



# SISTEMA DE ILUMINACIÓN VIAL LED INTELIGENTE CON ENERGÍA RENOVABLE Y EFICIENCIA ENERGÉTICA BASADO EN TECNOLOGÍAS EMBEBIDAS Y REDES DE SENSORES

Omar Ormachea, PhD  
Centro de Investigaciones Ópticas y Energías  
**Universidad Privada Boliviana (UPB)**





# Contenido

1

Introducción

4

Iluminación  
LED

7

Implementación  
Sistema Piloto

2

Conceptos

5

Sistema  
Fotovoltaico

8

Análisis de  
Sostenibilidad

3

Objetivos

6

Detección  
Inteligente

9

Conclusiones y  
Recomendaciones



## Contenido

# Introducción



# Antecedentes



**Seguridad ciudadana:** Deficiencia iluminación de rutas, ambiente propicio para robos y accidentes viales



# Antecedentes

En Bolivia, la iluminación de alumbrado público se basa principalmente en lámparas de descarga de vapor de sodio de alta presión y halogenuros metálicos



## Lampara de Na de alta presión

- Rendimiento entre 50-150 Lm/W
- Temperatura de color 2100 °K
- Índice de reproducción cromática: entre 23 y 65%
- Vida útil: 15000-24000 horas
- Potencia: hasta 1000W



## Antecedentes

En Bolivia, la iluminación de alumbrado público se basa principalmente en lámparas de descarga de vapor de sodio de alta presión y halogenuros metálicos



## Lampara de halogenuros metálicos

- Rendimiento entre 70-90 Lm/W
- Temperatura de color 2.800-5.000 °K
- Índice de reproducción cromática: entre 60 y 90%
- Vida útil: hasta **10000 horas**
- Potencia: hasta 2000W

<https://grlum.dpe.upc.edu/manual/sistemasIluminacion-fuentesDeLuz-LamparasDeDescarga-LamparaHalogenurosMetalicos.php>



## Antecedentes

En Bolivia, la iluminación de alumbrado público se basa principalmente en lámparas de descarga de vapor de sodio de alta presión y halogenuros metálicos



## Lampara LED

- Rendimiento entre 70-160 Lm/W
- Temperatura de color: hasta 6500 °K
- Índice de reproducción cromática: entre 80 y 95%
- Vida útil: 40000-90000 horas
- Potencia: hasta 50W/celda



## Conceptos

# Conceptos





# Conceptos

El **Índice de reproducción cromática (IRC)**; Es la forma con la que se mide de la capacidad que una fuente luminosa para reproducir los colores de varios objetos; En comparación con una fuente de luz natural o ideal.

Tiene un rango en valores que van desde el 0 hasta el 100, siendo 100 el valor “máximo” correspondiente a la luz solar.



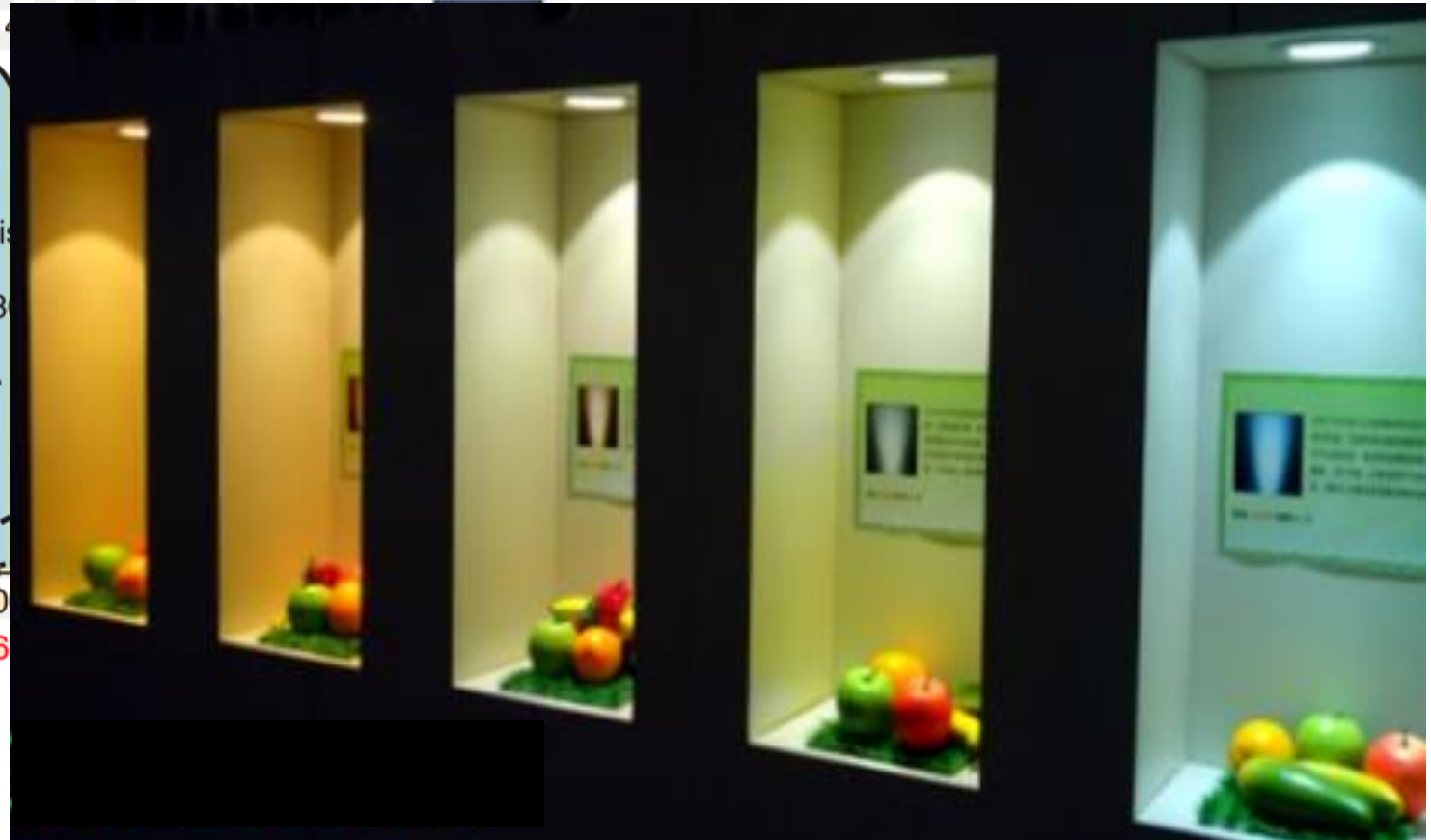
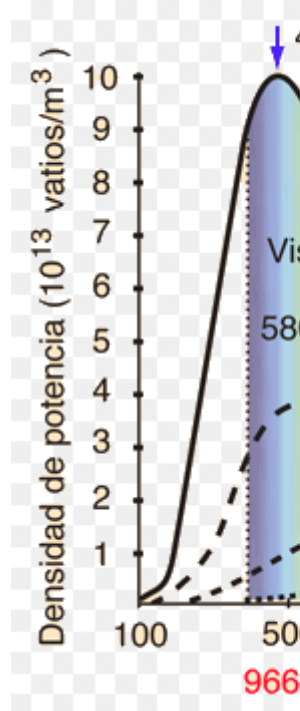
- Índice de reproducción cromática: entre 23 y 65%
- Índice de reproducción cromática: entre 60 y 90%
- Índice de reproducción cromática: entre 80 y 95%



# Conceptos

Ejemplo de Led

Escala Kelvin correspondiente



Temperatura de color

2700K

1,000K



# Conceptos

Como ve los colores el ojo humano?





# Conceptos

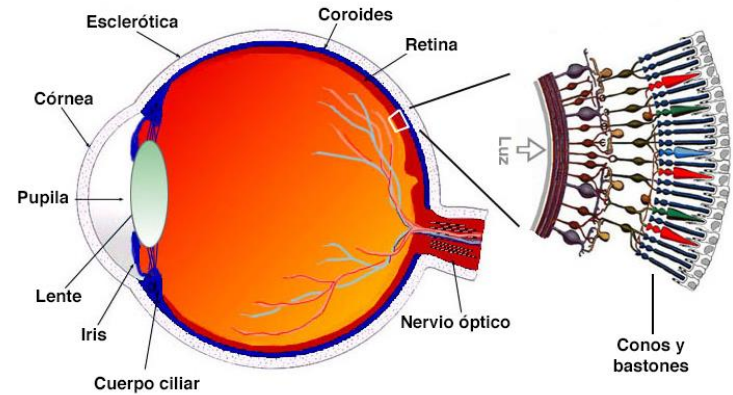
Como ve los colores el ojo humano?





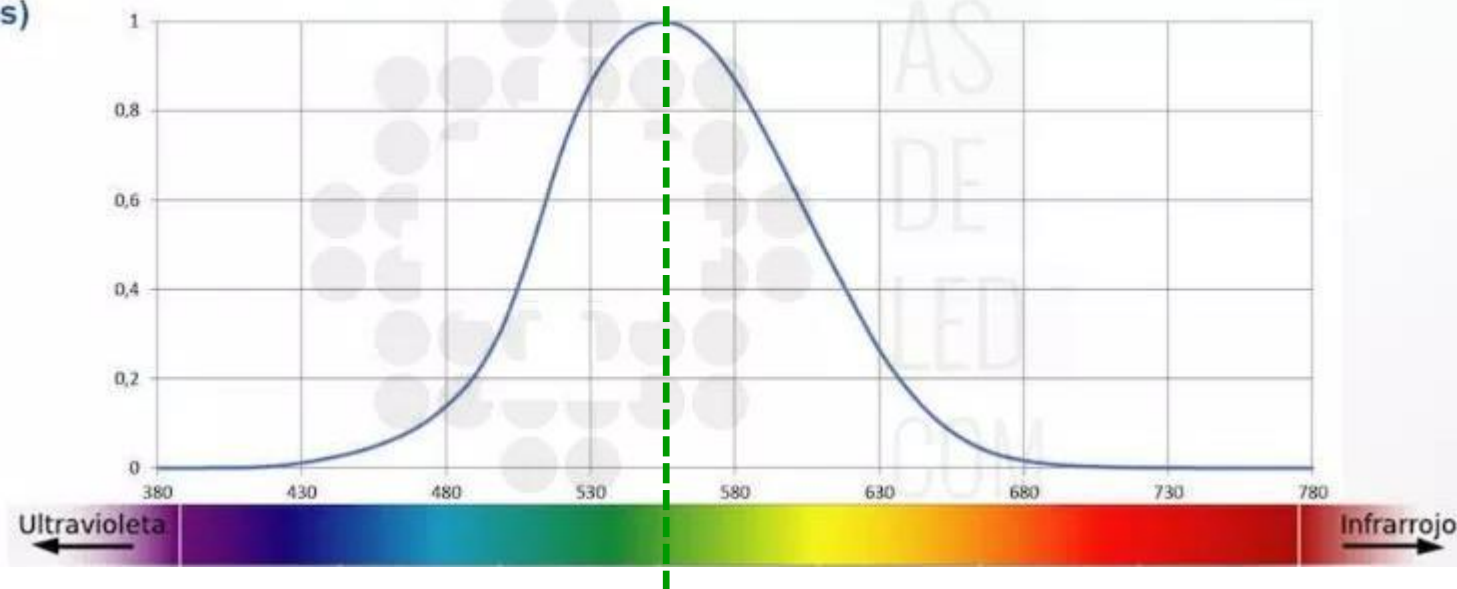
# Conceptos

Como ve los colores el ojo humano?



Función  $V(\lambda)$  para la visión fotópica

(Conos)

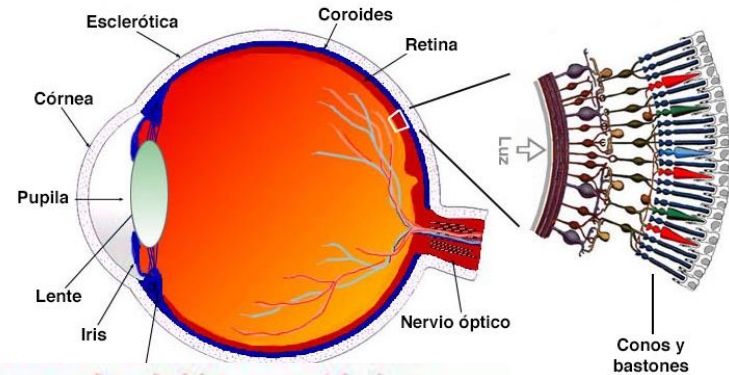


<https://www.iluminaciondeled.com/maquinas-vs-humanos-en-el-sector-de-la-iluminacion/>



# Conceptos

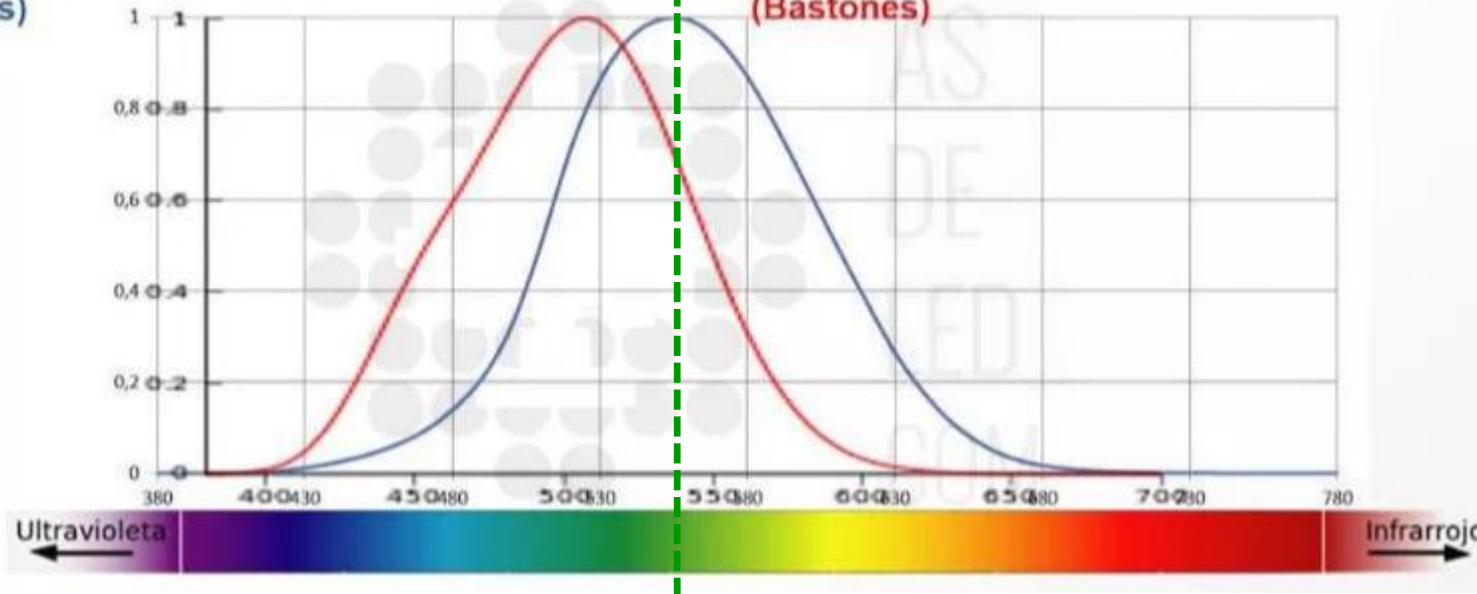
Como ve los colores el ojo humano?



Función  $V(\lambda)$  para la visión fotópica  
(Conos)

550 nm

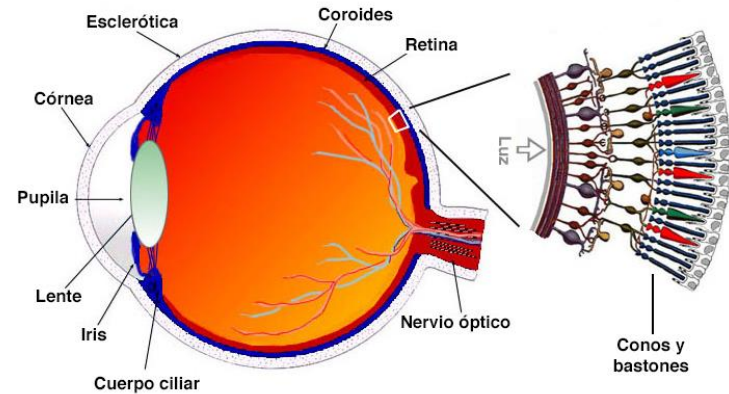
Función  $V'(\lambda')$  para la visión escotópica  
(Bastones)





# Conceptos

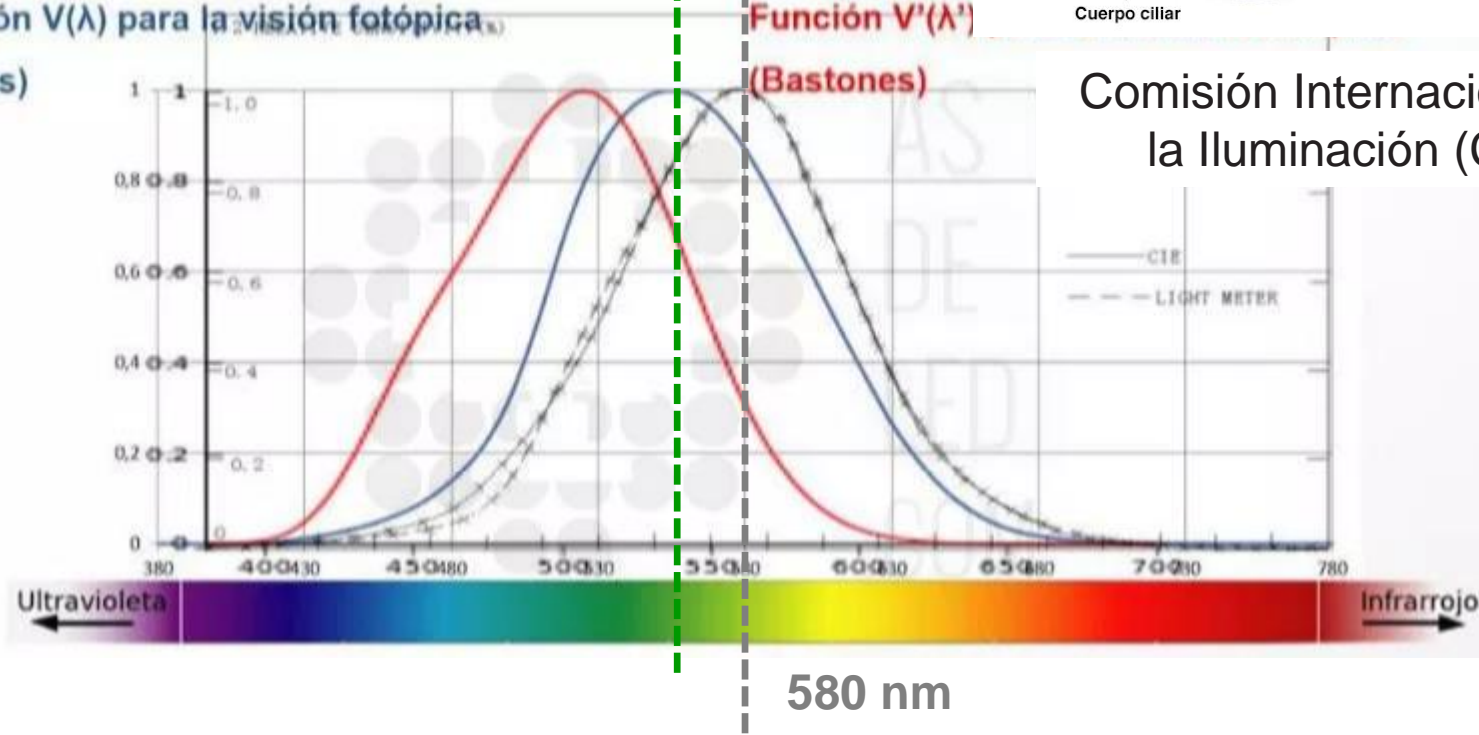
Como ve los colores el ojo humano?



Función  $V(\lambda)$  para la visión fotópica (Conos)

550 nm

Función  $V'(\lambda')$  (Bastones)

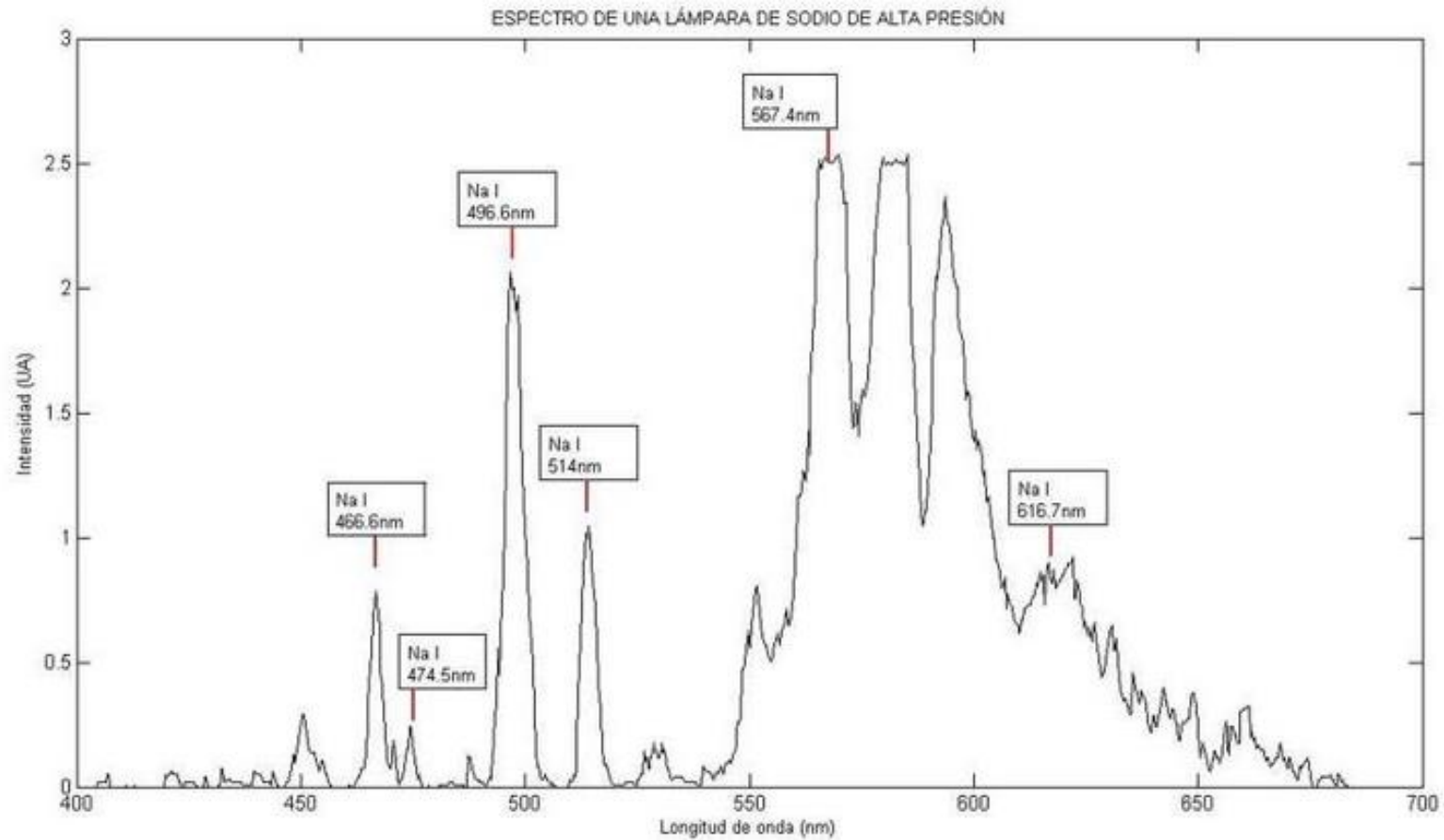


Comisión Internacional de la Iluminación (CIE)

580 nm



# Conceptos



Ormachea et. al., *Proyecto de un sistema LIDAR troposférico en Cochabamba, Bolivia*, Investigación & Desarrollo N°10, pp. 98–104, (2010)

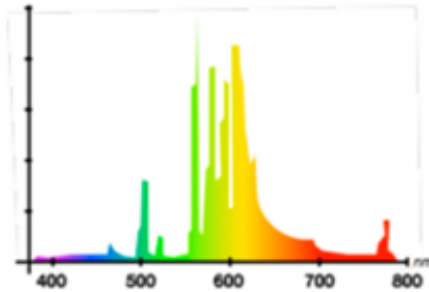




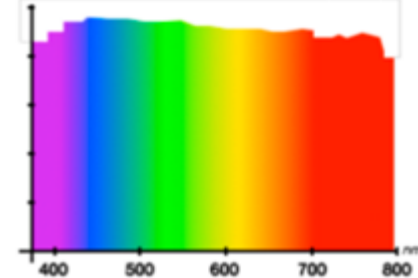
# Conceptos



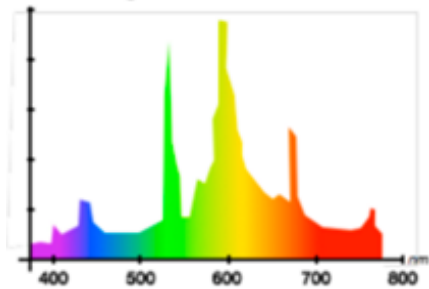
Vapor de sodio de alta presión



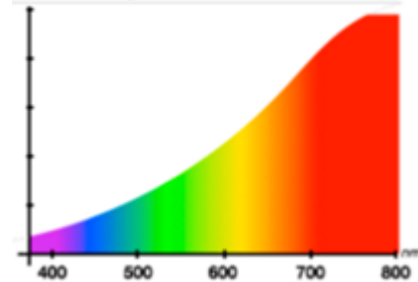
Luz Diurna Estándar (D65)



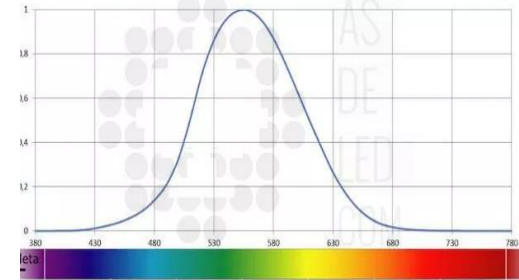
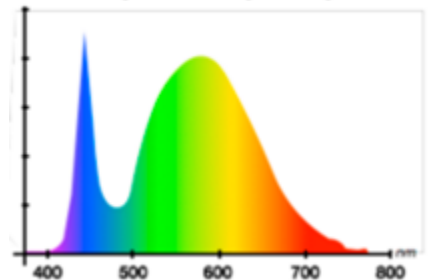
Halogenuros metálicos



Lámpara incandescente



Lámpara LED (5000K)



<https://asselum.com/la-curva-distribucion-espectral/>

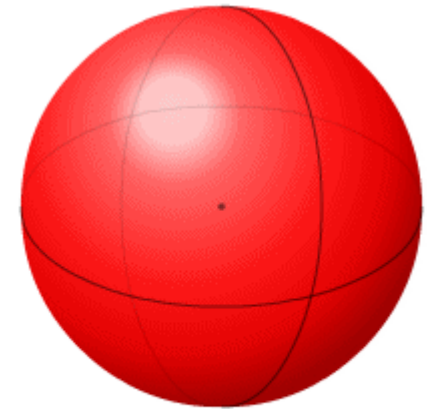
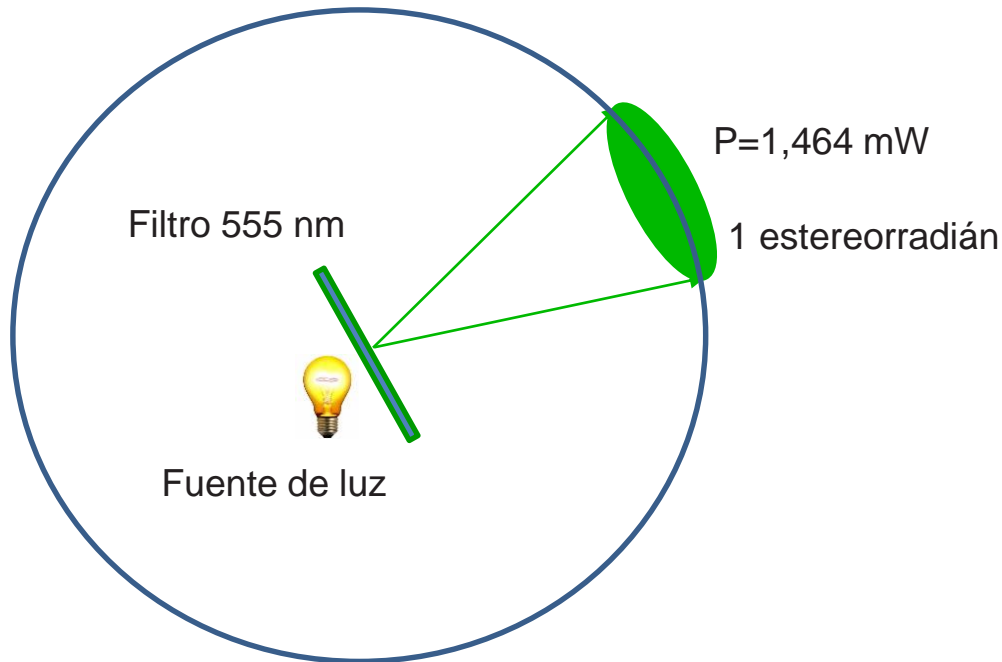


# Conceptos

La **candela cd** : Es una unidad básica del Sistema Internacional que mide la intensidad de una fuente luminosa.

La candela se define como:

Intensidad luminosa en una dirección dada de una fuente que emite radiación monocromática de **555 nm**, cuya potencia en esa dirección es de  $1/683 \text{ W}$  ( $1,464 \text{ mW}$ ) por estereorradián.



$$4\pi \text{ sr}$$

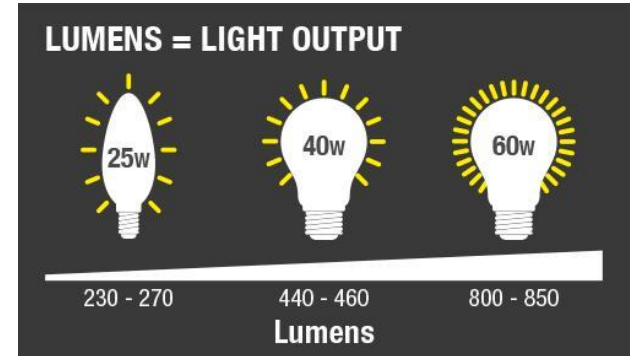


# Conceptos

**El lumen lm:** Es la unidad del Sistema Internacional de Medidas para medir el flujo luminoso, una medida de la potencia luminosa emitida por la fuente.

El lm se define como:

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



Flujo luminoso mínimo (lm)	Consumo de potencia eléctrica mínimo (Wattios)		
	Incandescente (no halógena)	Fluorescente compacta	Lámpara LED
200	25	3-5	3
450	40	9-11	5-8
800	60	13-15	8-12
1.100	75	18-20	10-16
1.600	100	24-28	14-17
2.400	150	30-52	24-30
3.100	200	49-75	32
4.000	300	75-100	40,5

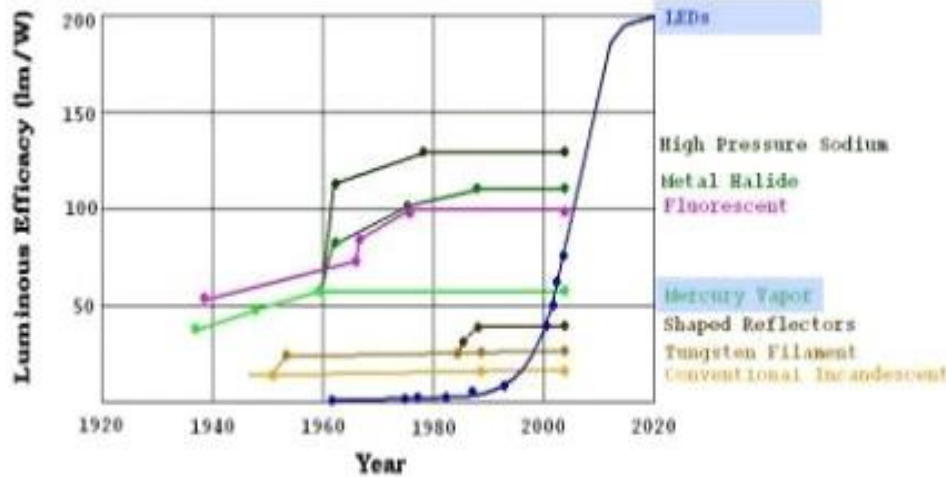


# Conceptos

El lux lx: es la unidad derivada de iluminación. Equivale a un lumen /m<sup>2</sup>.

El lm se define como:

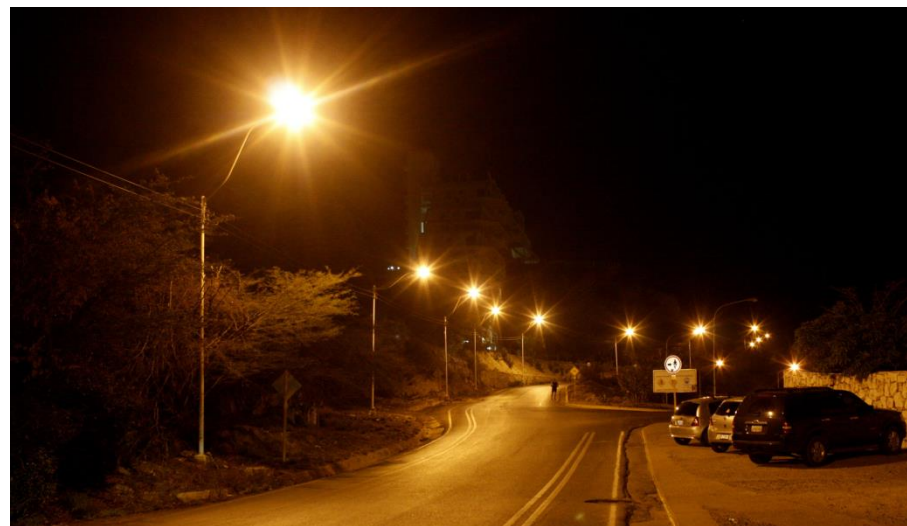
## Lumen Per Watt Efficiency



EFFICIENCY	Least			Most
BULB TYPE				
	INCANDESCENT	HALOGEN	CFL	LED
Power	40 W	25 W	9 W	8 W
Power	60 W	40 W	14 W	13 W
Power	75 W	50 W	19 W	17 W
Power	100 W	75 W	23 W	20 W
Lifespan	1000 hours	2000 hours	6-10 years	15-25 years
Efficiency	10%	15%	up to 75%	up to 80%



# Introducción



CARACTERISTICA	SODIO ALTA PRESION	LED
Eficacia Luminosa (lm/W)	50-150	70-160
Propiedad del Color	Regular	Muy Buena
Vida Útil (horas)	15,000-24,000	40,000-90,000
Equivalencia	120 W	50 W



# Introducción



**Y los  
automoviles?**

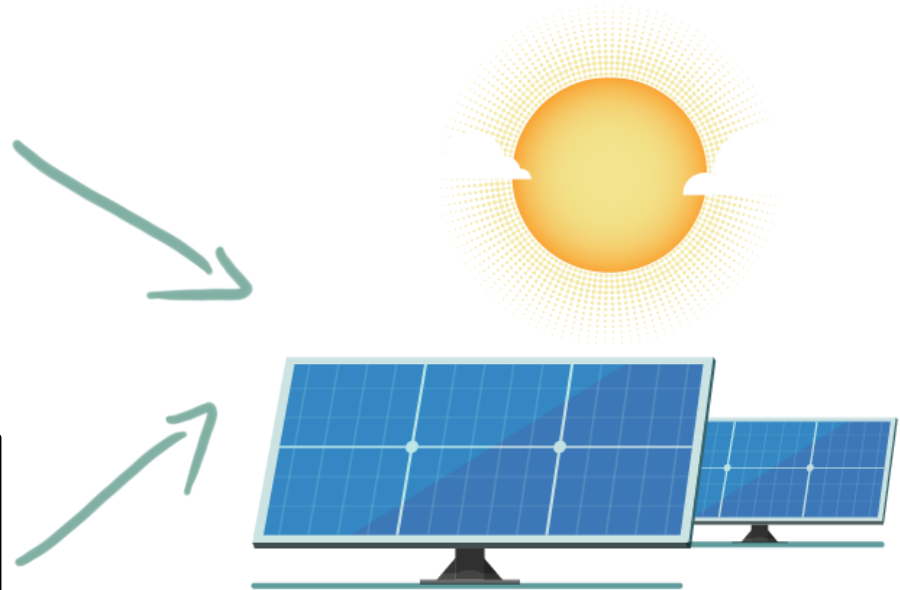




## Descripción del problema

19% consumo global de  
electricidad\*

Zonas sin acceso



\*Ref: ALZUBAIDI, Safaa and SOORI, Prashant Kumar. Study on Energy Efficient Street Lighting System Design. *IEEE International Power Engineering and Optimization Conference*. 2012. No. June, p. 291–295. DOI 10.1109/PEOCO.2012.6230877.



# Descripción del problema

Ineficiencia energética





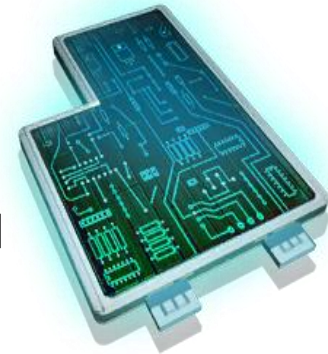
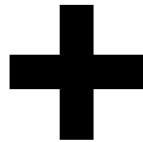


## Descripción del problema

Sistema de Iluminación Vial Inteligente



Ahorros energéticos  
68% - 82%\*



\*Ref: SHAHZAD, Gul, YANG, Heekwon, AHMAD, Arbab Waheed and LEE, Chankil. Energy-Efficient Intelligent Street Lighting System Using Traffic-Adaptive Control. *IEEE SENSORS JOURNAL*. 2016. Vol. 16, no. 13, p. 5397–5405. DOI 10.1109/JSEN.2016.2557345.



## Justificación



Mayor seguridad vial y ciudadana



Aprovechamiento recurso solar boliviano, sin emisiones CO2



Eficiencia y ahorro energético en iluminación vial

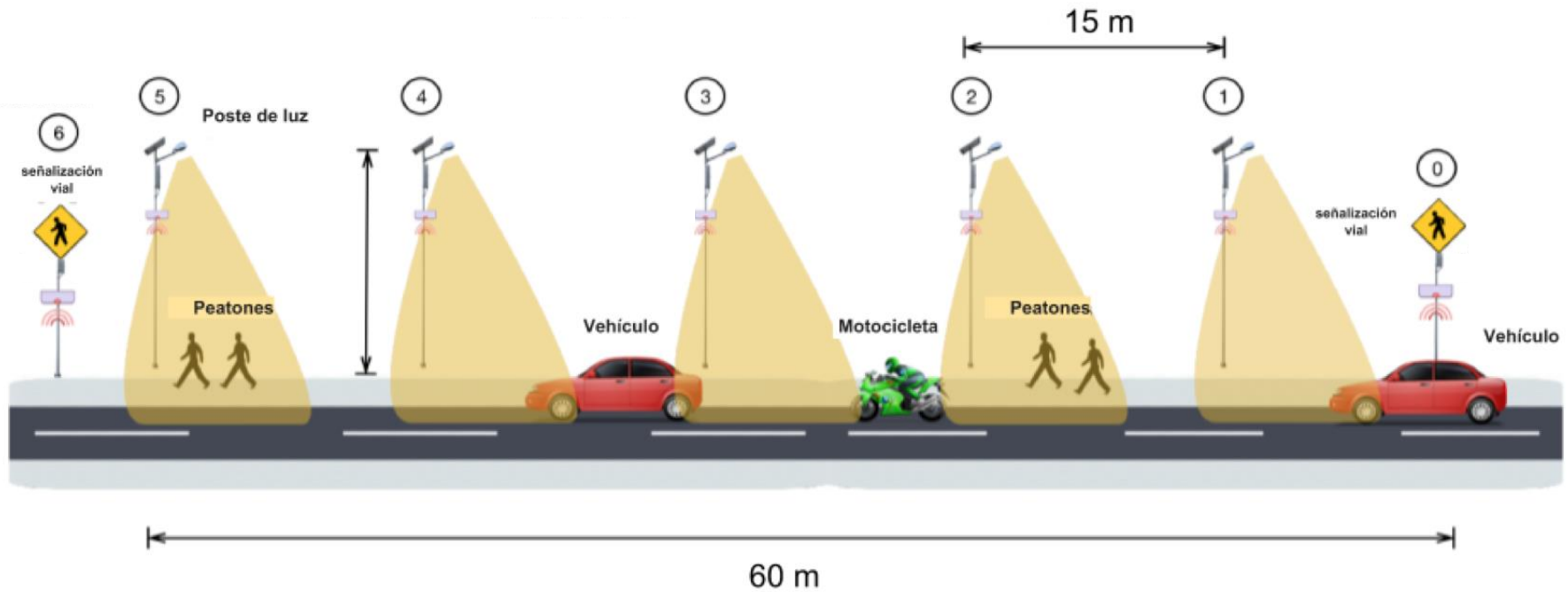


Innovación tecnológica implementando tarjetas embebidas con redes de sensores



# Vista General

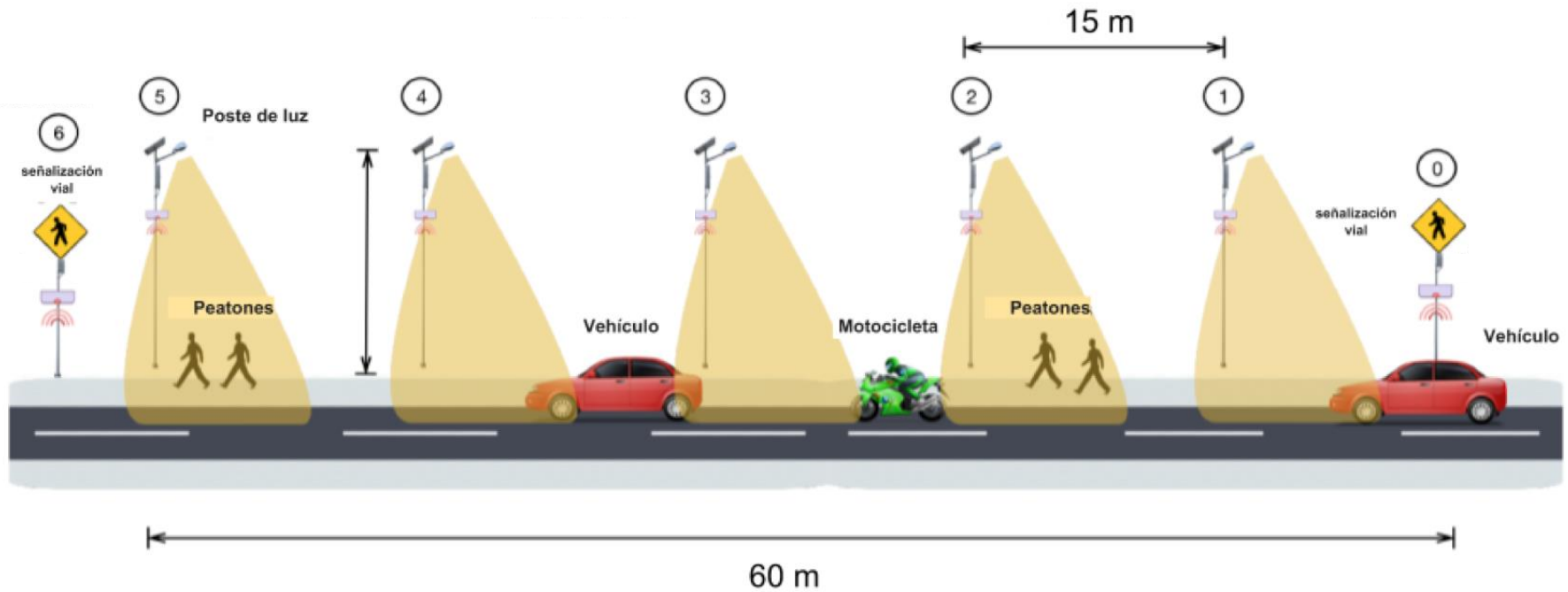
## Iluminación fotovoltaica





# Vista General

## Iluminación fotovoltaica





# Vista General

Iluminación LED

Sistema Fotovoltaico

Detección Inteligente





## Objetivos

# Objetivos



## Objetivo general

Desarrollo, diseño e implementación de un sistema de iluminación vial LED inteligente con eficiencia energética, basada en tecnología embebida que detecta y comunica de manera inalámbrica la presencia de personas y automóviles, permitiendo controlar el consumo energético generado por paneles fotovoltaicos.



## Objetivos específicos



Diseño e implementación de un sistema de iluminación vial LED



Diseño e implementación de un sistema solar fotovoltaico



Implementación de sistema piloto de iluminación vial inteligente





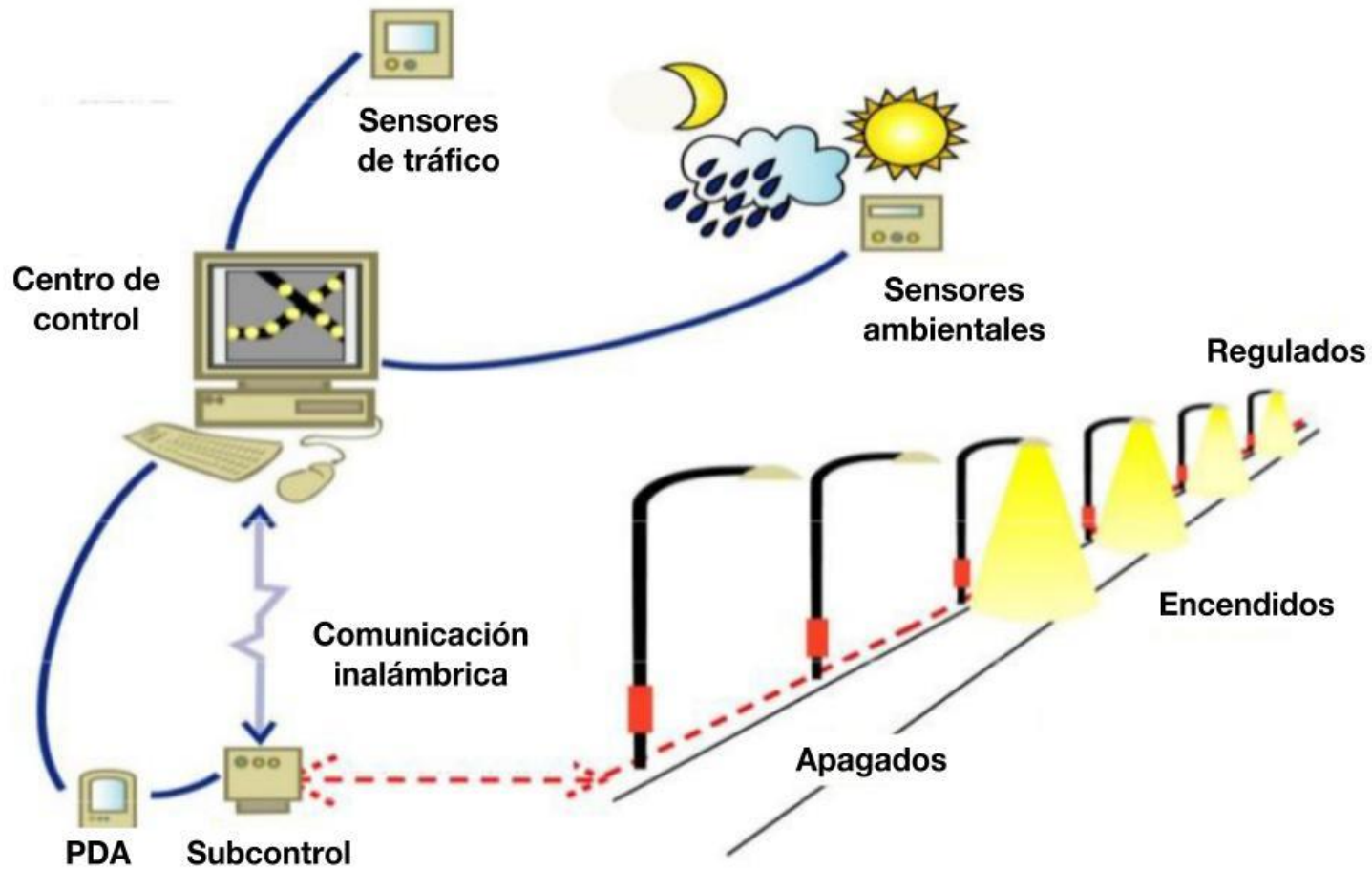
# Iluminación vial inteligente



\*Ref: Smart Street Light from EnGo PLANET. *PublicWorks Mag* [online]. 2017. Available from: [http://www.pwmag.com/roadways/traffic-control-lighting/smart-street-light-from-enggo-planet\\_o](http://www.pwmag.com/roadways/traffic-control-lighting/smart-street-light-from-enggo-planet_o)



# Iluminación vial inteligente

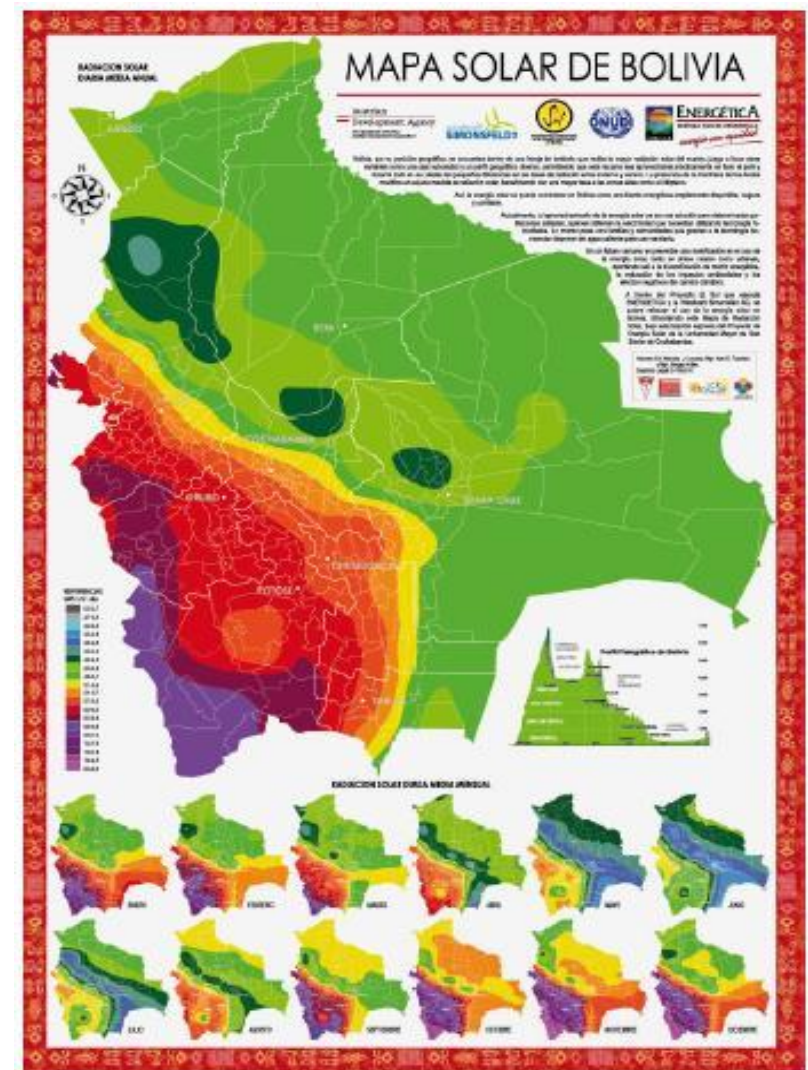
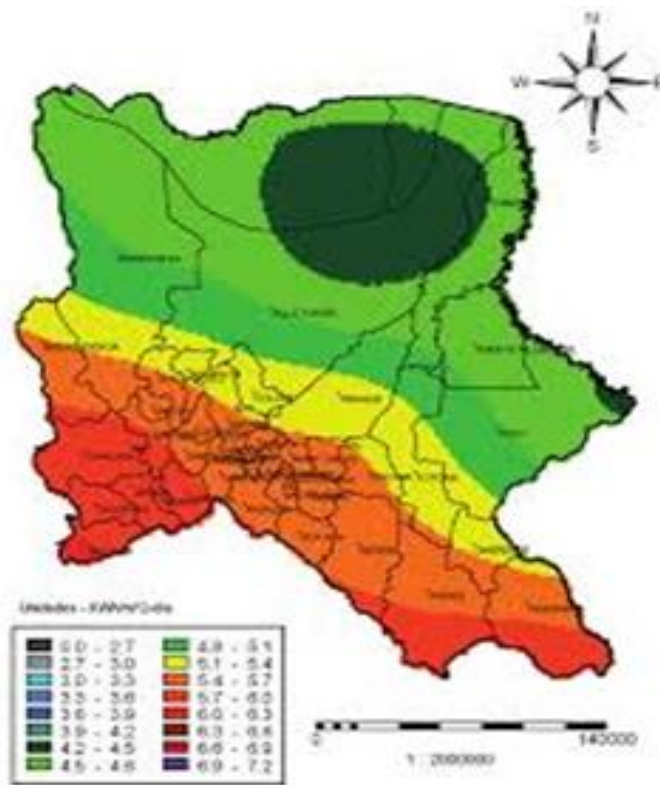


Ref: VARGAS, Carlos. *CONTROL INTELIGENTE DE ILUMINACIÓN FOTOVOLTAICA PARA AUTOPISTAS EN ECUADOR*. UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO, 2015.



# Recurso solar

Promedio: 600 W/m<sup>2</sup>



M. lucano, I. Fuentes, *Evaluación del potencial de radiación solar global en el departamento de Cochabamba utilizando modelos de sistemas de información geográfica e imágenes satelitales*, Revista Boliviana de Física, 16, pp.13-21, 2010.



## Iluminación LED

# Iluminación LED



# Necesidades y especificaciones



Norma boliviana alumbrado público NB 1412001 (IBNORCA)



Bajo consumo eléctrico → iluminación requerida



Atenuación de la luz



Carga óptima integrable energías renovables

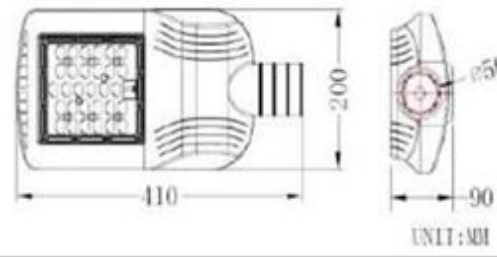
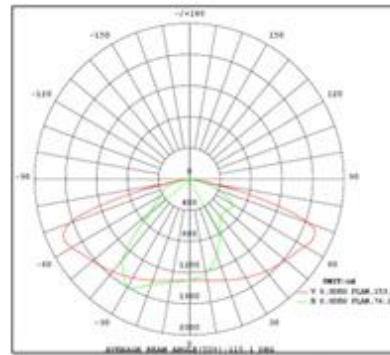


Viabilidad económica



# Luminaria LED seleccionada

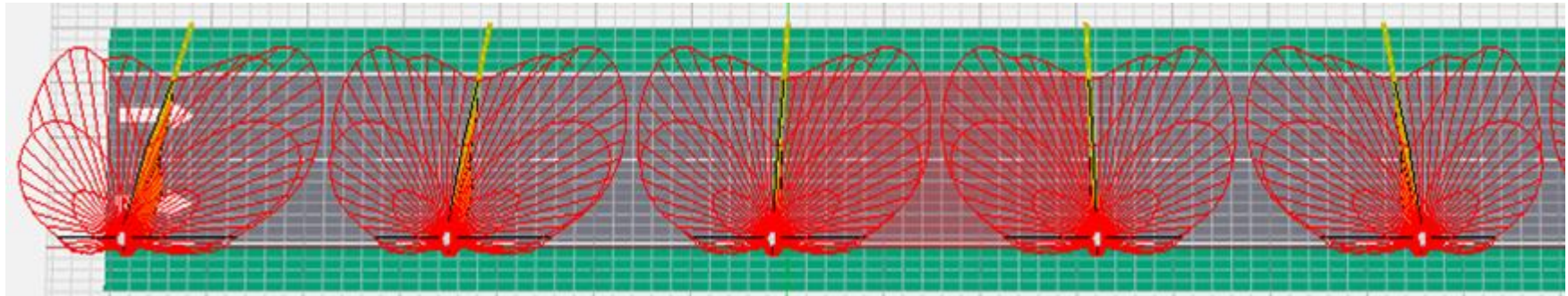
## LED Leyond - 50W con Dimmer





# Diseño del sistema de iluminación

- Simulación RELUX



## Cada luminaria LED:

Potencia = 50 [W]

Flujo Luminoso = 8100 [lm]

CCT: 5500K – 6000K

## Resultados simulación:

Distancia entre postes = 15 m

Altura = 7 m

Clase iluminación M3 (10 lux min)\*

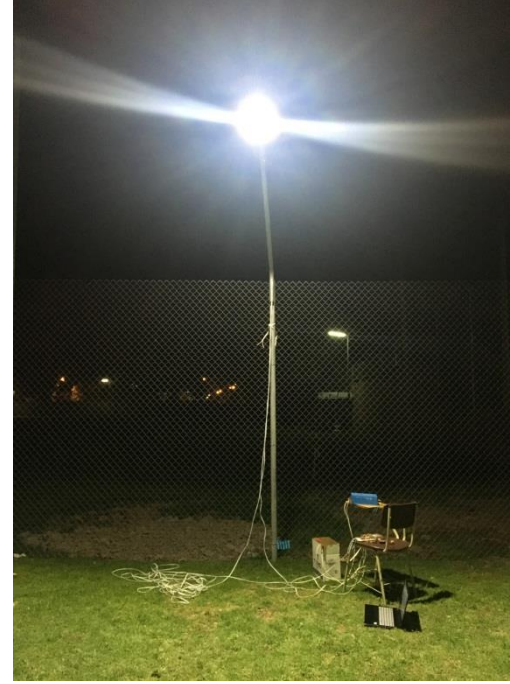
\*Ref: Norma boliviana alumbrado público NB 1412001 (IBNORCA)



# Pruebas de iluminación



**DIMMER 10%**  
**37 LUX**



**DIMMER 100%**  
**329 LUX**





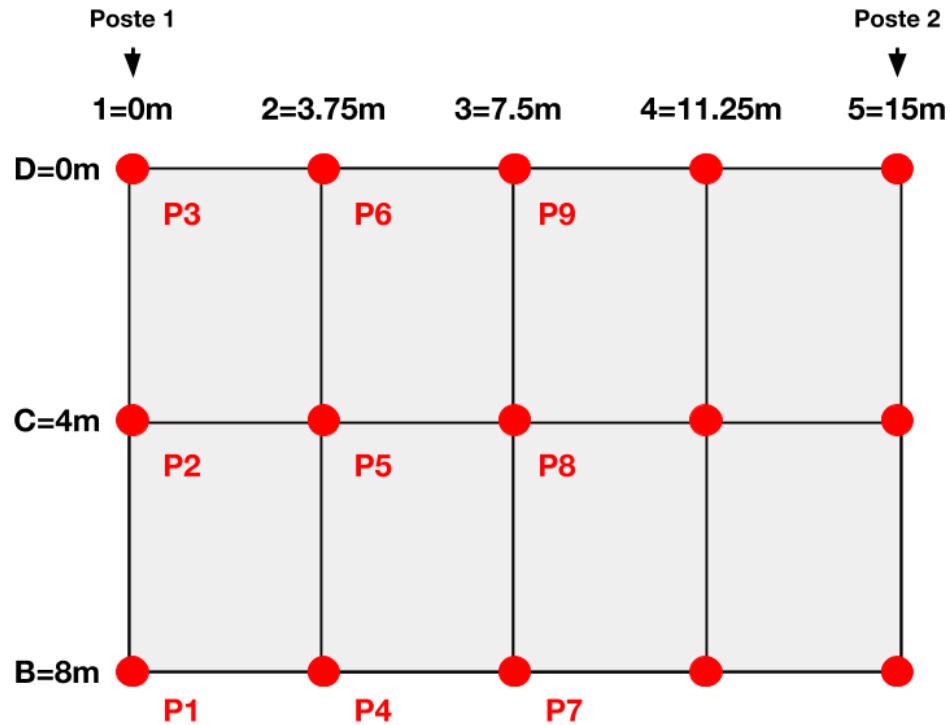
# Pruebas de iluminación





# Pruebas de iluminación

## Método de los nueve puntos

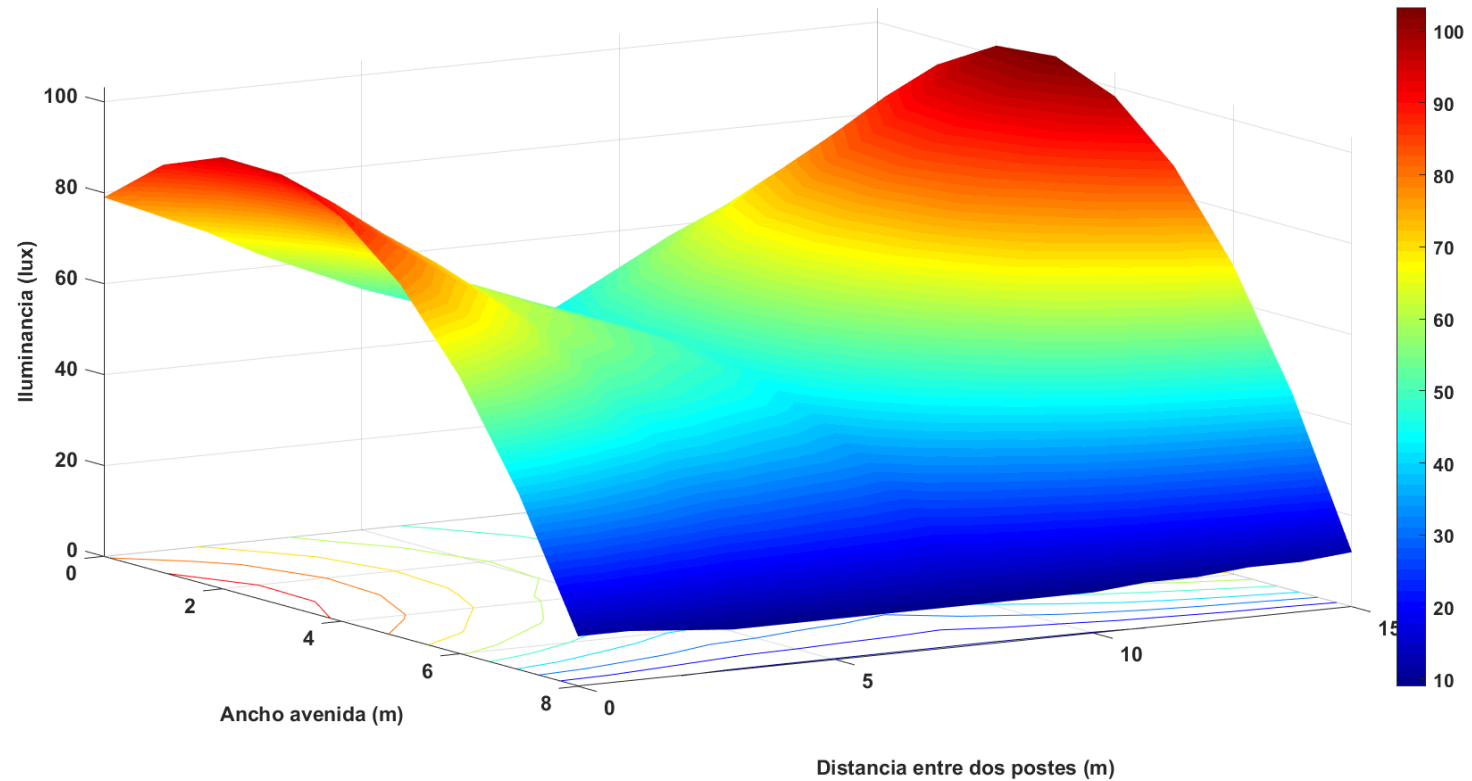


Luxómetro 401025 - EXTECH Instruments  
(Fc/lux)



# Pruebas de iluminación

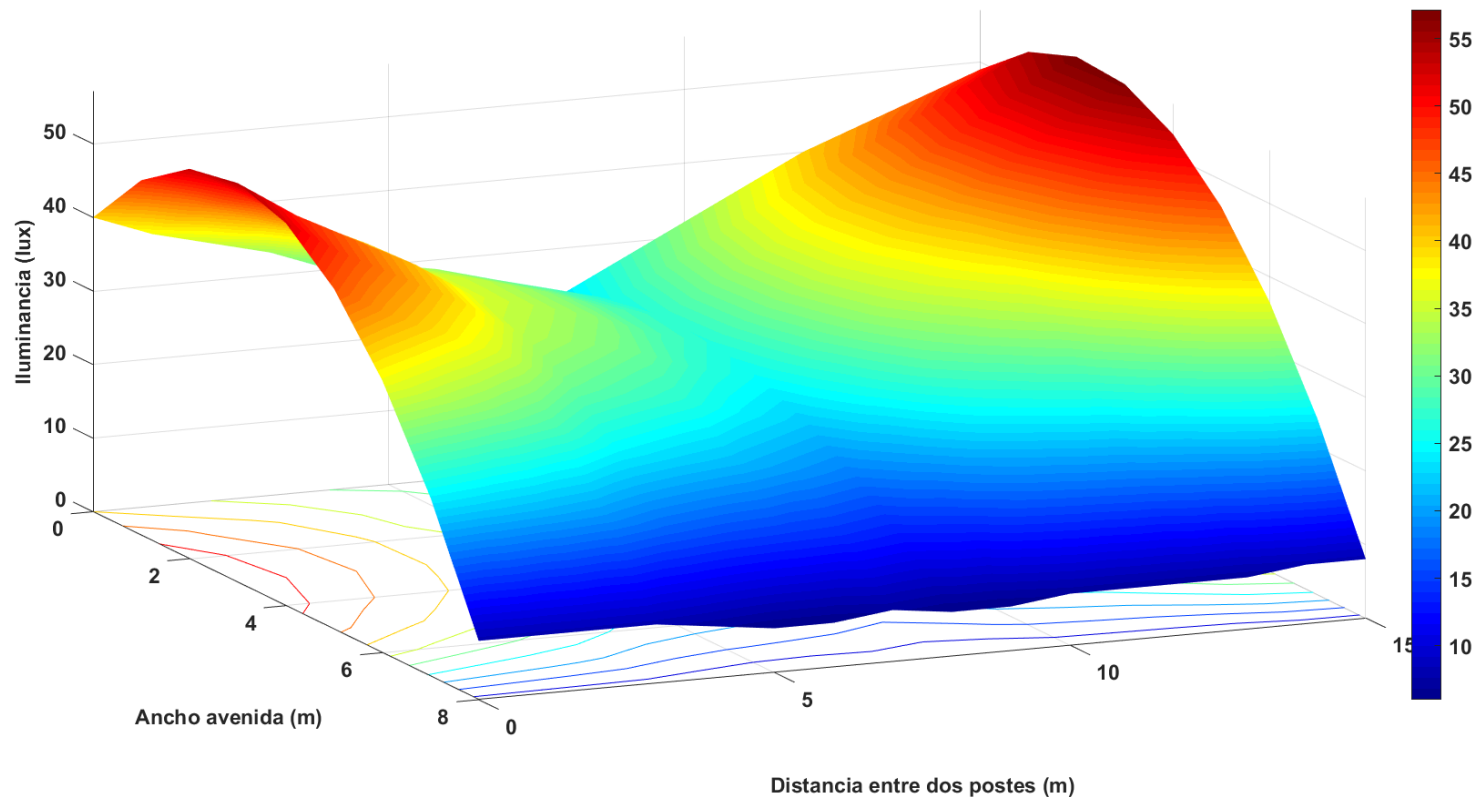
## Niveles de Iluminancia entre dos postes - 100% iluminación





# Pruebas de iluminación

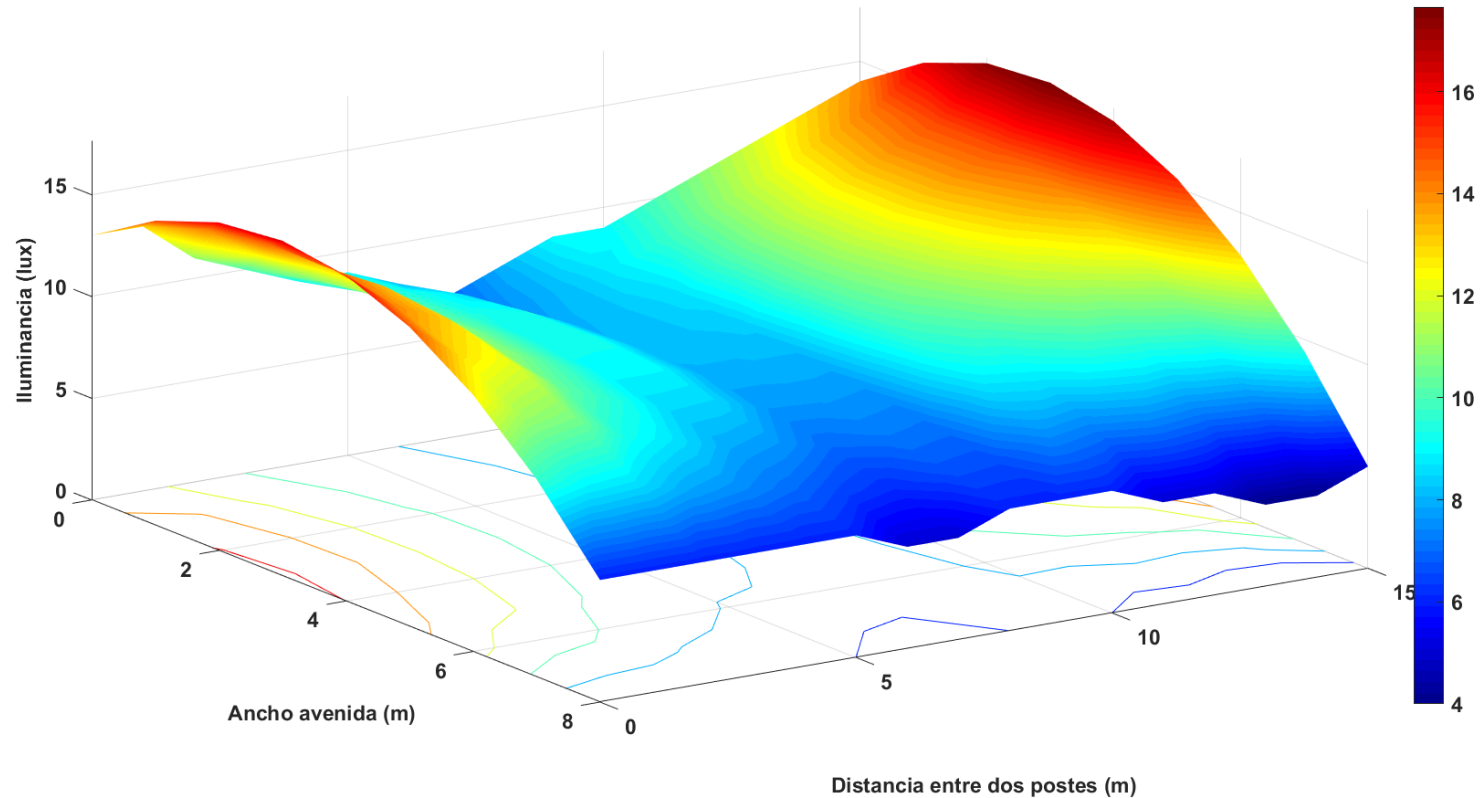
Niveles de Iluminancia entre dos postes - 50% iluminación





# Pruebas de iluminación

Niveles de Iluminancia entre dos postes - 10% iluminación

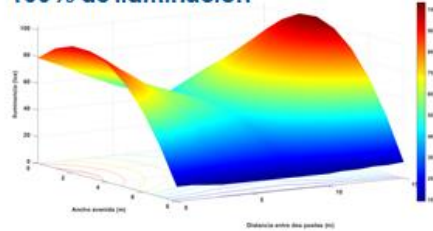




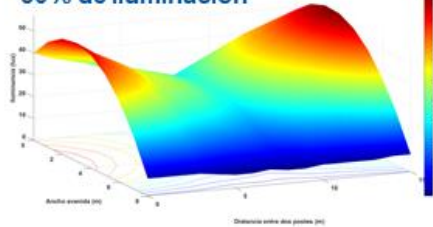
# Pruebas de iluminación

Iluminancia media, mínima y máxima en Lux

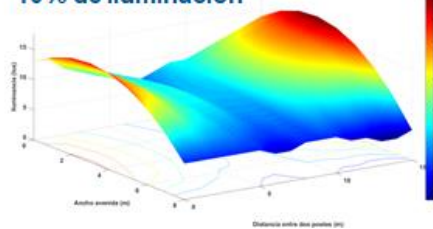
100% de iluminación



50% de iluminación



10% de iluminación



Atenuación	Media	Mínima	Máxima
0%	52	9	97
50%	30	7	55
90%	10	6	16

Norma Boliviana Alumbrado Publico 1412001

Clase de iluminación	Todas las vías	Todas las vías	
	Luminancia L(cd/m <sup>2</sup> )	Iluminancia media E(lux) Mínimo mantenido	
	Mínimo mantenido	Calzada Clara	Calzada Oscura
M1	2	15 - 20	30 - 50
M2	1,5	10 - 20	20 - 30
M3	1	5 - 10	10 - 20
M4	0,75	2 - 5	5 - 10
M5	0,5	1 - 3	2 - 6



## Sistema Fotovoltaico

# Sistema Fotovoltaico



# Necesidades y especificaciones



Sistema aislado posible integración a la red



Autonomía de una noche a 60% de potencia



Demanda de la carga 420 Wh/día



Disponibilidad en el mercado



Viabilidad económica





# Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

<b>Consumo eléctrico diario</b>	<b>420 Wh/día</b>	
<b>Potencia pico módulos calculada</b>	<b>115 Wp</b>	
<b>Capacidad baterías calculada</b>	<b>Plomo ácido</b>	<b>70 Ah</b>
	<b>Litio</b>	<b>35 Ah</b>
<b>Controlador de carga (Corriente mínima)</b>	<b>7,15 A</b>	
<b>Potencia Inversor de Voltaje (Potencia mínima)</b>	<b>110 W</b>	



# Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

Componentes disponibles en el mercado nacional

Componente	Capacidad	Marca
Panel Solar	100 Wp	LORENTZ LC-100-M36
Baterías	70 Ah - 12V	TOYO SOLAR - Plomo Acido
	35 Ah - 12V	RELION RB35 - Litio
Inversor	375 VA - 12V	PHOENIX INVERTER
Controlador de carga	8A	PHOCOS CML 8



# Pruebas sistema fotovoltaico

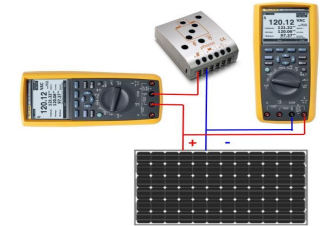
- “Fluke 289 True-RMS Data Logging Multimeter”



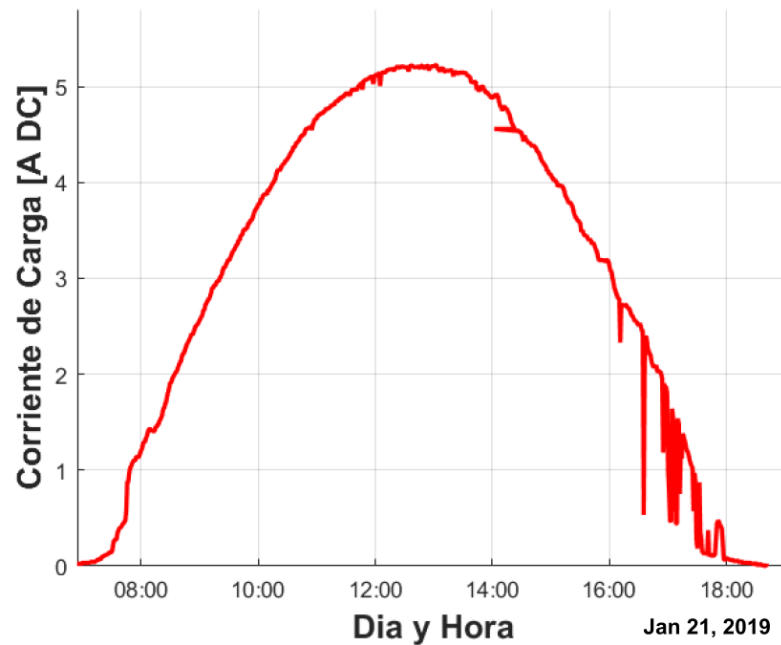


# Pruebas panel fotovoltaico

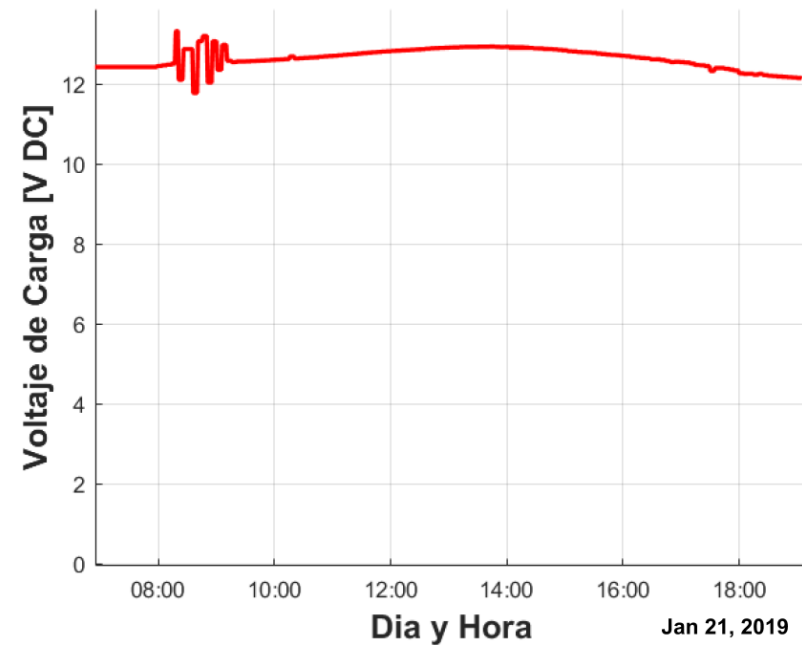
Energía real generada por el panel fotovoltaico



Corriente de Generación



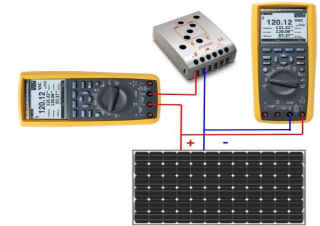
Voltaje de Generación



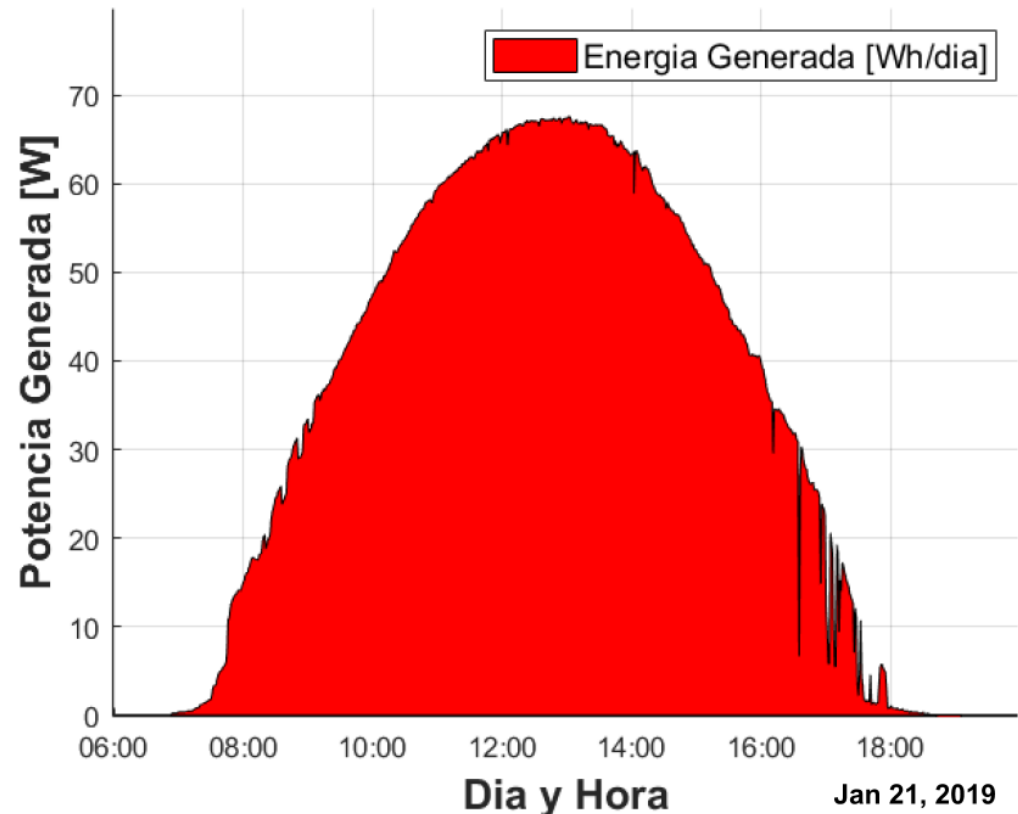


# Pruebas panel fotovoltaico

Energía real generada por el panel fotovoltaico



- Energía Real Generada:  
**457,1 Wh/día**
- Energía Teórica  
Generada: 570,0 Wh/día
- Rendimiento: 80%





# Pruebas batería de plomo ácido

Energía real almacenada por la batería

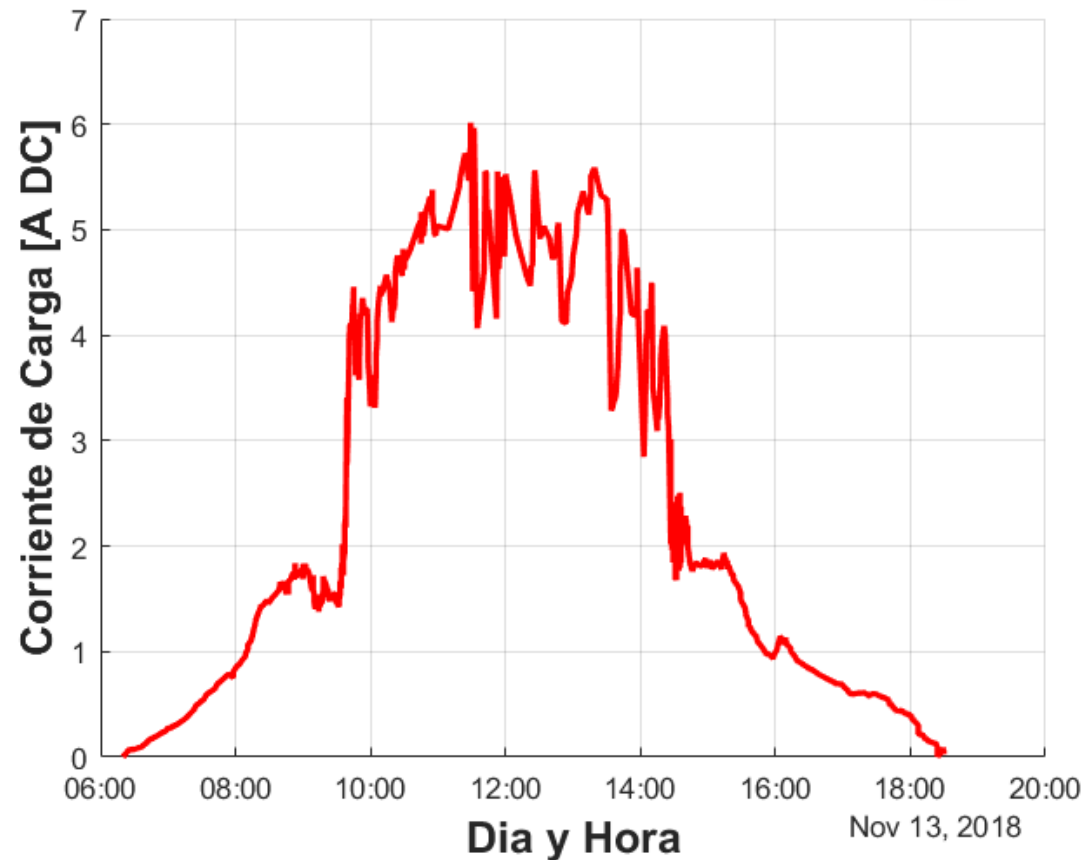


## Curva de Carga Batería

- Energía Almacenada:  
**359,8 Wh/día**
- Energía excedente  
(generada por el panel  
y no almacenada):  
97,3 Wh/día

→ Utilizar energía excedente

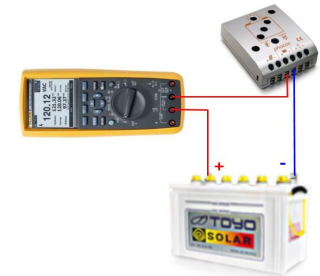
→ Redimensionar





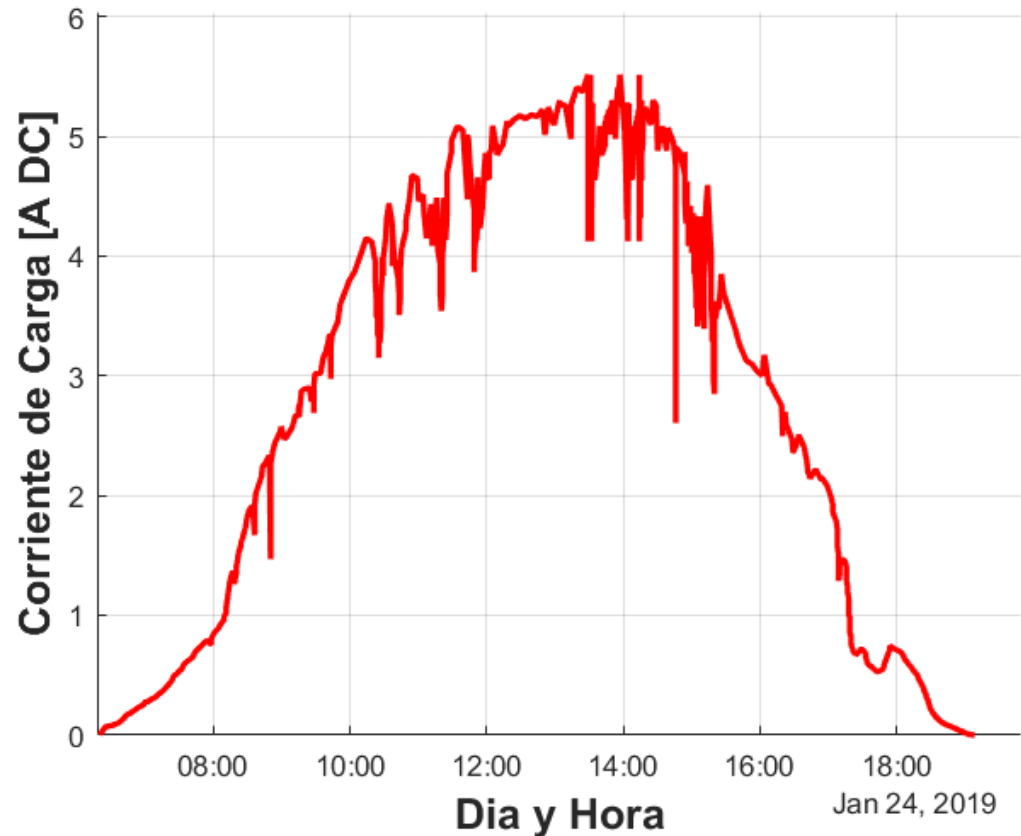
# Pruebas batería de ion de Li

Energía real almacenada por la batería de ion de Li



## Curva de Carga Batería

- Energía Almacenada:  
438,7 Wh/día
- Energía excedente:  
21,1 Wh/día





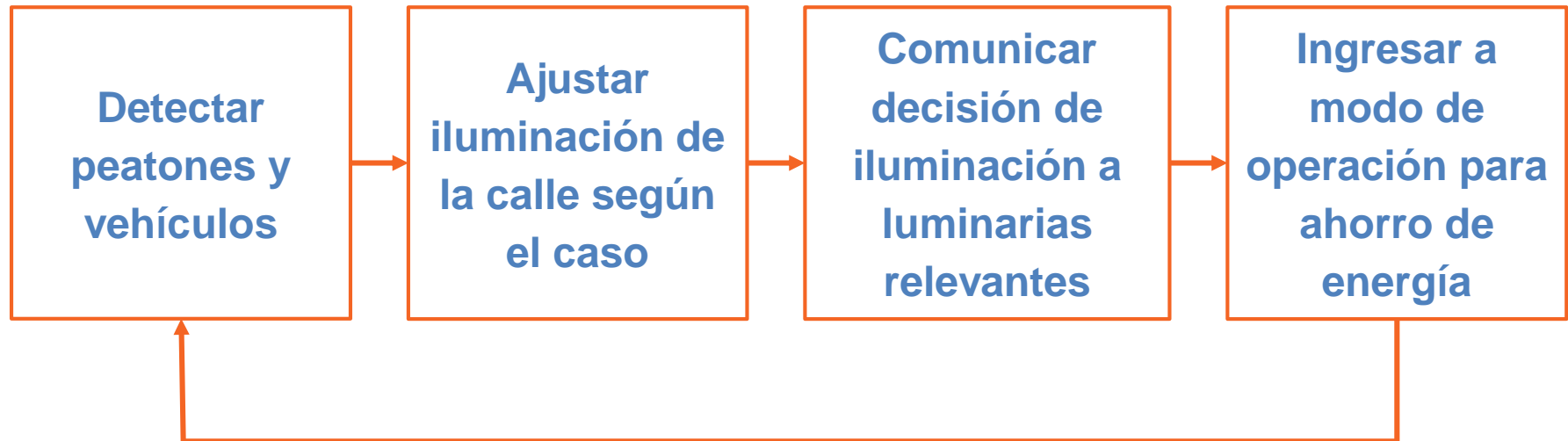
## DetECCIÓN inteligente

# DETECCIÓN INTELIGENTE





# Atenuación de la luz con Adaptación al Tráfico

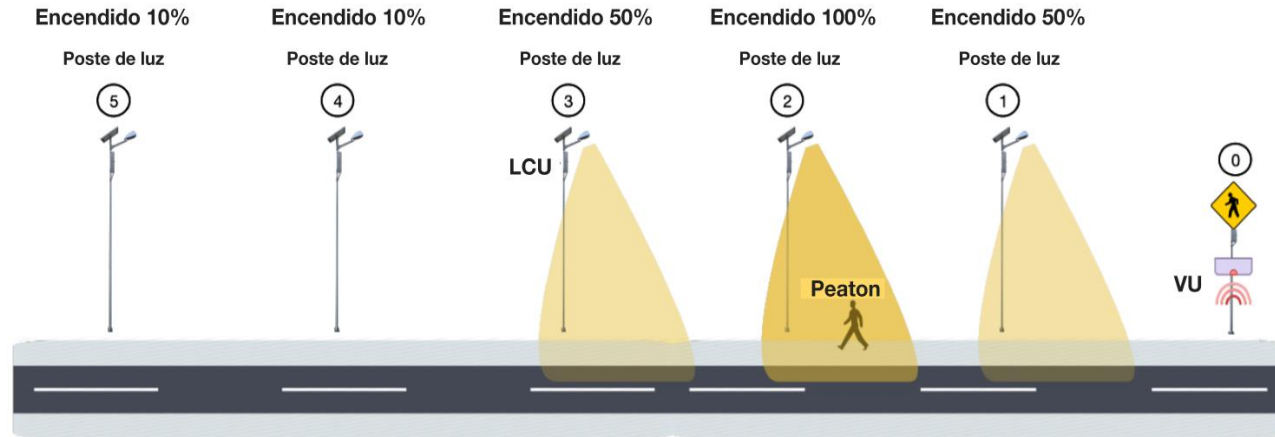




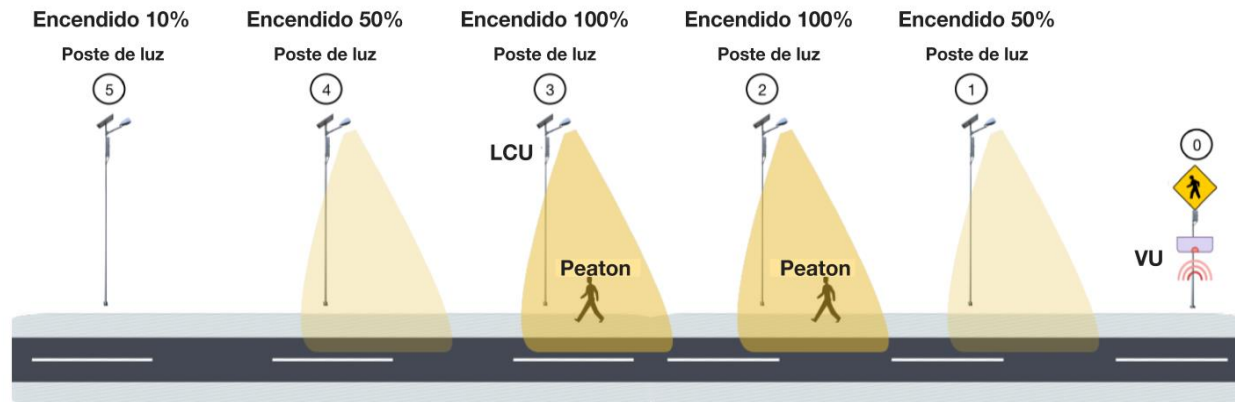
# Atenuación de la luz con Adaptación al Tráfico

VU-unidad de control de vehículos  
LCU-unidad de control de luminarias

Caso 1



Caso 2

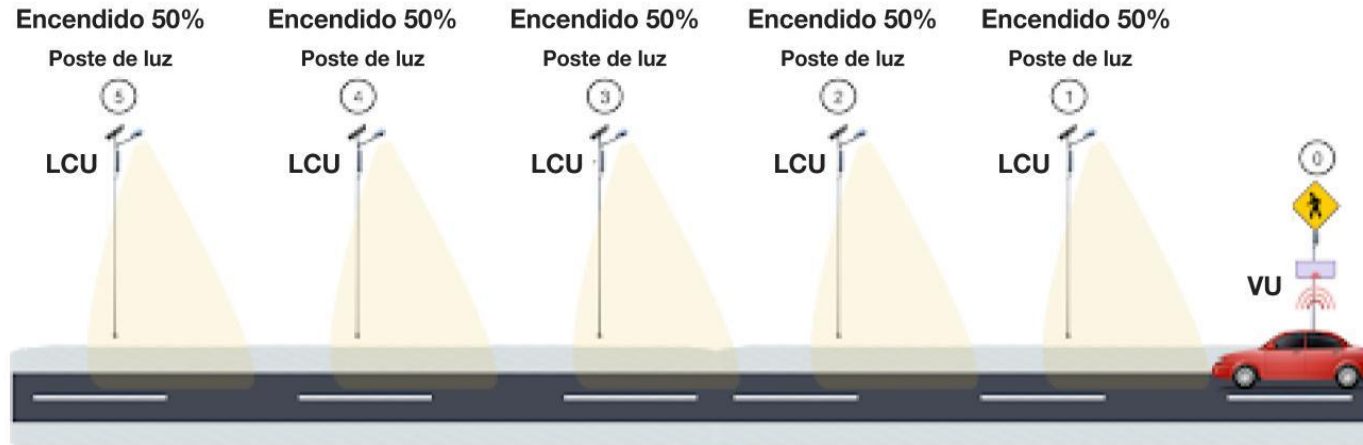




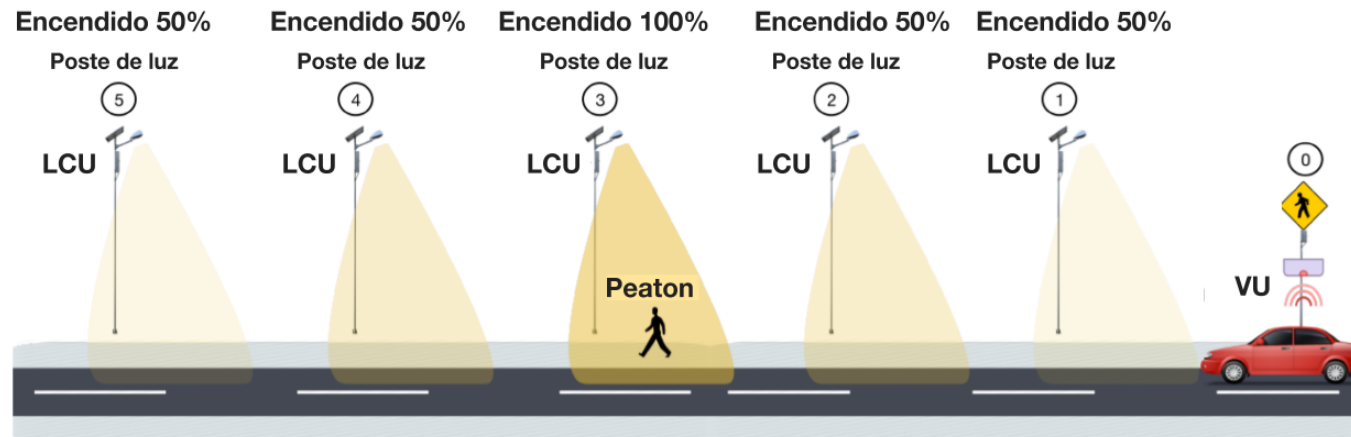
# Atenuación de la luz con Adaptación al Tráfico

VU-unidad de control de vehículos  
LCU-unidad de control de luminarias

Caso 3



Caso 4



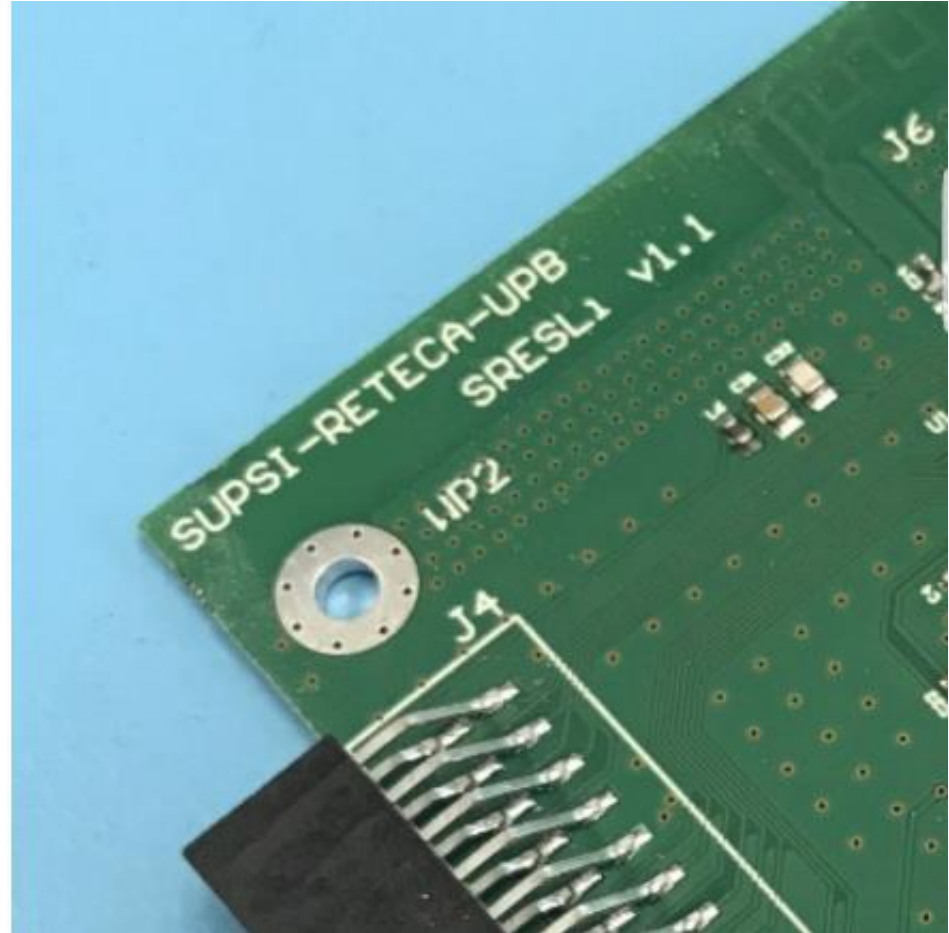


# Sistema Embebido Control Adaptativo

- Requerimiento de hardware
- Requerimiento de software



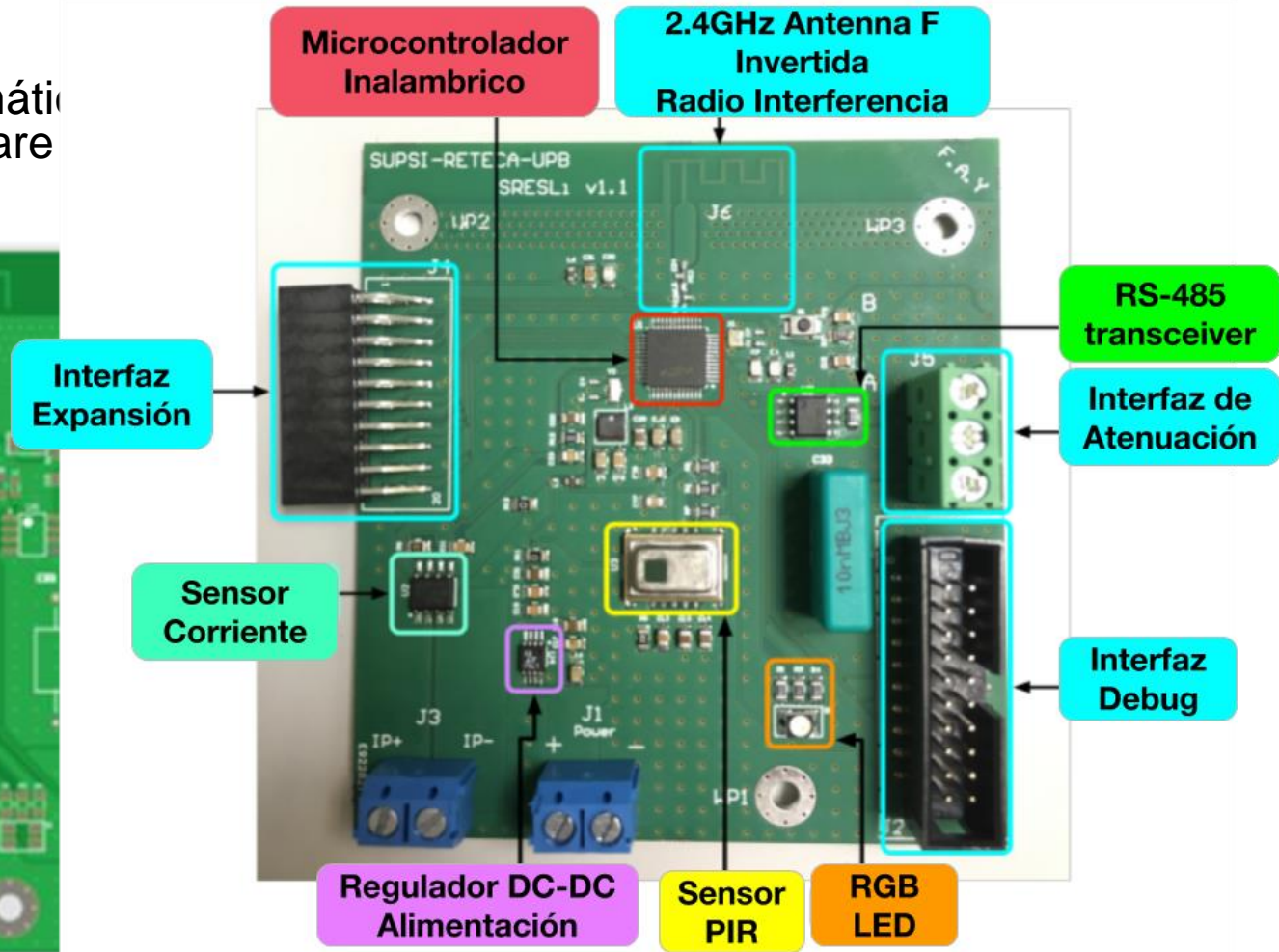
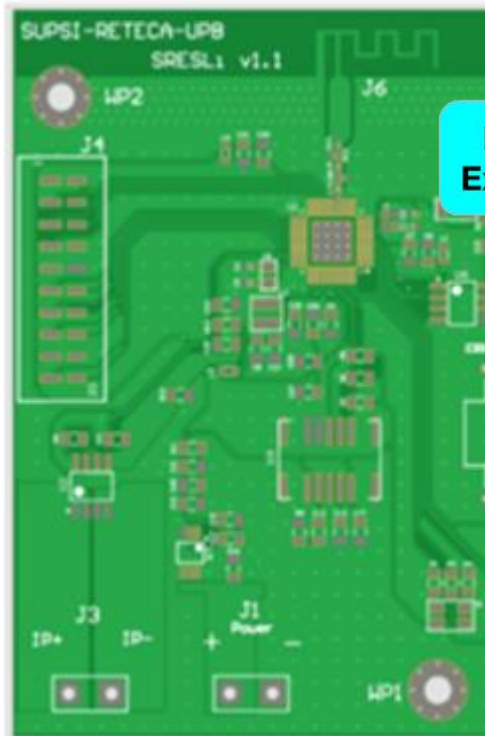
- Tarjetas desarrolladas llamadas "SRESLI"





# Sistema Embebido Control Adaptativo

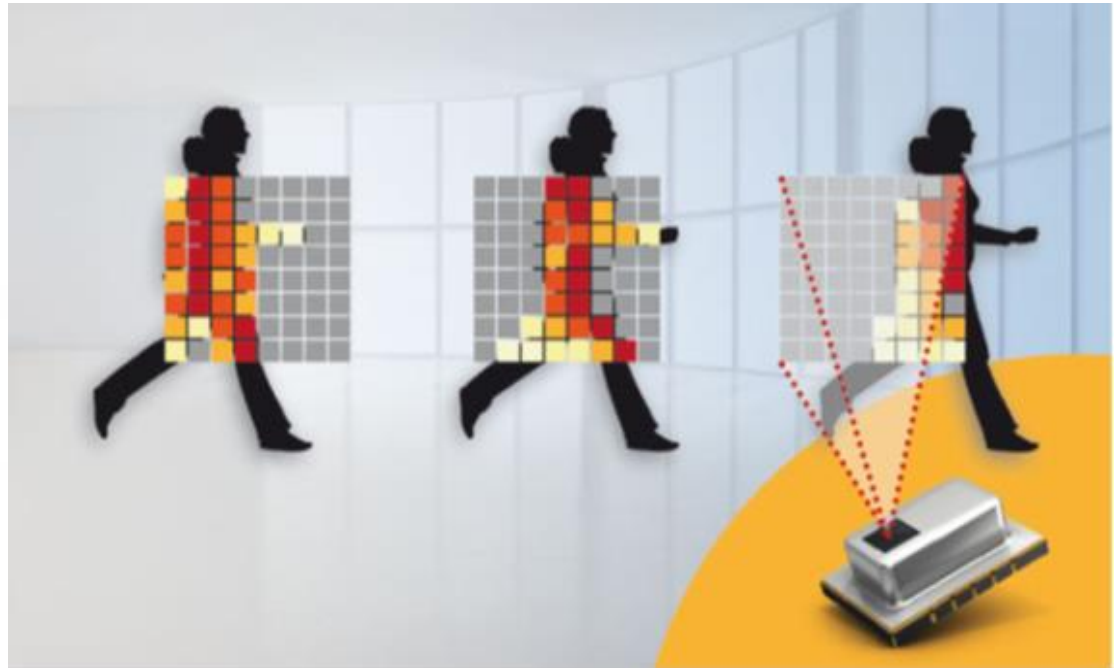
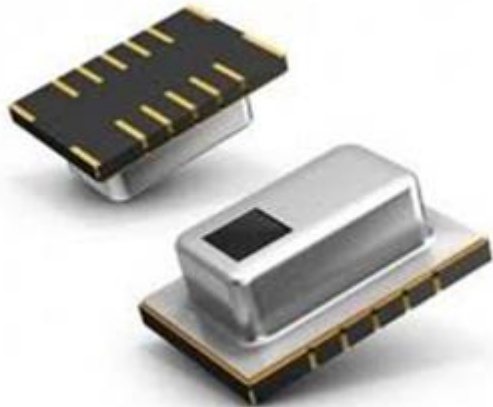
- Diseño del esquemático circuitos con software





# Sistema Embebido Control Adaptativo

Sensor de Arreglo PIR  
Grid-EYE (AMG8833)

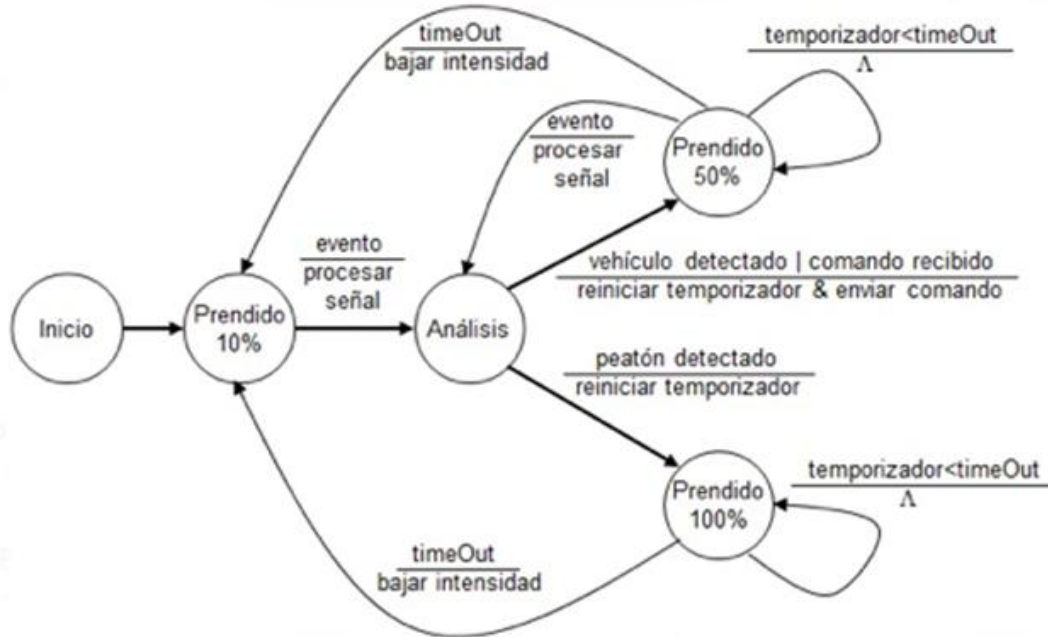




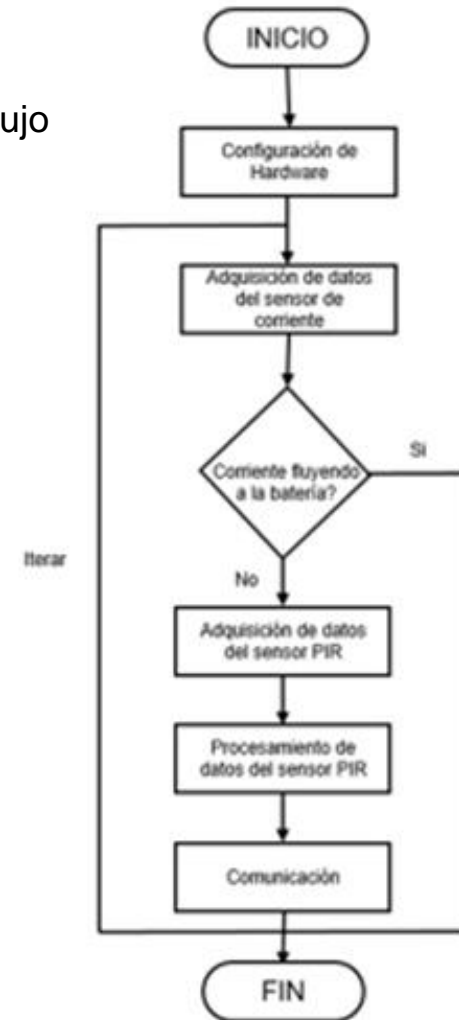
# Sistema Embebido Control Adaptativo

- Requerimiento de software

Diagrama de flujo



Esquema de funcionamiento lógico





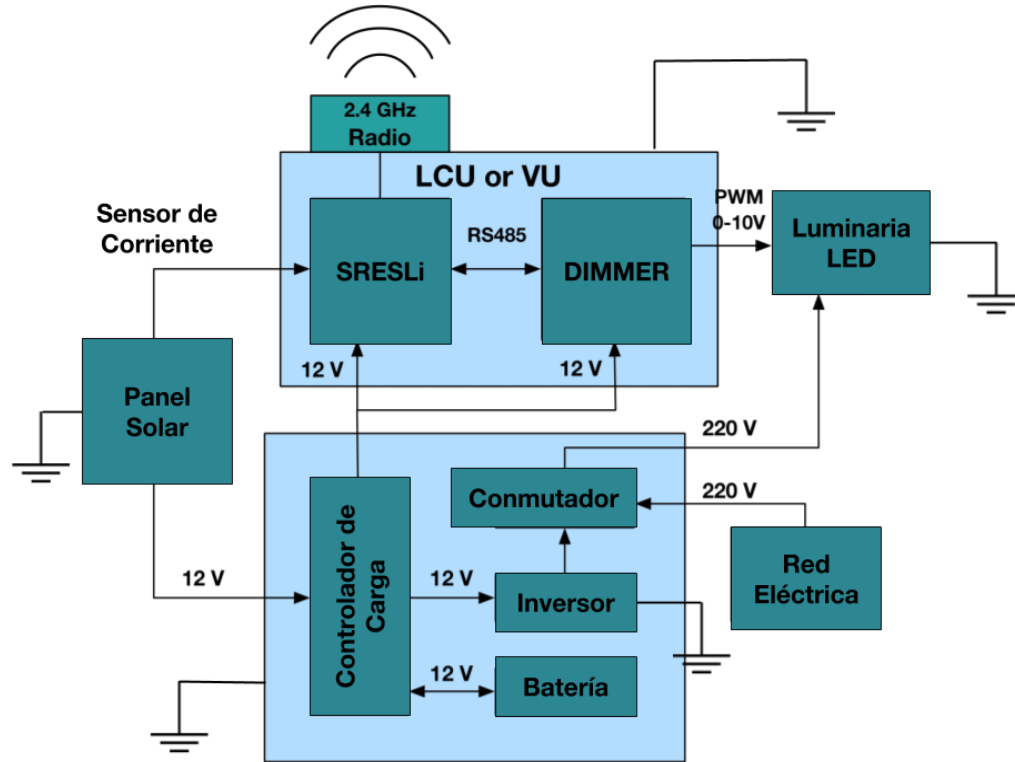
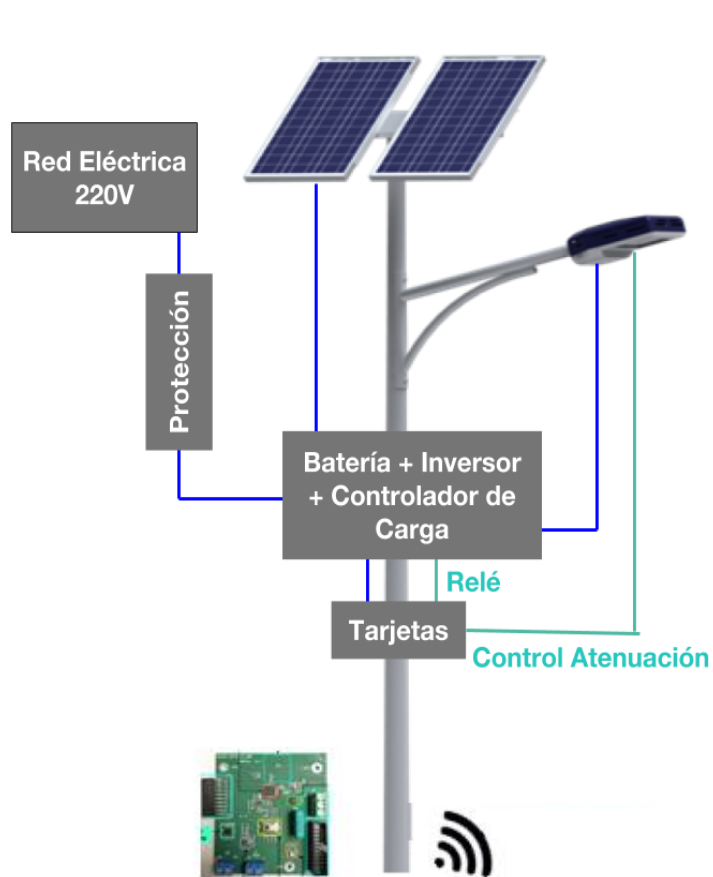
## Sistema Piloto

# Sistema Piloto



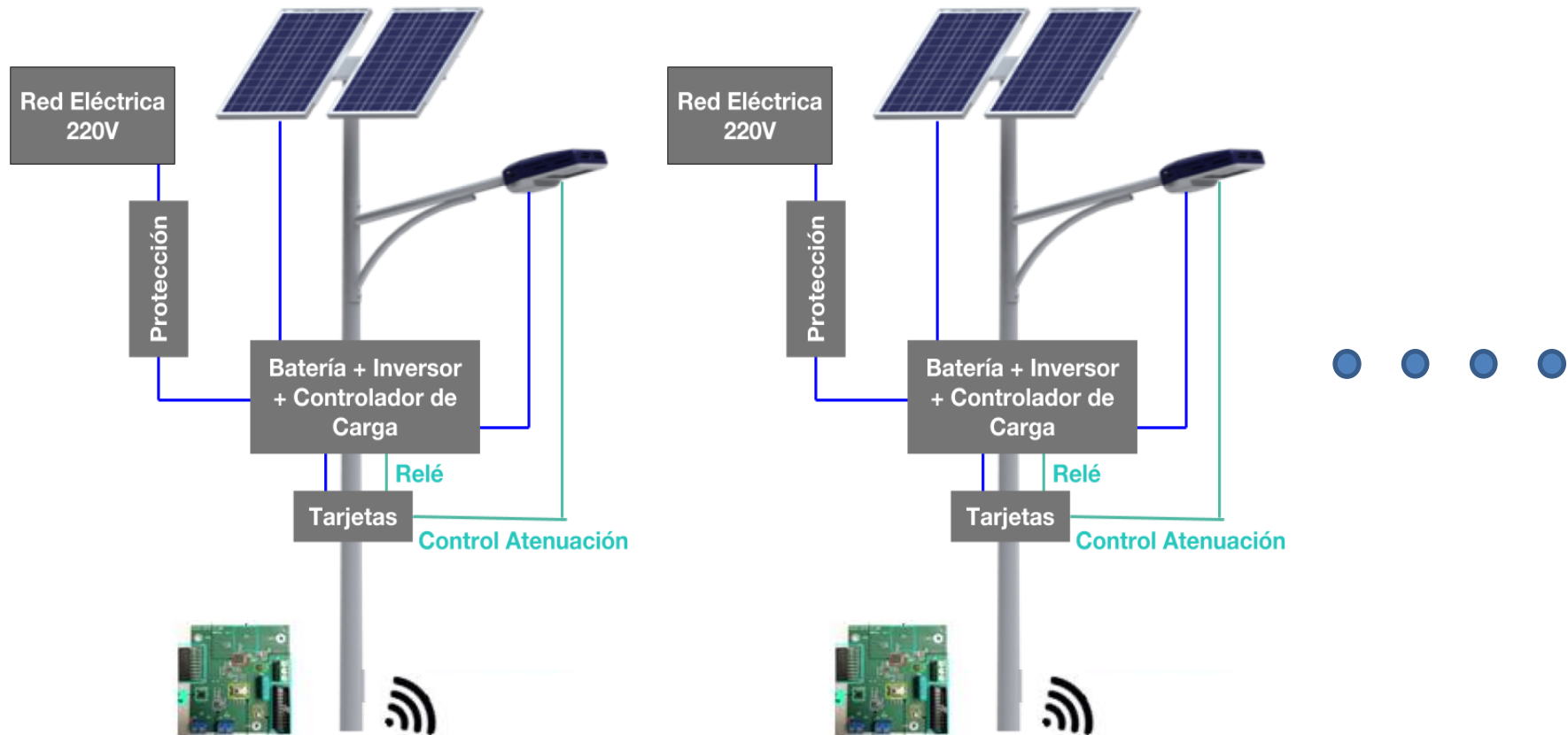


# Integración de los sistemas





# Integración de los sistemas





# Instalación del sistema piloto





# Instalación del sistema piloto



Avenida Arquímedes



# Instalación del sistema piloto



**Lugar:**  
Universidad Privada Boliviana

**Coordenadas:**  
(-17.399126, -66.2178536)

**Características del campo fotovoltaico:**

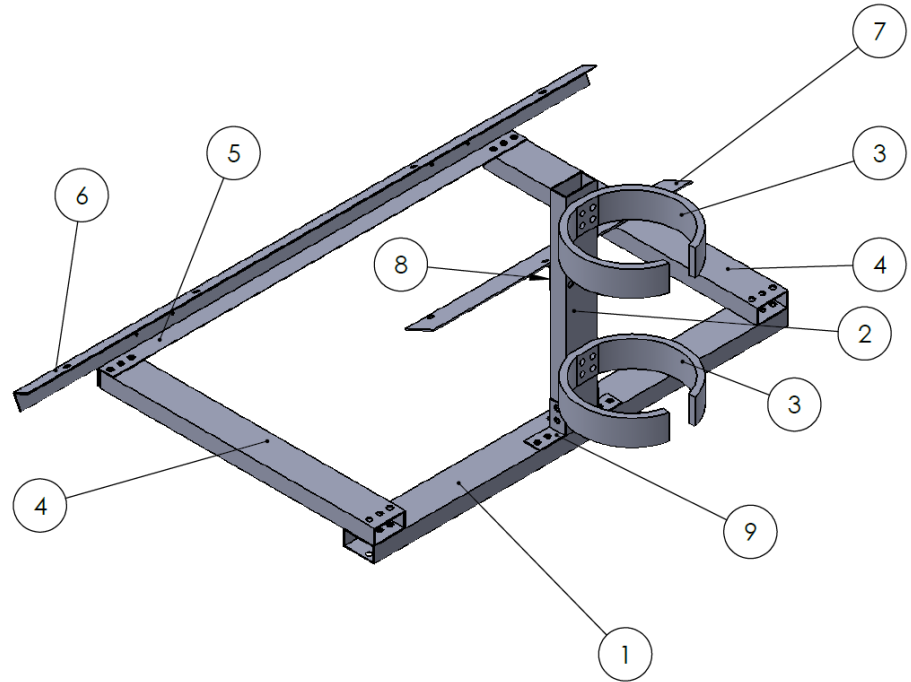
- Inclinación:  $22.17^\circ \rightarrow 25^\circ$
- Azimut:  $0^\circ$



# Instalación del sistema piloto

Fabiana Cañipa	04/06/2018	<b>Ensamble Soporte Panel</b>	No
Responsable Diseño	Fecha		0

No Pieza	Nombre Pieza
1	Soporte inferior
2	Soporte columna
3	Abrazadera
4	Soporte lateral
5	Union laterales
6	Union panel inferior
7	Union panel superior
8	Acople columna ancho
9	Acople columna delgado

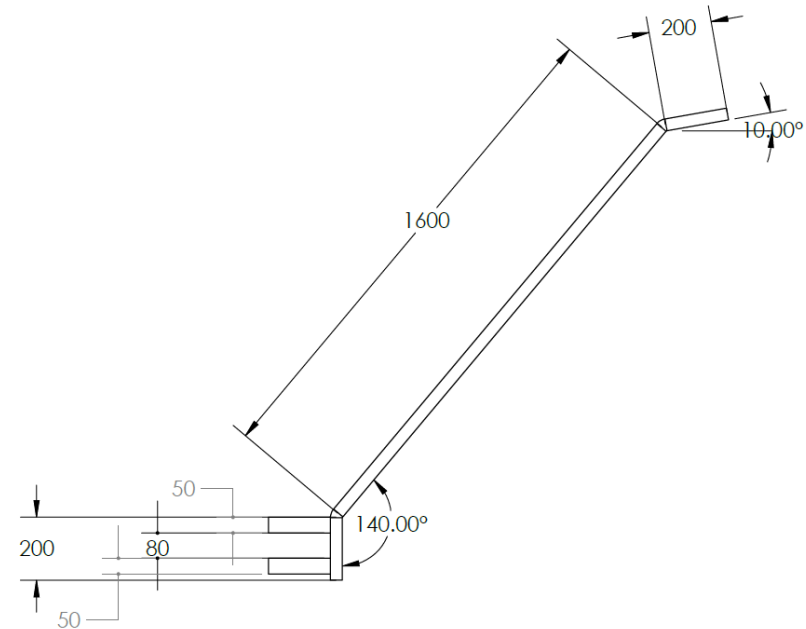
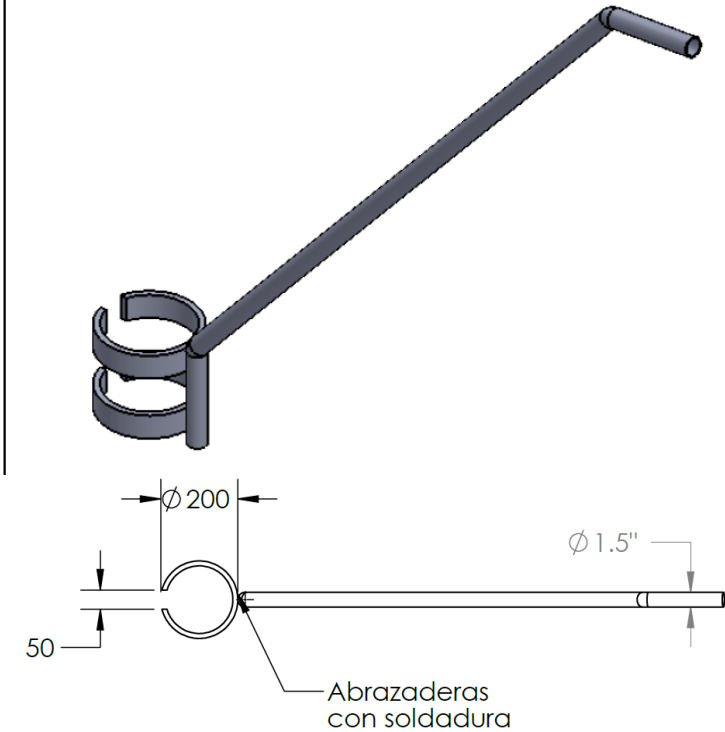




# Instalación del sistema piloto

Iluminación UPB

Fabiana Cañipa	01/06/2018	Brazo Para Luminaria	No
Responsable Diseño	Fecha		1





# Instalación del sistema piloto







# Instalación del sistema piloto





# Instalación del sistema piloto





# Instalación del sistema piloto





## Instalación del sistema piloto





# Instalación del sistema piloto

Integración sistema electrónico embebido





# Instalación del sistema piloto



Atenuación de la luz con adaptación al tráfico



Consumo Eléctrico

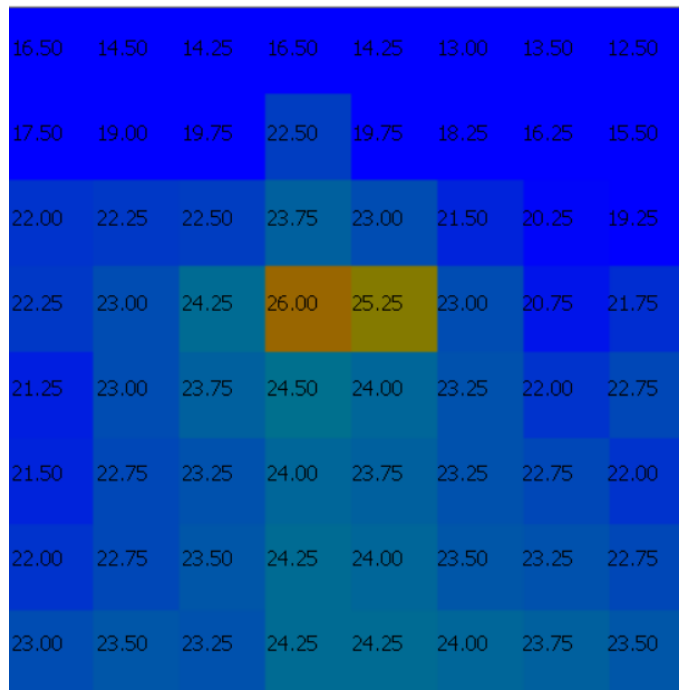


Ahorro Energético

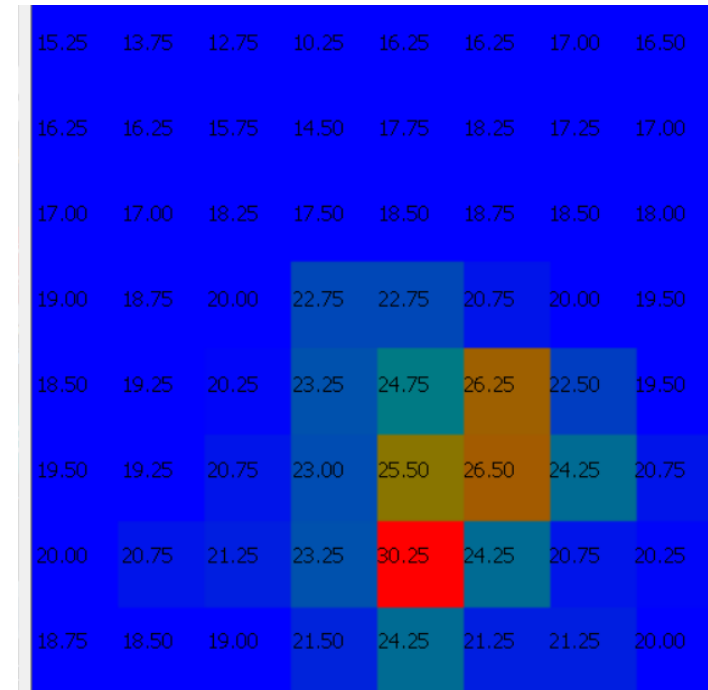


# Instalación del sistema piloto

## Pruebas sensor de arreglo PIR



Peatón: 8 pixeles / 24C



Vehículo: 4 pixeles / 25C



# Instalación del sistema piloto

## Señal de atenuación luminaria



Nro. de poste	1	2	3	4	5
90% Atenuación	1,13 V	1,13 V	1,13 V	1,12 V	1,11 V
50% Atenuación	5,15 V	5,16 V	1,15 V	5,15 V	5,14 V
0% Atenuación	9,94 V	10,01 V	10,04 V	9,98 V	9,95 V





# Instalación del sistema piloto

## Caso Peatón





# Instalación del sistema piloto

## Caso Vehiculo





## Consumo eléctrico

0% de atenuación

Potencia real  
consumida por  
luminaria = 55W

12 horas de  
funcionamiento

Consumo de potencia  
= 660 Wh/día



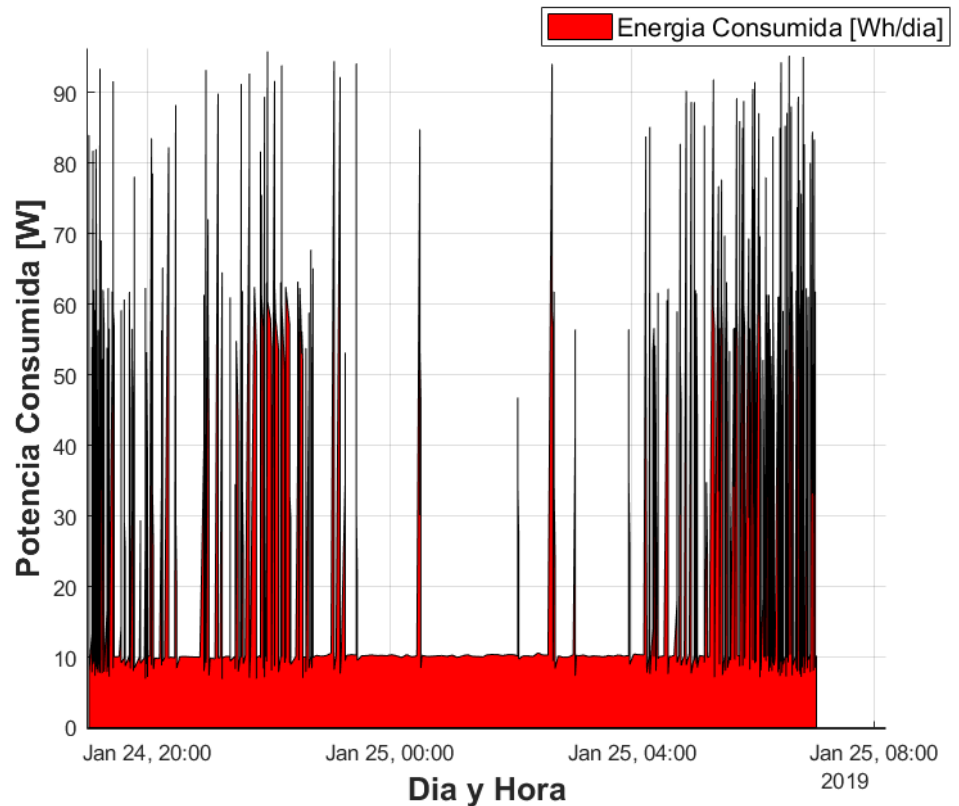


# Ahorro energético

## Sistema de iluminación inteligente

- Consumo eléctrico:  
181 Wh/día
- Ahorro Energético:  
479 Wh/día
- **72,6%**

Consumo de potencia  
= 660 Wh/día





# Inversión realizada

## Costos del Sistema Piloto

	Cantidad	Descripción	Costo Unitario (Bs)	Costo Total (Bs)	Porcentaje CT
1	5	MODULO MONOCRISTALINO 100W -12 V	1 066,7	5 333,8	15%
12	5	BATERÍA SOLAR PB-ACIDO ABIERTA 70 AH	1 044,0	5 220,0	14%
3	5	REGULADOR DE CARGA 8 A - 12 V, PHOCOS	336,6	1 683,0	5%
4	5	INVERSOR 12V/375 VA, VICTRON ENERGY	1 148,35	5 741,8	16%
<b>SUB-TOTAL</b>			<b>3 595,7</b>	<b>17 978,5</b>	<b>50%</b>
5	5	Luminarias LED LEYOND de 50 W	1 300,0	6 500,0	18%
6	5	Postes de luz instalados	1 000,0	5 000,0	14%
<b>SUB-TOTAL</b>			<b>5 895,7</b>	<b>29 478,6</b>	<b>32%</b>
7	5	Mecánica de sujeción, cajas de conexión	320,0	1 600,0	4%
8	5	Instalación eléctrica	200,0	1 000,0	3%
9	1	Aterramiento del sistema	150,0	750,0	2%
9	5	Sistema Embebido de Control Adaptativo	660,0	3 300,0	9%
<b>TOTAL</b>			<b>7 230,7</b>	<b>36 153,6</b>	<b>100%</b>



# Conclusiones

Cambio de:

**Lampara de Na de alta presión**



a:

**Luminaria LED**



Consumo energético:

Por ejemplo: 40 luminarias de Na de alta presión de 120 W, en la ciudad de El Alto, Km7

40 luminarias X 120W X 12 horas = 57,6 kWh/día

Por ej. 1kWh = 0,67 Bs

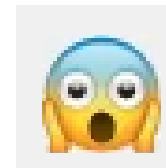
40 luminarias Na: 57,6 kWh/día = 38,6 Bs/día X 30 días = 1157,1 Bs./mes X 12 meses = **13893,1 Bs./año**

**Para 40 luminarias LED = 5793,4 Bs./año**

**SISTEMA DE ILUMINACIÓN VIAL LED INTELIGENTE**

**Para 40 luminarias LED = 1587,4 Bs./año**

120W (Na)=50W(LED) significa un **41.7%**





# Agradecimientos

Fundación RETECA (Suiza)

Scuola universitaria professionale  
della Svizzera italiana

**SUPSI**

**PROYECTO DE COLABORACIÓN INTER-UNIVERSITARIA**



# GRACIAS POR SU ATENCIÓN