energía*		\$ 109,619,127	\$ 2,192,382,545	
2	Sistema de control**	\$ 25,200,000		\$ 25,200,000	\$1,691,994,109
	Luminancímetros***	\$ 22,507,200		\$ 22,507,200	
	Consumo de energía*		\$ 82,214,345	\$ 1,644,286,909	
3	Sistema de control**	\$ 25,200,000		\$ 25,200,000	\$1,624,389,109
	Sistema SPV****	\$ 3,126,000		\$ 3,126,000	
	Consumo de energía*		\$ 82,214,345	\$ 1,644,286,909	
	Generación distribuida*****		\$ 2,411,190	-\$ 48,223,800	

* Precio de kWh promedio durante el 2018 para la ciudad de medellin = 367 \$/kWh. Para los escenarios con control se consideró un ahorro del 25% con el fin de mostrar calculos conservadores.

* Consumo de energía diario 818,328 kWh.

** Costo del sistema de \$120.000 por cada luminaria.

*** Dos unidades, una para cada portal. Referencia HY-LXP21

**** Dos unidades. 2kWp para cada portal. Marca SUNKET.

*****18kWh/d entre los dos portales.

(Elaboración propia)

Algunos precios de la Tabla 24 fueron convertidos de dólares americanos a pesos colombianos de acuerdo con la TRM del 25 de marzo de 2019 (1USD = COP \$3.126).

Se cotizaron luminancímetros marca SICHUANHONGYUE-W que no tienen soporte ni garantía en territorio colombiano, sin embargo son útiles y de bajo precio, para el día de consulta el precio máximo era de USD \$3.600 por unidad. Se tomó el precio máximo y el modelo citado como referencia para la elaboración del ejercicio académico (Sichuanhongyue-w, s/f).

En cuanto al sistema solar fotovoltaico se presupuestan 4kWp para ambos portales, 2 kWp para cada uno, teniendo en cuenta las aproximadamente 4.5 HPS disponibles en Medellín se generaría en total 18 kWh/d sumando los dos portales. Los paneles solares se cotizaron en la misma página de comercio electrónico en el que se consultaron los luminancímetros, para el día de consulta el precio máximo era de USD \$0.25 por vatio. Se tomó el precio máximo para la elaboración del ejercicio académico.

De la Tabla 24 se concluye que a pesar del costo inicial (CAPEX) que representa instalar un sistema de control, a largo plazo se tienen beneficios que sobrepasan con creces el ahorro inicial que se representaría no tener control, puntualmente, y con cálculos conservativos en cuanto al ahorro proporcionado por el sistema (apenas 25%), se tiene que instalar un control en el paso a desnivel en el deprimido de la Avenida Oriental que significaría un ahorro de COP \$500'388.436 en 20 años de funcionamiento. Si se instala control con paneles solares, el ahorro sería aproximadamente de COP \$567'933.436.

Con el ahorro calculado sería posible, una vez termine la vida útil del proyecto, disponer de esos recursos para instalar otro sistema completamente nuevo que obedecería a las condiciones técnicas de aquel entonces.

Entre los escenarios con control incorporado, se halló una diferencia de COP \$ 67'605.000 a favor del sistema desarrollado en esta investigación, ahorro considerable que supera el CAPEX para cualquiera de los dos escenarios.

Cabe aclarar que en el análisis propuesto no se tuvo en cuenta costos de administración, operación y mantenimiento, no se consideró necesario dado que para los tres escenarios sería igual de acuerdo con las condiciones de manejo que se le da al alumbrado público en la ciudad de Medellín, razón por la cual no afectaría las diferencias encontradas en la Tabla 18. Sin embargo, en otros ámbitos es claro que el mantenimiento de los luminancímetros supondría un costo adicional en cuanto calibración mientras que para los paneles solares se trataría de limpieza periódica.

6. TRABAJO FUTURO

Este trabajo de investigación abre una puerta a nuevas posibilidades para controlar la iluminación de túneles con ciertas ventajas respecto a las actuales, sin embargo, es necesario llevar a cabo estudios adicionales que hagan posible la implementación de este

tipo de sistemas en ambientes reales. A continuación se presentan algunos de los aspectos en los que se debe profundizar con investigaciones futuras para así determinar si la idea desarrollada puede llevarse al campo comercial.

En primera instancia, se trabajó un caso particular de la ciudad de Medellín, se espera obtener permiso por parte del operador de red para instalar este control en por lo menos una porción de circuito de iluminación con el fin de evaluar su desempeño y funcionalidad.

En otro sentido, la contaminación que se genera en un ambiente con alto flujo vehicular representa un reto para la implementación de este sistema, aunque las mediciones para esta investigación se hicieron en un ambiente con baja polución, se conoce de antemano, que en túneles urbanos las partículas contaminantes afectan considerablemente los paneles solares debido a la acumulación de polvo. En el futuro se busca determinar de qué manera se puede ajustar la señal entregada por el Maestro al plan de mantenimiento definido para el sistema SPV, es decir, definir una curva que se ajuste al decaimiento progresivo de la energía generada por un sistema SPV a medida que se acumula el polvo, y que se reinicie cada vez que, durante labores de mantenimiento, se limpian los paneles solares.

Por otra parte, en el actual trabajo se desarrolló un prototipo de control que funciona en lazo abierto, es decir, no hay una señal de realimentación que le indique al Maestro si el Esclavo cumplió con la orden o si en realidad las condiciones establecidas por el Maestro son las ideales, por tanto, se pretende avanzar en la investigación con la inclusión de una comunicación bidireccional entre el Maestro y el Esclavo para que así el sistema determine con un balance entre radiación solar y condiciones internas del túnel cual es la mejor configuración.

En el sentido de la comunicación, y en vista que es necesario tener una red de cableado eléctrico para todas las luminarias, se pretende en trabajos futuros la implementación de comunicación PLC (Power Line Communication), esto para aprovechar el cable existente y evaluar si esta característica incrementa la viabilidad económica de la propuesta.

Se pretenden adicionar nuevos modos de funcionamiento, como por ejemplo el modo 'Congestión' puesto que esta condición reduce los requerimientos lumínicos en el túnel, a menor velocidad, menos luz necesaria, por tanto mayor ahorro de energía. El trabajo futuro no solo consistirá en adicionar el modo sino en buscar la manera en que el sistema pueda hacer los cambios entre modos de manera automática sin que sea necesaria la intervención de un operario.

Por último, y desde la visión que se tiene con el trabajo hecho en esta investigación, se pretende identificar el uso que se le puede dar a la tecnología solar fotovoltaica no solamente como fuente de energía sino como fuente de señales para el control de

procesos y situaciones de la vida cotidiana que permitan incrementar la eficiencia a través del ahorro de energía.

7. CONCLUSIONES

Fue posible desarrollar un sistema de control capaz de convertir las variaciones de la radiación solar en 10 estados diferentes para a iluminación del paso de desnivel de la Avenida Oriental ubicado en Medellín combinando datos medidos con datos teóricos; una

vez sea posible llevar a cabo la prueba de este sistema se podrá evaluar su desempeño y trazar el camino que debe tomar para una segunda versión.

Para la implementación de este tipo de control es necesario disponer de un sistema SPV sin almacenamiento de energía, es decir, debe ser un sistema SPV preferiblemente On-Grid sin baterías, esto debido a que de esta manera, sin baterías, el controlador no limita durante el día la corriente que le entrega al sistema a razón de alcanzar el 100% del SOC (State of Charge) de las baterías. Si se limita la corriente se produciría, para el control desarrollado, el mismo fenómeno de ausencia de radiación, condición que este entenderá como inicio del estado noche mientras todavía es mediodía.

Por razones de seguridad de los equipos no se midió en el sitio de estudio sino que se utilizó la información disponible en las torres meteorológicas SIATA dispuestas a lo largo y ancho de la ciudad de Medellín, esta metodología provocó que en ocasiones el promedio de radiación hallado no fuera confiable dado que, por la extensión de la ciudad, es muy probable que en unos sectores haya luz mientras en los otros haya sombra. Se recomienda, para valores más ajustados a cada situación en particular, tomar mediciones de radiación solar in situ y así poder obtener una curva mejor ajustada que podría significar mayores ahorros.

La relación hallada durante la investigación entre luminancia de umbral (L_{th}) y radiación solar (E), es un estimado con base en datos teóricos bajo la norma CIE 88:2004 y datos prácticos obtenidos de fuentes confiables para la ciudad, no obstante la conclusión anterior, y bajo un enfoque comercial, la manera en como se hizo la relación $L_{th} - E$ se considera conveniente para caracterizar ciudades completas y poder ofrecer soluciones estándar con una solución generalizada para toda la ciudad, reduciendo de esta manera los costos necesarios de los estudios previos a una venta de equipos de esta índole.

REFERENCIAS

- Arduino, C. (2018). Arduino (Versión 1.8.7). Recuperado de <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>
- Barbur, J. L., y Stockman, A. (2010). *Photopic, Mesopic and Scotopic Vision and Changes in Visual Performance*. doi.org/10.1016/B978-0-12-374203-2.00233-5
- Baronti, P., Pillai, P., Chook, V. W. C., Chessa, S., Gotta, A., y Hu, y. F. (2007). Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards. *Computer Communications*, 30(7), 1655–1695. doi.org/10.1016/j.comcom.2006.12.020
- Buratti, C., Conti, A., Dardari, D., y Verdone, R. (2009). An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution. *Sensors*, 9(9), 6869–6896. doi.org/10.3390/s90906869
- CIE. (2010). *Mesopic photometry: history, special problems and practical solutions*. Vienna: CIE.
- CIE. (2004). *Guide for the lighting of road tunnels and underpasses: technical report* (2. ed). Vienna: CIE.
- CIE1. (1983). *The basis of physical photometry* (2. ed.). Vienna: CIE.
- CIE. (1990). *Spectral luminous efficiency function for photopic vision* (2. ed). Vienna: CIE.
- Crabtree, G. W., y Lewis, N. S. (s/f). *Solar energy conversion*. *Physics Today*,60(3), 37-42.doi.org/10.1063/1.2718755
- Denardin, G. W., Barriquello, C. H., Campos, A., y do Prado, R. N. (2009). An intelligent system for street lighting monitoring and control. *Brazilian Power Electronics Conference*, 274–278. doi.org/10.1109/COBEP.2009.5347642
- Esmartcity. (2017). *La evolución del alumbrado público conectado hacia un sistema de gestión para Smart Cities*. Recuperado el 17 de febrero de 2019, de: <https://www.esmartcity.es/2017/07/28/evolucion-alumbrado-publico-conectado-sistema-gestion-smart-cities>
- Franco, S. (2002). *Design with operational amplifiers and analog integrated circuits* (3 ed.). San Francisco State University: McGraw Hill.

- Hong, E., y Narendran, N. (2004). A method for projecting useful life of LED lighting systems. *Third International Conference on Solid State Lighting, 5187*, 93–100. doi.org/10.1117/12.509682
- IDEAM. (2010). *Atlas Interactivo - Climatológico*. Recuperado el 29 de enero de 2019, de <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>
- IDEAM. (2014). *Atlas Interactivo - Radiación*. Recuperado el 31 de enero de 2019, de <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- IESNA. (2011). *American National Standard Practice for Tunnel Lighting*. New York.
- Iluminet. (2016). *DALI, DMX y 0-10V sistemas para control de iluminación*. Recuperado el 17 de febrero de 2019, de <https://www.iluminet.com/control-iluminacion-dmx-dali-atenuador/>
- Illuminaton engineering society (s.f). Recuperado de www.ies.org
- INDAL, S. (2002). *Manual de luminotecnía*. Madrid: Indalux.
- International Comission on Illumination (s.f.). Recuperado de www.cie.co.at
- Kelly, N. A., y Gibson, T. L. (2011). Increasing the solar photovoltaic energy capture on sunny and cloudy days. *Solar Energy, 85*(1), 111–125. doi.org/10.1016/j.solener.2010.10.015
- Kircher, K., y Ahlstrom, C. (2012). The impact of tunnel design and lighting on the performance of attentive and visually distracted drivers. *Accident Analysis & Prevention, 47*, 153–161.
- Laerd Statistics. (s/f). Pearson Product-Moment Correlation - When you should run this test, the range of values the coefficient can take and how to measure strength of association. Recuperado el 11 de marzo de 2019, de <https://statistics.laerd.com/statistical-guides/pearson-correlation-coefficient-statistical-guide.php>
- Leitner, A. (2001). The fire catastrophe in the Tauern Tunnel: experience and conclusions for the Austrian guidelines. *Tunnelling and Underground Space Technology, 16*(3), 217–223. doi.org/10.1016/S0886-7798(01)00042-6
- Mashimo, H. (2002). State of the road tunnel safety technology in Japan. *Tunnelling and Underground Space Technology, 17*(2), 145–152. doi.org/10.1016/S0886-7798(02)00017-2
- Ministerio de Minas y Energía (2010). Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público, RETILAP. Bogotá: autor.

- Morningstar Corp. (2015). MSView. Recuperado de <https://www.morningstarcorp.com/msview/>
- Morningstar Corp. (s/f). *ProStar MPPT - Solar charging system controller - Installation, operation and maintenance manual*. Recuperado de https://2n1s7w3qw84d2ysnx3ia2bct-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2015/10/ProStar-MPPT-manual-MS-001537_v1.0.pdf
- Nedelkovski, D. (s/f). Arduino Wireless Communication - NRF24L01 Tutorial - HowToMechatronics. Recuperado el 19 de abril de 2019, de <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/arduino-wireless-communication-nrf24l01-tutorial/>
- Nyx Hemera.Technologies (s.f.-a). Energy Saving. Recuperado el 25 de marzo de 2019, de <https://www.nyx-hemera.com/en/benefits/energy-saving>
- Nyx Hemera. (s.f-b). Multistage. Recuperado el 9 de febrero de 2019, de <https://www.nyx-hemera.com/en/benefits/energy-saving/multistage>
- Parida, B., Iniyan, S., y Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1625–1636. doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.032
- Processing Foundation. (2018). *Processing (Versión 3.4)*. Recuperado de <https://processing.org/download/>
- Rehman, S., Bader, M. A., y Al-Moallem, S. A. (2007). Cost of solar energy generated using PV panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(8), 1843–1857. doi.org/10.1016/j.rser.2006.03.005
- Salam, A. O. A., y Mezher, K. A. (2014). Energy saving in tunnels lighting using shading structures. *2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 519–524.
- Schreuder, D. A. (1964). *The lighting of vehicular traffic tunnels*. (Doctoral dissertation. Technische Hogeschool Eindhoven).
- SEDIS. (s/f). Photoglobe 4FA. Recuperado el 26 de marzo de 2019, <http://www.sedislight.com/photoglobe-4fa/>
- Shin, J. C., Yaguchi, H., y Shioiri, S. (2004). Change of Color Appearance in Photopic, Mesopic and Scotopic Vision. *Optical Review*, 11(4), 265–271. doi.org/10.1007/s10043-004-0265-2
- SICHUANHONGYUE-W. (s/f). Hy-lxp21 Tunnel Light Intensity Brightness Luminance Meter Monitor - Buy Hy-lxp21 Recuperado el 25 de marzo de 2019, de

www.alibaba.com/product-detail/HY-LXP21-tunnel-light-intensity-brightness_60492190176.html

- Sonnenenergie, D. G. für. (2008). *Planning and Installing Photovoltaic Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers*. Earthscan.
- Ubicell. (s/f). *Smart lighting*. Recuperado el 10 de marzo de 2019, de <http://www.ubicquia.com/ubi400-2/>
- Varilone, P., Verde, P., Caporaso, F., Cesolini, E., & Drusin, S. (2014). Integrated modelling and experimental verification of energy consumption and performance of the lighting systems of tunnels. *AEIT Annual Conference - From Research to Industry: The Need for a More Effective Technology Transfer (AEIT)*, 1–6. doi.org/10.1109/AEIT.2014.7002064
- Zeng, H., Qiu, J., Shen, X., Dai, G., Liu, P., y Le, S. (2011). Fuzzy control of LED tunnel lighting and energy conservation. *Tsinghua Science & Technology*, 16(6), 576–582.
- Zhigang, Du., Zhanji, Z., Miao, Z., Bin,R., y Xin, Z. (2014). Drivers' visual comfort at highway tunnel portals: A quantitative analysis based on visual oscillation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 31, 37–47. doi.org/10.1016/j.trd.2014.05.012

ANEXOS

Anexo 1. Códigos programados en las diferentes plataformas de desarrollo

Anexo 1.1 Código programado en el sensor de corriente.

```
void setup() {
  // Iniciar comunicacion serial a 9600 bits por segundo
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  int sensorValue = analogRead(A0); //Lectura de entrada análoga en pin 0
  int current = 63.1 * sensorValue + 2519.7; //Ecuación de ajuste corriente en mA
  Serial.println(current); // Impresión serial del valor de corriente +- 100mA
  delay(1000); // Pausa de 1s para estabilidad
```

Anexo 1.2 Código en Processing para almacenar información.

```
import processing.serial.*; //Libreria serial

Serial myPort; //Crear objeto de clase Serial
String myString; //Declaración de String
int nl = 10; //Numero de bits por dato
float current; //Declaración de variable "corriente"
Table table; //Variable "tabla"
int flag = 70; //Control de guardado csv

void setup() {
  printArray(Serial.list()); // Listar todos los puertos serials disponibles
  myPort = new Serial(this, Serial.list()[0], 9600); // Abrir el Puerto

  table = new Table();

  table.addColumn("Current");
  table.addColumn("Year");
  table.addColumn("Month");
  table.addColumn("Day");
  table.addColumn("Hour");
  table.addColumn("Minute");
}

void draw() {
  while (myPort.available() > 0) {
```

```

myString = myPort.readStringUntil(nl); //Lee el dato serial como un arreglo

int m = minute();           //Valores de 00 a 60 para minutos
int h = hour();             //Valores de 0 a 23 para horas
int dd = day();             //Valores de 1 a 31 para días
int mm = month();           //Valores de 1 a 12 para meses
int yy = year();            //Valores para años
    if (myString != null) {
        current = float(myString); //Convierte el arreglo en numero
        //Imprime la corriente en formato separado por comas
        println(current, ",", yy, ",", mm, ",", dd, ",", h, ",", m);

        //Se crea una nueva fila cada minute cuando la hora está entre las 6am y 6pm
        if ((m != flag) && (h >= 6) && (h <= 17)){
            TableRow newRow = table.addRow();
            newRow.setFloat("Current", current );
            newRow.setInt("Year", yy);
            newRow.setInt("Month", mm);
            newRow.setInt("Day", dd);
            newRow.setInt("Hour", h);
            newRow.setInt("Minute", m);

            saveTable(table, "data/PVcurrent.csv");
            flag = m;
        }
    }
}

```

Anexo 1.3 Código Programado En Dispositivo Maestro

```

#include <SPI.h>           //Wireless communication Library. Thanks to Dejan Nedelkovski,
www.HowToMechatronics.com
#include <nRF24L01.h>     //Library: TMRh20/RF24, https://github.com/tmrh20/RF24/
#include <RF24.h>
RF24 radio(7, 8); // CE, CSN
const byte address[6] = "00001";
void setup() {
    Serial.begin(9600); // initialize serial communication at 9600 bits per second
    radio.begin();
    radio.openWritingPipe(address);
    radio.setPALevel(RF24_PA_MIN);
    radio.stopListening();
}

```

```

}
void loop() {
  int ST=0;           //State variable. From 0 to 10
  float current=0;   //Current from PV solar system in mA
  float sensorValue=0; //Value from current sensor

```

MENU

```

Serial.println(ST);
if (digitalRead(2)==LOW && digitalRead(3)==HIGH)goto AUTO; //Automatic mode
if (digitalRead(2)==HIGH && digitalRead(3)==HIGH)goto MANUAL; //Manual mode
if (digitalRead(3)==LOW && digitalRead(2)==HIGH)goto
MAINTENANCE;//Maintenance mode selected

```

AUTO

```

Serial.println("AUTO"); //Print "AUTO"
sensorValue = analogRead(A0); // Read the input on analog pin 0
current = (sensorValue*0.005-2.63)/0.0631*1000; // Calculate current in miliamps
Serial.println(ST); // Print actual state
radio.write(&ST, sizeof(ST)); // Send data to slave
delay(1000); // Delay for stability
if (current <= 200){
  ST=0;
}
if (current > 200 && current <= 958){
  ST=1;
}
if (current > 958 && current <= 1915){
  ST=2;
}
if (current > 1915 && current <= 2873){
  ST=3;
}
if (current > 2873 && current <= 3830){
  ST=4;
}
if (current > 3830 && current <= 4788){
  ST=5;
}
if (current > 4788 && current <= 5746){
  ST=6;
}
}

```

```

if (current > 5746 && current <= 6703){
  ST=7;
}
if (current > 6703 && current <= 7661){
  ST=8;
}
if (current > 7661 && current <= 8618){
  ST=9;
}
if (current > 8618 && current <= 9576){
  ST=10;
}
goto MENU;

```

MANUAL

```

Serial.println("MANUAL");    //Print "MANUAL"
radio.write(&ST, sizeof(ST)); //Send data to slave
if (digitalRead(4)==LOW) {   //Push button
  ST=ST+1;                   //Increase state
}
if (ST>=11) {
  ST=0;
}
delay(200);
goto MENU;

```

MAINTENANCE

```

Serial.println("MAINTENANCE"); //Print "MAINTENANCE"
sensorValue = analogRead(A0); //analogRead(A0)
current = 0.7*((sensorValue*0.005-2.63)/0.0631*1000); //Calculate current in miliamps
delay(1000);
if (current <= 0){
  ST=0;
}
if (current > 200 && current <= 958){
  ST=1;
}
if (current > 958 && current <= 1915){
  ST=2;
}

```

```

if (current > 1915 && current <= 2873){
  ST=3;
}
if (current > 2873 && current <= 3830){
  ST=4;
}
if (current > 3830 && current <= 4788){
  ST=5;
}
if (current > 4788 && current <= 5746){
  ST=6;
}
if (current > 5746 && current <= 6703){
  ST=7;
}
if (current > 6703 && current <= 7661){
  ST=8;
}
if (current > 7661 && current <= 8618){
  ST=9;
}
if (current > 8618 && current <= 9576){
  ST=10;
}
radio.write(&ST, sizeof(ST));    //Send data to slave
delay(100);
goto MENU;
}

```

Anexo 1.4 Código programado en dispositivo Esclavo.

```

#include <SPI.h>          //Libraries for wireless communication. Thanks to Dejan
Nedelkovski, www.HowToMechatronics.com
#include <nRF24L01.h>     //Library: TMRh20/RF24, https://github.com/tmrh20/RF24/
#include <RF24.h>
#include <Wire.h>        //Libraries for MCP4725. Thanks to Adafruit
#include <Adafruit_MCP4725.h>
RF24 radio(7, 8); // CE, CSN
const byte address[6] = "00001";
Adafruit_MCP4725 dac;    //Constructor. Source Adafruit
void setup(void) {
  Serial.begin(9600);

```

```
radio.begin();
radio.openReadingPipe(0, address);
radio.setPALevel(RF24_PA_MIN);
radio.startListening();
dac.begin(0x60);
}
void loop() {
  int ST;           //State of lighting system
  int val;          //Digital value for specific state
  if (radio.available()) {
    radio.read(&ST, sizeof(ST));
  }
  Serial.println(ST);
  uint32_t dac_value;
  switch (ST){
    case 0:
      val=819;
      break;
    case 1:
      val=1105;
      break;
    case 2:
      val=1391;
      break;
    case 3:
      val=1678;
      break;
    case 4:
      val=1964;
      break;
    case 5:
      val=2250;
      break;
    case 6:
      val=2536;
      break;
    case 7:
      val=2822;
      break;
    case 8:
      val=3109;
      break;
```

```
case 9:  
    val=3395;  
    break;  
case 10:  
    val=3681;  
    break;  
default:  
    val=3681;  
    break;  
}  
dac.setVoltage(val, false);    //Write digital value for analog conversion  
delay(100);
```

Anexo 2. Cálculo detallado de matriz Lij para evaluación de Lseq

		ANILLO								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
SECCIÓN 1	Cielo						60 %	60%	100 %	No se calcula
	Vía									
	Rocas									
	Edificios					80 %	40 %	40%		
	Prado									
	Túnel	100 %	100 %	100 %	100 %	20 %				
	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	0%	

SECCIÓN 2	Cielo								40 %	90 %
	Vía									
	Rocas									
	Edificios						70 %	100 %	60 %	10 %
	Prado									
	Túnel	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	30 %			
	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	

SECCIÓN 3	Cielo									
	Vía									
	Rocas									
	Edificios							100 %	100 %	100 %
	Prado									
	Túnel	100 %								
	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	

SECCIÓN 4	Cielo									
	Vía							20%	50 %	60 %

SECCIÓN 8	Cielo									
	Vía					30	100	100	100	100
	Rocas					%	%	%	%	%
	Edificios									
	Prado									
	Túnel	100	100	100	100	70				
		%	%	%	%	%	100	100	100	100
		100	100	100	100	100	100	100	100	100
		%	%	%	%	%	%	%	%	%

SECCIÓN 9	Cielo									
	Vía									20
	Rocas									%
	Edificios									
	Prado						10	100	100	80
	Túnel	100	100	100	100	100	90			
		%	%	%	%	%	%	%	%	%
		100	100	100	100	100	100	100	100	100
		%	%	%	%	%	%	%	%	%

SECCIÓN 10	Cielo									
	Vía									
	Rocas									
	Edificios									30
	Prado						100	100	100	70
	Túnel	100	100	100	100	100				
		%	%	%	%	%	%	%	%	%
		100	100	100	100	100	100	100	100	100
		%	%	%	%	%	%	%	%	%

SECCION 11	Cielo									
	Vía									
	Rocas									
	Edificios									
	Prado					50	100	100	100	100

	Túnel	100 %	100 %	100 %	100 %	50 %	%	%	%	%
		100 %								

SECCIÓN 12	Cielo						20 %	20%	25 %	No se calcula
	Vía									
	Rocas									
	Edificios					20 %				
	Prado					80 %	80 %	80%	75 %	
	Túnel	100 %	100 %	100 %	100 %					
		100 %	0%							

Anexo 3

Debido a lo extenso de la información recogida durante el período de recolección de datos, no se copia como parte del trabajo sino que se anexa un CD con la información organizada en un archivo nombrado *Consolidado_datos_JSBH.xlsx*. En este es posible encontrar los datos organizados en tablas dinámicas con las que es posible analizar no solamente los datos que se resumieron en este trabajo sino la totalidad de ellos.