

Design of a LED Lighting System through Photovoltaic Energy to Provide Levels of Lighting Quality in the Parking Lot N° 1 of the Technical University of Cotopaxi

Diseño de un Sistema de Alumbrado LED a través de Energía Fotovoltaica para Brindar Niveles de Calidad de Iluminación en el Parqueadero N° 1 de la Universidad Técnica de Cotopaxi

D.D. Jiménez¹X.A. Proaño¹

¹Universidad Técnica de Cotopaxi, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, Latacunga, Ecuador
E-mail: diego.jimenez1@utc.edu.ec; xavier.proano@utc.edu.ec

Abstract

In the present project was done the design and analysis of a system of external illumination by means of technology LED, was carried out which is energized by means of concentrated photovoltaic generation. Considering that, in the parking lot, there is an average illumination lower than the permitted, levels, is proposed to improve the lighting through the Dialux evo software, obtaining the following results from this design: 518 lx for access, 132,83 lx in the circulation strip and 113,75 lx in parking spaces, in accordance with the NTE INEN 2 248 standard, whose electric power density for lighting is 1,88 W/m². Through a bibliographic research, the technical data of the LED luminaires of 245 W and 134 W were compiled, with a luminous efficiency of 145 lm/W and 146 lm/W respectively. In addition, the photovoltaic system consists of 28 monocrystalline panels of 360 W/24 V, the accumulation system will consist of 28 deep discharge batteries at 240 Ah/12 V, two PWM load controllers of 110 A/48 V and the inverter of 5 000 VA/48 V. With a new value for the kWh of USD 0,681 2 it is possible to have a VAN of \$ 66 525,60 and the TIR equal to 25,35 %, indicating that the project is profitable.

Index terms— Battery, electrical power density, concentrated photovoltaic generation, inverter, monocrystalline panel, regulator, LED technology, TIR and VAN.

Resumen

En el presente trabajo se realizó el diseño y análisis de un sistema de iluminación exterior mediante tecnología LED, el cual es energizado por medio de generación fotovoltaica concentrada. Considerando que, en el estacionamiento se cuenta con una iluminación media inferior a los niveles permitidos, se propone la mejora del alumbrado a través del software Dialux evo, obteniendo de este diseño los siguientes resultados: 518 lx para el acceso, 132,83 lx en la franja de circulación y 113,75 lx en plazas de estacionamiento, acordes a la normativa NTE INEN 2 248, cuya densidad de potencia eléctrica para alumbrado es de 1,88 W/m². Mediante una investigación bibliográfica se recopiló los datos técnicos de las luminarias LED de 245 W y 134 W, con un eficiencia luminosa de 145 lm/W y 146 lm/W respectivamente. Además, el sistema fotovoltaico está conformado por 28 paneles monocristalinos de 360 W/24 V, el sistema de acumulación constará de 28 baterías de descarga profunda a 240 Ah/12 V, dos reguladores de carga PWM de 110 A/48 V y el inversor de 5 000 VA/48 V. Con un nuevo valor para el kWh de USD 0,681 2 se logra tener un VAN de \$ 66 525,60 y el TIR igual a 25,35 %, indicando que el proyecto resulta rentable.

Palabras clave— Batería, densidad de potencia eléctrica, generación fotovoltaica concentrada, inversor, panel monocristalino, regulador, tecnología LED, TIR y VAN.

Recibido: 25-09-2019, Aprobado tras revisión: 20-01-2020

Forma sugerida de citación: Jiménez, D.; Proaño, X. (2020). "Diseño de un Sistema de Alumbrado LED a través de Energía Fotovoltaica para Brindar Niveles de Calidad de Iluminación en el Parqueadero N° 1 de la Universidad Técnica de Cotopaxi". Revista Técnica "energía". No. 16, Issue II, Pp. 158-167

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

© 2020 Operador Nacional de Electricidad, CENACE



1. INTRODUCCIÓN

Una de las necesidades para lograr la comodidad y el buen vivir es una iluminación LED alimentada por medio de energía fotovoltaica con niveles de calidad y sin producir mayores efectos negativos al medio ambiente, contribuyendo a la reducción del consumo energético, por consiguiente, si se reduce el consumo de energía de la respectiva instalación eléctrica se minimizaran los egresos de dinero para la entidad beneficiada.

Actualmente, la iluminación exterior en el parqueadero N° 1 de la Universidad Técnica de Cotopaxi no cuenta con los adecuados niveles lumínicos, así pues, genera incomodidades e inseguridad en los usuarios. Por otra parte, un ineficaz flujo luminoso que cubre una determinada superficie comprometería el estado de bienestar físico del individuo debido a la inseguridad. Sin embargo esta fuente de luz artificial carece de autonomía, razón por la cual es necesario añadir un sistema de suministro de energía eléctrica, de ahí que para poder alimentar las lámparas se requiere un sistema de energía fotovoltaica. En conclusión mediante la tecnología LED se obtiene un sistema de iluminación eficiente que conjuntamente con el sistema fotovoltaico se contribuye al cuidado del medio ambiente.

2. METODOLOGÍA

2.1. Definición y Conceptos Básicos de Iluminación

2.1.1 Deslumbramiento

Es aquel efecto que reduce la capacidad visual de un individuo como consecuencia del exceso de luminancia y se mide dependiendo de la actividad que el usuario este realizando, si la misma es de pie, la compensación de altura es de 1,50 metros [1].

2.1.2 Uniformidad de iluminancia

Indica la variación que presenta la iluminación sobre una determinada superficie o plano, y se expresa como la relación entre la iluminancia mínima y la promedio [2].

2.1.3 Iluminación

La iluminación o iluminancia se define como el flujo luminoso que cubre una determinada superficie a iluminar y su unidad de medida es el LUX (lx) [2].

2.2. Densidad de Potencia Eléctrica para Alumbrado (DPEA)

El cálculo de la DPEA se realiza a partir de la carga total conectada para alumbrado expresada en vatios y del área total por iluminar en metros cuadrados [2].

$$DPEA = \frac{\text{Carga total conectada para alumbrado}}{\text{Área total iluminada}} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1)$$



2.3. Método Punto por Punto

Para la aplicación de este método se requiere saber con exactitud la posición en el espacio de la superficie a iluminar. Se subdivide la superficie en rectángulos iguales de áreas suficientemente pequeñas y así calcular la iluminancia media mediante la ecuación (2) [3].

$$E_m = \frac{\sum E_i}{n} [lx] \quad (2)$$

donde:

E_m : Iluminación media.

E_i : Iluminación en cada punto sobre el plano horizontal.

n : Número total de puntos a evaluar.

2.4. Cálculo de la Irradiación Global Diaria sobre la Superficie del Generador

Para determinar la inclinación óptima se emplea la ecuación (3) [4].

$$\beta_{opt} = 3,7 + 0,69|\phi| \quad (3)$$

donde:

β_{opt} : Ángulo de inclinación óptima (grados).

$|\phi|$: Latitud del lugar, sin signo (grados).

La constante K si el período de diseño es el mes de diciembre tendrá un valor de 1,7 y en julio será de 1 [4].

Si no es posible situar el sistema fotovoltaico de acuerdo a la inclinación óptima, se aplicara un coeficiente de reducción de la energía denominado factor de irradiación [4].

$$FI = 1 - \left[1,2 \times 10^{-4} (\beta - \beta_{opt})^2 \right] \quad (4)$$

donde:

FI : Factor de irradiación (sin unidades).

β : Inclinación real de la superficie (°).

β_{opt} : Inclinación óptima de la superficie (°).

Mediante la ecuación (5) se determinan el valor medio mensual de irradiación diaria sobre la superficie del generador [4].

$$G_{dm}(\alpha, \beta) = G_{dm}(0) \times K \times FI \times FS \left[Wh / m^2 \right] \quad (5)$$

donde:

FS : Factor de sombreado, si en la localidad del proyecto no existe presencia de sombras su valor es de 1 (sin unidades).

2.5. Cálculo de los Parámetros Eléctricos del Generador

Si el sistema fotovoltaico dispone de inversor, batería y regulador de carga el coeficiente PR será de 0,6, en el caso de un sistema con batería y regulador de carga equivaldrá a 0,7 [4].

El valor mínimo de potencia del generador fotovoltaico se calcula mediante la siguiente expresión [4]:

$$P_{G \min} = \frac{W_d \times G_{CEM}}{G_{dm}(\alpha, \beta) \times PR} \quad (6)$$

donde:

$P_{G \min}$: Potencia mínima del generador (W).

G_{CEM} : Irradiancia en condiciones CEM (constante de valor 1 000 W/m²).

W_d : Consumo de energía diario (Wh).

- Número de módulos:

$$N_p \times N_s \geq \frac{P_{G \min}}{P_{m\acute{a}x}} \quad (7)$$

donde:

N_p : Número de paneles en paralelo (unidad).

N_s : Número de paneles en serie (unidad).

$P_{m\acute{a}x}$: Potencia máxima del generador.

- Potencia total del generador:

$$P_{G \acute{m}a} = N_p \times P_{m\acute{a}x} \times N_s \quad [W] \quad (8)$$

- Tensión de circuito abierto del generador:

$$U_{G \text{oc}} = N_s \times U_{oc} \quad [V] \quad (9)$$

- Intensidad de cortocircuito del generador:

$$I_{G \text{sc}} = N_p \times I_{sc} \quad [A] \quad (10)$$

- Tensión máxima del generador:

$$U_{G \text{mpp}} = N_s \times U_{mpp} \quad [V] \quad (11)$$

- Intensidad máxima del generador:

$$I_{G \text{mpp}} = N_p \times I_{mpp} \quad [A] \quad (12)$$

donde:

U_{oc} : Tensión de circuito abierto (V).

I_{sc} : Corriente en cortocircuito (A).

U_{mpp} : Tensión punto de máxima potencia (V).

I_{mpp} : Corriente punto de máxima potencia (A).

2.6. Dimensionado del Banco de Baterías

La capacidad del sistema de acumulación se calcula a partir del consumo medio diario [4].

$$Q_d = \frac{W_d}{U_n} \quad (13)$$

donde:

Q_d : Consumo medio diario (Ah/día).

U_n : Tensión nominal del sistema de acumulación (V).

Por consiguiente, la capacidad total del sistema de acumulación se calcula mediante la siguiente expresión [4].

$$C_n = \frac{Q_d \times A}{PD_{m\acute{a}x} \times \eta_{inv} \times \eta_{rb}} \quad (14)$$

donde:

C_n : Capacidad de la batería de acumuladores para descarga en 20 horas (Ah).

A : Días de autonomía del sistema (días).

$PD_{m\acute{a}x}$: Profundidad de descarga máxima. En tanto por uno.

η_{inv} : Rendimiento del inversor del 85 %. En tanto por uno.

η_{rb} : Rendimiento del conjunto de batería y regulador de carga del 80 %. En tanto por uno.

2.7. Dimensionado del Regulador de Carga

La tensión nominal del regulador de carga deberá ser igual a la designada para el banco de baterías. La intensidad nominal I_R es el valor de la intensidad de cortocircuito del sistema fotovoltaico $I_{G \text{sc}}$, considerando un factor de seguridad de 1,25 [4].

Se deberá verificar que la tensión máxima en la entrada U_R no sea inferior a la tensión máxima de circuito abierto del generador fotovoltaico $U_{G \text{oc}}$, a la temperatura más desfavorable de las células del módulo [4].

2.8. Dimensionado del Inversor

La tensión nominal de entrada tiene que coincidir con la tensión nominal del sistema de acumulación, U_n . La potencia nominal del inversor S_n se determina en base a la carga instalada del circuito de utilización y considerando un factor de potencia igual a uno, la misma se expresa en VA [4].



2.9. Cálculo de los Conductores y Caídas de Tensión del Sistema Fotovoltaico Autónomo

En cada tramo se debe considerar el valor de la intensidad multiplicado por un factor de 1,25 debido a que todos los cables de conexión deberán estar dimensionados para una intensidad no inferior al 125 % de la máxima corriente del generador, en la Fig. 1 se indica gráficamente cada uno de los tramos [4].

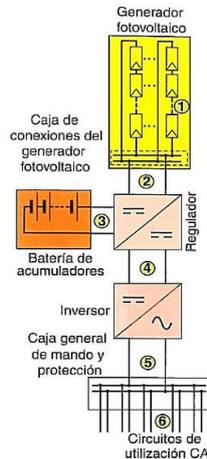


Figura 1: Tramos de Línea en un Sistema Fotovoltaico Aislado sin considerar los Dispositivos de Protección

La máxima caída de voltaje que deberá existir entre el sistema fotovoltaico y la caja general de mando y protección será de 1,5 % para la corriente nominal. En los circuitos de CC y CA se emplea la ecuación (15), con una diferencia que para el sistema fotovoltaico el término $\cos \phi$ no se considera [4].

$$S = \frac{200 \times L \times I \times \cos \phi}{\Delta U_{\%} \times U \times \gamma_{90}} \quad (15)$$

donde:

S: Sección del conductor (mm^2).

γ_{90} : Conductividad del conductor a la temperatura de servicio 90°C (45 s m/mm^2).

$\Delta U_{\%}$: Máxima caída de tensión permitida en porcentaje de la tensión de la línea (V).

L: Longitud de la línea (m).

I: Intensidad de la línea (A).

U: Tensión de la línea (V).

$\cos \phi$: Factor de potencia de la carga al final de la línea.

2.10. Aparatos de Maniobra y Protección de un Sistema Fotovoltaico Autónomo

En el caso de fusibles se dimensionan para actuar entre 1,5 y 2 veces la corriente de cortocircuito de un módulo solar (I_{sc}). Se debe verificar que la tensión asignada al fusible soporta 1,2 veces la tensión de circuito abierto del generador (U_{Goc}) [4].

El interruptor general del sistema fotovoltaico se dimensiona para soportar la corriente de cortocircuito del generador ($I_{G_{sc}}$) y la tensión de circuito abierto del sistema fotovoltaico (U_{Goc}) [4].

Los fusibles en el tramo regulador de carga-sistema de acumulación se dimensionan para soportar entre 1,5 y 2 veces la corriente del generador ($I_{G_{sc}}$) y 1,2 veces la tensión de circuito abierto del sistema fotovoltaico (U_{Goc}) [4].

Para tramos en corriente alterna las protecciones son mediante interruptores automáticos magnetotérmicos e interruptores diferenciales, su dimensionamiento se lo lleva a cabo para que soporte la corriente de salida del inversor y tensión nominal del circuito de utilización [4].

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. Evaluación de los Niveles de Iluminación según la Normativa NTE INEN 2 248

La toma de datos de los niveles de iluminancia mediante el luxómetro Digisense 20 250-00, se efectuó en el centro de cada rectángulo o figura geométrica irregular debidamente enumerada como se aprecia en la Fig. 2. El sensor se ubicó a una altura de 15 cm en posición horizontal según la normativa RTE INEN 069.

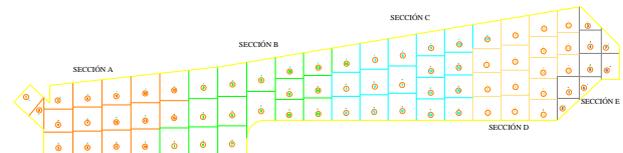


Figura 2: Puntos de Medición para Estudio de Iluminación

La Tabla 1 muestra los resultados del estudio de iluminancia a través del método punto por punto.

Tabla 1: Estudio de Iluminancia por Sección

Sección	Descripción	Iluminación media (lx)	Criterio de aceptación (lx)	Cumple NTE INEN 2248
A	Acceso	10,90	500 – 1 000	NO
	Franja de circulación	6,01	90 – 160	NO
	Plazas de estacionamiento extremo izquierdo	8,81	30 – 100	NO
	Plazas de estacionamiento extremo derecho	4,65		NO
B	Franja de circulación	18,44	90 – 160	NO
	Plazas de estacionamiento extremo izquierdo	13,68	30 – 100	NO

	Plazas de estacionamiento extremo derecho	20,71		NO
C	Franja de circulación	40,89	90 – 160	NO
	Plazas de estacionamiento extremo izquierdo	13,52	30 – 100	NO
	Plazas de estacionamiento extremo derecho	63,90		SI
D	Franja de circulación	6,11	90 – 160	NO
	Plazas de estacionamiento extremo derecho	9,88	30 – 100	NO
	Plazas de estacionamiento buses	1,90		NO
E	Franja de circulación	12,95	90 – 160	NO
	Plazas de estacionamiento buses	3,93	30 – 100	NO

Mediante los resultados obtenidos se constató que los niveles actuales de iluminancia en el estacionamiento en su mayoría no cumplen con la normativa vigente, lo cual se debe principalmente a una mala distribución de las luminarias en el extremo derecho del parqueadero, afectando directamente la visibilidad en la franja de circulación vehicular y en las plazas de parqueo.

El extremo izquierdo del aparcamiento tiene tres luminarias y solo dos lámparas se encuentran en funcionamiento, por otra parte, la ruta de acceso posee únicamente un reflector. Por consiguiente estos factores afectan negativamente en la calidad de los niveles de iluminación.

3.2. Diseño del Sistema de Iluminación LED mediante el Software Dialux Evo v.8.1

Una primera etapa consistió en la modelación del aparcamiento que se tomó como base para la implementación de las luminarias LED, en la Fig. 3 se puede evidenciar el modelo final del estacionamiento.



Figura 3: Sistema de Iluminación LED

En la Tabla 2 y Tabla 3 se presenta los resultados de los criterios de calidad según el software Dialux evo.

Tabla 2: Resultados Iluminación Media

Sección	Descripción	Iluminación media (lx)	Cumple NTE INEN 2248
A	Acceso	518	SI
	Franja de circulación	180	SI
	Plazas de estacionamiento extremo izquierdo	94	SI
	Plazas de estacionamiento extremo derecho	126	SI
B	Franja de circulación	141	SI
	Plazas de estacionamiento extremo izquierdo	122	SI
	Plazas de estacionamiento extremo derecho	115	SI
C	Franja de circulación	129	SI
	Plazas de estacionamiento extremo izquierdo	113	SI
	Plazas de estacionamiento extremo derecho	111	SI
D	Franja de circulación	109	SI
	Plazas de estacionamiento extremo derecho	120	SI
E	Franja de circulación 1	113	SI
	Franja de circulación 2	125	SI
	Plazas de estacionamiento buses	109	SI

Tabla 3: Resultados Uniformidad y Deslumbramiento

Sección	Descripción	Índice de uniformidad ($\geq 0,50$)	Límite de deslumbramiento (≤ 50)
A	Acceso	0,75	38
	Franja de circulación	0,60	47
	Plazas de estacionamiento extremo izquierdo	0,56	39
	Plazas de estacionamiento extremo derecho	0,82	45
B	Franja de circulación	0,77	38
	Plazas de estacionamiento extremo izquierdo	0,68	38
	Plazas de estacionamiento extremo derecho	0,79	35
C	Franja de circulación	0,77	38
	Plazas de estacionamiento extremo izquierdo	0,71	37
	Plazas de estacionamiento extremo derecho	0,72	38
D	Franja de circulación	0,71	38
	Plazas de estacionamiento extremo derecho	0,89	32



E	Franja de circulación 1	0,61	36
	Franja de circulación 2	0,79	31
	Plazas de estacionamiento buses	0,56	36

Como se aprecia en la Fig. 2, el estacionamiento presenta una forma geométrica irregular, conformado por secciones a iluminar de áreas considerablemente amplias y diferentes entre sí, por lo tanto, para alcanzar los niveles de calidad establecidos en la norma NTE INEN 2248 para franjas de circulación (90 – 160) lux, se superó los límites lumínicos en cuanto a plazas de estacionamiento (30 – 100) lux como se aprecia en la Tabla 2.

En la franja de circulación correspondiente a la sección A se obtiene una iluminación media de 180 lux, esto se debe principalmente, a que, en el acceso según normativa se debe tener como mínimo 500 lux, lo que ocasiona un incremento en los niveles de iluminación de esta sección.

Según los resultados de la Tabla 3 la nueva configuración del sistema de alumbrado que se aprecia en la Fig. 3, presenta índices de deslumbramiento inferiores al límite máximo permitido (≤ 50) con una uniformidad óptima, y por lo tanto ofreciendo niveles de calidad de iluminación.

3.3. Densidad de Potencia Eléctrica (DPEA)

El sistema de iluminación LED cuenta con 22 luminarias, de las cuales, 4 son destinadas para el acceso con una potencia de 245 W, 18 para plazas de estacionamiento y franja de circulación con una potencia de 134 W, el área total iluminada corresponde a 1 799,69 m².

$$DPEA = \frac{3\,392\text{ W}}{1\,799,69\text{ m}^2} = 1,88 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

3.4. Cálculo del Sistema Fotovoltaico Autónomo

El proyecto estará situado en la terraza de las instalaciones del bloque antiguo de la UTC y se divide en 5 áreas útiles, ocupando el área 1 de 126,83 m² para la ubicación de los equipos del sistema fotovoltaico. A continuación se presenta los equipos seleccionados dentro del diseño (véase Tabla 4).

Tabla 4: Equipos Principales del Proyecto

Tipo de Equipo	Capacidad	Ítem	Cantidad
Panel fotovoltaico	360	W	28
Batería	240	Ah	28
Regulador de carga	110	A	2
Inversor	5 000	VA	1

3.5. Cálculo de los Conductores y Caídas de Tensión

Se comprueba si la caída de tensión en la trayectoria más desfavorable que comprende los tramos 1, 2, 4 y 5 (ver Fig. 1) se encuentra dentro de los límites establecidos de 1,5 %.

$$\Delta U_{\%} = \Delta U_{\%1} + \Delta U_{\%2} + \Delta U_{\%4} + \Delta U_{\%5}$$

$$\Delta U_{\%} = 0,485\% + 0,694\% + 0,162\% + 0,162\% = 1,50\%$$

Para el tercer tramo será la suma de los tramos 1 y 2.

$$\Delta U_{\%3} = \Delta U_{\%1} + \Delta U_{\%2} = 0,485\% + 0,694\% = 1,18\%$$

3.5.1 Cálculo de la sección del conductor eléctrico por caída de tensión

El factor de potencia para el tramo 5 en AC se ignora de la ecuación (15), puesto que se supone un valor de 1, en la Tabla 5 se indican los resultados.

Tabla 5: Sección del Conductor por Caída de Tensión

Tramo	Sección (mm ²)
S ₁	3,47
S ₂	24,32
S ₃	6,65
S ₄	39,17
S ₅	8,12

3.5.2 Cálculo de la sección del conductor eléctrico por calentamiento

Debido a que los tramos 1 y 2 se encuentran instalados en canaleta cerrada se debe considerar una temperatura de 50 °C, por lo tanto, el factor de corrección que se deberá aplicar equivale a 0,89.

Como en el tramo 1 existen 7 circuitos dentro del mismo conducto el factor de corrección es de 0,5. En la Tabla 6 se puede visualizar la nueva sección.

Tabla 6: Sección del Conductor por Calentamiento

Tramo	Sección (mm ²)
S ₁	4
S ₂	25

Estos resultados se comparan y se elige el de mayor valor para establecer la sección comercial (ver Tabla 7).

Tabla 7: Secciones Comercial de los Conductores

Sección por tramo	Caída de tensión (mm ²)	Calentamiento (mm ²)	Sección comercial (mm ²)
S ₁	3,470	4	4
S ₂	24,321	25	35
S ₃	6,653	16	16
S ₄	39,170	50	50
S ₅	8,120	4	10

3.6. Aparatos de Maniobra y Protección del Sistema Fotovoltaico Autónomo

3.6.1 Protección del generador

Se procede a calcular el calibre del fusible (I_F) y la tensión asignada (U_F).

$$I_F = 1,5 \times I_{sc} = 1,5 \times 9,69\text{ A} = 14,535\text{ A}$$

$$I_F = 2 \times I_{sc} = 2 \times 9,69\text{ A} = 19,38\text{ A}$$

$$U_F = 1,2 \times U_{G1oc} = 1,2 \times 95,3\text{ V} = 114,36\text{ V}$$



Con estos factores se escoge un cartucho fusible de 15 A/ 1 100 V DC (gPV) cilíndrico de 14 × 51 mm.

3.6.2 Interruptor general del sistema fotovoltaico

Su dimensionamiento se lo hace determinando la intensidad nominal (I_n) y tensión nominal (U_n) del interruptor general.

$$I_n \geq I_{G1.sc} = 67,83 \text{ A}$$

$$U_n \geq U_{G1.oc} = 95,3 \text{ V}$$

Por lo tanto se escoge un interruptor seccionador bipolar de 100 A/ 1 000 V DC

3.6.3 Protección de la batería de acumuladores

Se instalará una base portafusibles en el positivo con su respectivo cartucho fusible.

$$I_F = 1,5 \times I_{G1.sc} = 1,5 \times 67,83 \text{ A} = 101,745 \text{ A}$$

$$I_F = 2 \times I_{G1.sc} = 2 \times 67,83 \text{ A} = 135,66 \text{ A}$$

$$U_F = 1,2 \times U_{G1.oc} = 1,2 \times 95,3 \text{ V} = 114,36 \text{ V}$$

Con estos factores se escoge un cartucho fusible de 110 A/ 1 000 V DC (gPV).

3.6.4 Protección del inversor

El interruptor magnetotérmico y el interruptor diferencial cumplirán con las siguientes características:

$$I_n \geq I_{inv.ca} = 22,727 \text{ A}$$

$$U_n = 220 \text{ V}$$

Por tanto se elige un interruptor automático bipolar de 25 A/230 V y un interruptor diferencial bipolar de 25 A/240 V, con una sensibilidad de 30 mA. La Fig. 4 muestra el esquema eléctrico del sistema fotovoltaico.

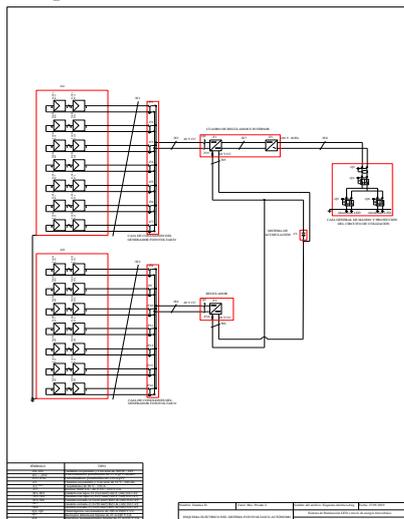


Figura 4: Diagrama Multifilar del Sistema Fotovoltaico

3.7. Cálculo de los Conductores y Caídas de Tensión del Circuito de Utilización

Desde el subtablero de distribución interna hasta el último punto de la instalación (tramo 4, conexión de la luminaria 3 a la luminaria 4), la máxima caída de tensión permitida no podrá ser mayor a 3 %. Para el presente circuito de iluminación se empleara un cable de 0,6/1 kV de tensión asignada y conductores de cobre, propio para redes subterráneas con una sección $S = 1,5 \text{ mm}^2$.

El factor de potencia para las luminarias LED será de 1, por tanto, este término no se considera dentro del cálculo, en la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 8: Caída de Tensión por Tramo del Circuito de Utilización

Tramo	Caída de tensión (%)
$\Delta U_{\%1}$	1,472
$\Delta U_{\%2}$	0,227
$\Delta U_{\%3}$	0,261
$\Delta U_{\%4}$	0,213

Se comprueba si la caída de tensión se encuentra dentro de los límites previamente establecidos.

$$\Delta U_{\%} = 1,472 \% + 0,227 \% + 0,261 \% + 0,213 \% = 2,17 \%$$

3.8. Interruptores Automáticos Magnetotérmicos o Breakers del Circuito de Utilización

El número de interruptores existentes para el control del sistema de alumbrado LED serán 4. El primer interruptor controlará 4 luminarias de 245 W, los restantes controlarán un total de 6 luminarias de 134 W respectivamente.

$$I_n \geq I_{CT} = \frac{P_{CT}}{U_{n.ca}} = \frac{4 \times 245 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 4,455 \text{ A}$$

$$U_n = 220 \text{ V}$$

Es así que se elige un interruptor automático magnetotérmico bipolar de 6 A/230 V. La Fig. 5 presenta el esquema unifilar del circuito de utilización.

3.9. Presupuesto para la Propuesta del Proyecto

3.9.1 Sistema de iluminación con tecnología LED

En la Tabla 9 se presenta la inversión inicial de la repotenciación del sistema de alumbrado, por otro lado, no es necesario un análisis de rentabilidad mediante el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR), debido a que su mejoramiento se lo debe realizar para ofrecer niveles de calidad lumínicos, dado que, los que existen actualmente no cumple con la normativa.

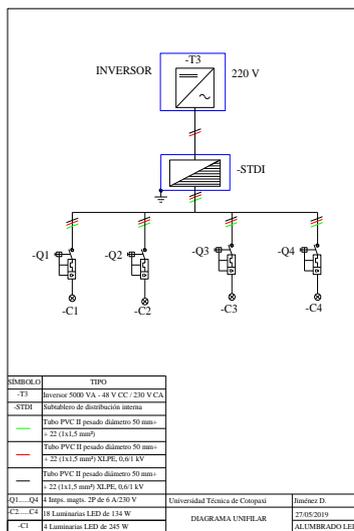


Figura 5: Diagrama Unifilar del Sistema de Iluminación LED

Tabla 9: Inversión Inicial del Sistema de Alumbrado LED

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio total (\$)
Luminaria LED 245 W	Pza.	4	1 621,12
Luminaria LED 134 W	Pza.	18	6 091,20
Poste metálico 7,5 m	Pza.	4	2 000,00
Poste metálico 8 m	Pza.	18	10 800,00
Brazo de soporte 1 m x 2" de diámetro	Pza.	22	239,80
Cable sección 1,5 mm ² , XLPE, 0,6/1 kV (negro)	m	669,79	180,84
Cable sección 1,5 mm ² , XLPE, 0,6/1 kV (rojo)	m	669,79	180,84
Cable sección 1,5 mm ² (verde)	m	467	126,09
Tubo PVC del tipo II pesado 50 mm de diámetro	m	813,55	2 977,58
Interruptor automático magnetotérmico bipolar de 6 A/230 V AC	Pza.	4	43,97
Renta de grúa canastilla	Días	2	400,00
Salario albañil	Días	30	433,35
Salario técnico electricista	Días	30	409,51
TOTAL			25 961,65

3.9.2 Rentabilidad del sistema fotovoltaico autónomo

La Tabla 10 muestra la inversión requerida para implementar el SFV, pero, se descarta el capital que se presenta en la Tabla 9 debido a que se analiza la rentabilidad que implica suministrar la energía eléctrica con la generación propia del sistema solar.

Tabla 10: Inversión Inicial del Sistema Fotovoltaico Autónomo

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio total (\$)
Panel monocristalino (24 V/360 W)	Pza.	28	8 952,44
Batería (12 V/240 Ah)	Pza.	28	20 249,32
Regulador de carga (48 V/110 A)	Pza.	2	626,86
Inversor (48 V/5 000 VA)	Pza.	1	2 487,21
Cable Exzhellent solar	m	21	26,86



ZZ-F (AS) sección 4 mm ²			
Cable Exzhellent solar ZZ-F (AS) sección 35 mm ²	m	8,60	45,92
Cable Exzhellent RZI-K (AS) sección 16 mm ²	m	4	14,00
Cable Exzhellent RZI-K (AS) sección 50 mm ²	m	1	7,17
Cable Exzhellent RZI-K (AS) sección 10 mm ²	m	1	1,69
Seccionador portafusibles de 15 A/1 100 V DC (gPV) + neutro	Pza.	14	84,00
Interruptor seccionador de 100 A/ 1 000 V DC	Pza.	2	77,72
Seccionador portafusibles de 110 A/1 000 V DC (gPV)	Pza.	2	39,70
Interruptor automático bipolar de 25 A/230 V AC	Pza.	1	10,99
Interruptor diferencial bipolar de 25 A/240 V AC	Pza.	1	7,18
Estructura de soporte para el SFV concentrado	Pza.	2	760,00
TOTAL			33 391,06

Considerando la vida útil de las baterías de 15 años, el valor actual (VA), la tasa de interés del 8,16 % y el saldo de \$ 20 249,32, se estima un monto de \$ 6 243,24 a invertir en el año cero, para generar un capital adicional que posteriormente será implementado en el cambio de los acumuladores eléctricos, dando una inversión inicial total de \$ 39 634,30.

Una vez establecidos estos factores se procede a determinar la rentabilidad de la implementación de un generador fotovoltaico concentrado, como se puede apreciar en la Tabla 11.

Tabla 11: Caso 1

Costo de oportunidad del capital (COK)	Valor actual neto (VAN)	Tasa interna de retorno (TIR)
8,16 %	\$ 30 277,65	- 4,03 %

La propuesta actualmente no es rentable pese a que la vida útil del sistema es de 25 años, debido a que el VAN es menor a cero y la TIR es inferior al costo de oportunidad del capital.

Como solución se presenta una alternativa que consiste básicamente en un nuevo valor para el kWh de USD 0,681 2 tomado del pliego tarifario para las empresas eléctricas de distribución del año 2019, este costo es para aquellos usuarios a nivel residencial con un consumo energético superior a 3 500 kWh, obteniendo así la Tabla 12.

Tabla 12: Caso 2

Costo de oportunidad del capital (COK)	Valor actual neto (VAN)	Tasa interna de retorno (TIR)
8,16 %	\$ 66 525,60	25,35 %

Con estos resultados se evidencia que la propuesta resulta rentable debido a que el VAN es mayor a cero y la TIR es superior al COK.

3.9.3 Estimación de costo mínimo del kWh para la rentabilidad del proyecto

Con la finalidad de establecer el valor mínimo del kWh a través del cual el proyecto se vuelve rentable en un periodo de recuperación de 10 años, se hace uso de la ecuación (16).

$$C_{kWh} = \frac{I_t}{E} \quad (16)$$

donde:

C_{kWh} : Costo mínimo del kWh (\$/kWh).

E : Demanda de energía (kWh).

I_t : Ingresos en el periodo t (\$).

$$C_{kWh} = \frac{\$ 5\,988,736\,8}{14\,856,96\,kWh} = \$ 0,403\,1 \text{ por kWh}$$

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El diseño del sistema de iluminación LED dispone de 18 luminarias de 134 W y 4 luminarias de 245 W instaladas a una altura de 8 m y 7,5 m respectivamente, obteniendo así un índice de uniformidad superior a 0,50 en las diferentes secciones del parqueadero y así evitar el denominado efecto cebra.

El sistema fotovoltaico autónomo abastecerá una carga instalada de 3 392 W, misma que es generada por 28 módulos solares de 360 W, con un total de 28 baterías de descarga profunda de 240 Ah el sistema podrá continuar en funcionamiento sin generación solar durante un día.

Efectuar mediciones anuales de los niveles de iluminación y luminancia para llevar un control adecuado que permita realizar un mantenimiento correctivo de ser necesario, y verificar si el límite de deslumbramiento ha presentado variaciones con respecto a los valores obtenidos en el diseño.

Con la finalidad de mejorar la utilización del sistema de alumbrado LED se puede considerar dos circuitos de iluminación, donde el primero se encuentre encendido permanentemente y el segundo se activará a través de un sensor de presencia que permita cumplir con los niveles lumínicos del presente diseño.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INEN. (2019, Abr 05). CPE INEN 14 “Código de práctica para alumbrado público” [En línea]. Disponible: https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/cpe_inen_14.pdf
- [2] INEN. (2017, Feb 06). RTE INEN 069 “Alumbrado público” [En línea]. Disponible: <https://drive.google.com/file/d/10XqEYiqicSTsABaFPPOgYKsgbYJpdIXE/view>
- [3] CEAC, Sistemas de iluminación, proyectos de

alumbrado. 1era. ed. España: Ediciones CEAC, S.A., 1974.

- [4] A. Olivia y G. Herranz, Instalaciones solares fotovoltaicas. Editex, 2010.
- [5] INEN. (2019, Abr 07). NTE INEN 2248 “Accesibilidad de las personas al medio físico. Estacionamientos” [En línea]. Disponible: https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_2248-1.pdf
- [6] G. E. Harper, El ABC del alumbrado y las instalaciones eléctricas en baja tensión. 2da. ed. México: Limusa, 2004.
- [7] M. Aparicio, Energías solar fotovoltaica, cálculo de una instalación aislada. 2da. ed. España: Marcombo, 2010.
- [8] J. de la Cruz y F. de la Cruz, Guía de mantenimiento en instalaciones fotovoltaicas. 1era. ed. España: Ediciones Experiencia S.L., 2009.
- [9] A. Gago y J. Fraile, Iluminación con tecnología LED. España: Paraninfo S.A., 2012.
- [10] J. A. Domínguez, Energías alternativas. 3era. ed. Madrid: Equipo Sirius, 2008.
- [11] A. Bridgewater y G. Bridgewater, Energías alternativas handbook. 1era. ed. España: Paraninfo S.A., 2009.
- [12] A. Guerrero, J. Ruvalcaba, I. Vázquez, “Propuesta de alumbrado con iluminación tipo LED y paneles fotovoltaicos estacionamiento de la DAE (Dirección de Administración Escolar) del I.P.N.”, tesis Ing., ESIME, México, MX, 2016.
- [13] V. Márquez, F. González, J. Gonzales, Eficiencia energética en las instalaciones de iluminación interior y alumbrado exterior (UF0567). 1era. ed. Andalucía: ic editorial, 2013.
- [14] X. Castells, Energías renovables. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2012.
- [15] DIGISENSE. (2019, Jun 24). User Manual, data logging light meter model 20250-00 [Online]. Available: <https://pim-resources.coleparmer.com/instruction-manual/digi-sense-20250-00-data-logging-light-meter-instruction-manual.pdf>





Diego David Jiménez.- Nació en Loja, Ecuador en 1994. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Universidad Técnica de Cotopaxi en 2019. Sus áreas de interés son las energías renovables, sistemas eléctricos de potencia, protecciones eléctricas y líneas de

transmisión.



Xavier Alfonso Proaño.- Nació en Latacunga, Ecuador en 1985. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional de Quito en 2010, y el de Magister en Gestión de Energías en la Universidad Técnica de Cotopaxi en 2013. Actualmente trabaja en la

Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi como Profesor a Tiempo Completo. Su campo de investigación se encuentra relacionado con sistemas eléctricos de potencia.