

**PROPUESTA DE AHORRO ENERGÉTICO EN ILUMINACIÓN PARA EL
COLEGIO ALFONSO PALACIO RUDAS UBICADO EN HONDA - TOLIMA**

Por:

Yeison Orlando Manrique Rojas



**FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
BOGOTÁ D.C.
2021**

**PROPUESTA DE AHORRO ENERGÉTICO EN ILUMINACIÓN PARA EL
COLEGIO ALFONSO PALACIO RUDAS UBICADO EN HONDA - TOLIMA**

Por:

Yeison Orlando Manrique Rojas

Anteproyecto presentado como opción de grado para optar al título de pregrado en
Ingeniería Electrónica

Aprobado por:

Ing. José Luis Paternina MeD

Director



FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

BOGOTÁ D.C.

2021

1. Planteamiento del Problema

En el transcurso del tiempo se ha visto la necesidad de tener presente el consumo energético generado en diferentes sectores industriales, empresariales, culturales y educativos, creando la necesidad de buscar alternativas de ahorro y formas de suplir las fuentes de energías convencionales.

El uso de fuentes de energía no convencionales como: solar, eólica, aerotérmica, geotérmica, hidrotérmica, biomasa, entre otras, ha estado en la mira de muchos países, ya que, al entender el daño ambiental que causan los combustibles fósiles, han llevado a la implementación de algunas de estas. La energía solar se ha convertido en una de las más utilizadas debido a su gran efectividad e impacto, debido a que ésta es considerada una de las fuentes de energía más limpias, abundantes y disponibles en el planeta según en [1].

Teniendo en cuenta el impacto que conlleva la implementación de fuentes de energías no convencionales, como la solar, se generan preguntas acerca de si es posible aprovechar de mejor manera el uso de esta fuente, aquí es donde entra a tomar un valor muy importante el manejo de iluminación industrial con tecnología LED. Como se muestra en [2] el cual presenta un estudio sobre el ahorro económico y ventajas medioambientales que genera el implementar luminaria con tecnología LED, que no solo presentan resultados favoreciendo el uso de estas tecnologías por el ahorro energético que causan, sino que indican desde un punto de vista medioambiental que se reduce en gran parte emisiones de dióxido de carbono (CO₂) esto debido al incremento de vida útil que conlleva el uso de las mismas.

Todas las entidades de gran tamaño ya sean públicas o privadas tienen en cuenta el consumo energético para mantener un margen de costos y ganancias, es por esto que sienten la necesidad de generar o implementar tecnologías que les permitan optimizar de mejor manera sus recursos y conservar sus instalaciones eficientes y de la mejor forma para sus trabajadores, clientes y demás usuarios, es por esto que el ahorro energético se convierte en asuntos fundamentales para su crecimiento [3].

El estudio a realizar tiene la tarea principal de estudiar el consumo de energía eléctrica y detectar las malas prácticas usadas por los usuarios para generar un ahorro financiero.

Teniendo en cuenta que la implementación de energía solar como fuente no convencional y el uso de tecnología LED en diferentes instalaciones

industriales es cada vez más común, se plantea la siguiente pregunta problema: ¿Cómo estructurar alternativas de ahorro energético en iluminación para el colegio Alfonso Palacio Rivas ubicado en Honda - Tolima?

2. Justificación

El crecimiento en el consumo de electricidad de las diferentes entidades exige que se tomen iniciativas para satisfacer la demanda de energía y, al mismo tiempo, garantizar un crecimiento mínimo de las emisiones de CO₂ o gases de efecto invernadero por uso de energía convencional. La iluminación artificial desempeña un papel importante en el consumo de energía en un edificio o en un área común. Para el éxito de cualquier actividad general, deportiva o solo uso de instalaciones para trabajos habituales se debe contar con un sistema de iluminación que genere tanto una reducción en energía y que aumente la calidad de iluminación, sin comprometer ninguna de las dos.

Teniendo en cuenta posibles aumentos de gastos energéticos por consumo de clientes o usuarios de las instalaciones supone una carga en el presupuesto de la entidad creando la necesidad de invertir en nuevas tecnologías de energía no convencionales y formas de usarla de la mejor manera por medio de luminarias LEDs.

Dicho esto, se cuentan con diferentes normas que cobijan dichas prácticas que no solo generan un aumento para la entidad, sino que se incentiva la implementación de fuentes de energía no convencionales según la Ley 1715 del 2014, conllevan beneficios conforme a la resolución 196 del 2020 y el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP), las cuales muestran el camino a seguir para la implementación de proyectos que integren este tipo de tecnologías [22 - 24].

3. Estado del arte

A lo largo de los años, la humanidad ha logrado grandes cambios en su vida cotidiana, lo que implica que, por su necesidad de presentar avances para el mejoramiento de la misma, ha tenido que implementar diferentes sistemas de energía no convencional o uso de tecnologías que impliquen una disminución en sus gastos energéticos, dicho esto, esta sección se dividirá en 3 partes que serán los temas generales del proyecto.

- **Eficiencia energética e Iluminación**

Para el 2009 en [4] se compara el sistema de LED con el de High Pressure Sodium (HPS) para la iluminación de carreteras con el fin de evaluar cuál es más eficiente desde el punto de vista energético, concluyendo que este tipo de tecnología muestra una perspectiva prometedora en un futuro próximo debido a la mejora espectacular de la eficacia luminosa.

Para el año 2013 en [6], se presenta un artículo donde se proponen soluciones digitales para el control de iluminación y comunicación de la misma, enfocando en que la integración del control digital en los sistemas de iluminación permite a los consumidores tener acceso a datos en tiempo real sobre sus sistemas de iluminación para gestión del consumo de energía.

Para el 2016 se presenta [10] el cual propone una evaluación de la eficiencia en el consumo de energía para el sistema de iluminación en un área seleccionada y un diseño de iluminación que cumpla con la norma MS 1525:2014 como plan estratégico para lograr el uso óptimo de la energía.

Para el año 2019 se tienen [16 - 17] donde el primer documento presenta la integración en el mercado de los sistemas de iluminación LED en Egipto, los amplios resultados conseguidos a través de las actividades implementadas del proyecto en mejora de la Eficiencia Energética de la Iluminación, y para el segundo se presenta una evaluación del análisis de la calidad y la cantidad de iluminación en una pista de squash según los diferentes niveles de juego, en el edificio de Marena, Universidad de Manipal (MIT), teniendo en cuenta que el diseño de iluminación propuesto está acorde a la Federación Mundial de Squash (WSF) para lograr una iluminación energéticamente eficiente, donde se han elegido luces LED para el sistema propuesto, ya que son de alta eficiencia energética y respetuosa con el medio ambiente.

Dado los anteriores artículos, permite conocer más de cerca los efectos que tiene implementar tecnología LED para diferentes proyectos y condiciones, dando un efecto positivo en su uso.

- **Iluminación**

En el año 2011 en [5], se presenta un diseño y la construcción de un diodo emisor de luz (LED) multiuso de bajo consumo luz, donde se especifica que espectro de onda es recomendable usar, así como el tipo de conexión y su alimentación, donde se concluye un aumento en la vida útil del dispositivo por uso de un circuito de baja frecuencia.

En el año 2015 en [7], se presenta un análisis económico de un dispositivo controlable con características de red inteligente aplicado al sistema de alumbrado público LED, con el fin de evaluar la eficiencia de su uso así como los posibles beneficios en el sistema de alumbrado público y la monitorización de los parámetros de la red de baja tensión. Los resultados han mostrado unos periodos de amortización bajos y una tasa de retorno interno prometedora en comparación con otras aplicaciones.

En 2015 se presenta el artículo [8] en el que se propone una completa metodología para el alumbrado público con disposición escalonada y aprovechando las posibilidades de la tecnología LED, teniendo en cuenta diferentes conceptos de la actualidad en ese entonces.

Para el 2016 en [9] se propone un sistema de gestión de control y monitorización para un grupo de luminarias LED de una infraestructura de alumbrado público, permitiendo la medición de ciertos parámetros útiles para un funcionamiento más adecuado y eficiente, sin dejar de controlar la calidad de la red eléctrica.

Para el 2017 en [11] se habla de disminución de CO₂ causado por las luminarias convencionales, resaltando la reducción de este usando la propuesta que ellos generan.

Teniendo en cuenta las propuestas de los artículos anteriores, se observa que la tecnología LED es cada vez más usada en proyectos de infraestructura pública, dando a entender que puede ser una opción a implementar.

- **Sistemas Fotovoltaicos**

En el año 2018 se presentan varios artículos [12 - 15] en los que muestra temas relacionados con el uso e instalación de sistemas fotovoltaicos, el uso de la tecnología LED y la contribución existente, ahorro energético con la implementación de estos, enfocando en el artículo [13] en el que se realiza un análisis técnico económico con la renovación de sistemas de iluminación de un instituto de formación.

Dados los anteriores artículos, se tienen en cuenta que tipo de tecnología usan para su diseño e implementación, así como su respectivo análisis de ahorro energético.

4. Objetivos

4.1. General

Proponer alternativas de suministro eléctrico para suplir la demanda en iluminación del colegio mediante sistema fotovoltaico.

4.2. Específicos

- Caracterizar el sistema de iluminación del colegio mediante inspección técnica para estimar la carga.
- Proponer alternativas de suministro fotovoltaico para energizar luminarias.
- Evaluar las propuestas en términos de consumos energéticos y costos de la propuesta.

5. Metodología

Teniendo en cuenta los objetivos del proyecto, se desarrollarán una serie de etapas en las que se distribuirán las tareas a tener en cuenta para la ejecución del proyecto. Las siguientes fases muestran las etapas generales del proyecto.

Fase 1: Caracterizar el sistema de iluminación del colegio mediante inspección técnica para estimar la carga.

Actividades:

- Registrar el tipo de luminaria que se usa en el espacio.
- Proponer un cambio 1 a 1 de cada luminaria convencional por luminaria LED.
- Optimización de la luminaria actual, teniendo en cuenta la posición y cantidad de cada una.

Entregable: Diseño en 3D del lugar de estudio en Dialux Evo con sus respectivos cambios en luminarias.

Fase 2: Proponer alternativas de suministro fotovoltaico para energizar luminarias.

Actividades:

- Obtener costos y consumo energético de la luminaria actual.
- Realizar un estudio teórico del consumo esperado por la nueva luminaria

Entregable: Diseños de sistemas fotovoltaicos para el consumo de las luminarias.

Fase 3: Evaluar las propuestas en términos de consumos energéticos y costos de la propuesta.

Actividades:

- Comparar los resultados obtenidos con los actuales para así garantizar la viabilidad técnico financiera del proyecto.

Entregable: Análisis técnico financiero de cada propuesta ofrecida al cliente para su implementación.

6. Cronograma

Actividad	Mayo				Junio			
	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
Selección del lugar de trabajo y toma de medidas.								
Estado del arte: Investigación sobre eficiencia energética, luminotecnia y sistemas fotovoltaicos								
Simulación de espacios y modelamiento de luminaria en Dialux Evo								
Planteamiento teórico y análisis técnico financiero								
Elaboración de informes que consoliden la investigación realizada								

7. Resultados

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos en cada una de las fases anteriormente mencionadas. Lo primero que se dará a conocer son los diseños de un salón modelo para uno de los edificios del colegio Alfonso Palacio Rudas ubicado en Honda - Tolima y el coliseo ubicado en el mismo. Para estos modelos se tuvo en cuenta la cantidad de luminarias en cada espacio mencionado para su posterior análisis, así como la respectiva altura de cada una. Cabe resaltar que estas medidas se hicieron de manera presencial y en conjunto con el rector y secretaria del colegio.

Para el diseño de los espacios que se mostrarán a continuación se utilizó el software DIALux Evo, el cual permite generar un análisis luminotécnico de cada espacio diseñado. Teniendo esto cuenta se inicia con el plano completo del colegio, seguido del diseño del Salón modelo y luego el coliseo.

Plano completo del colegio:

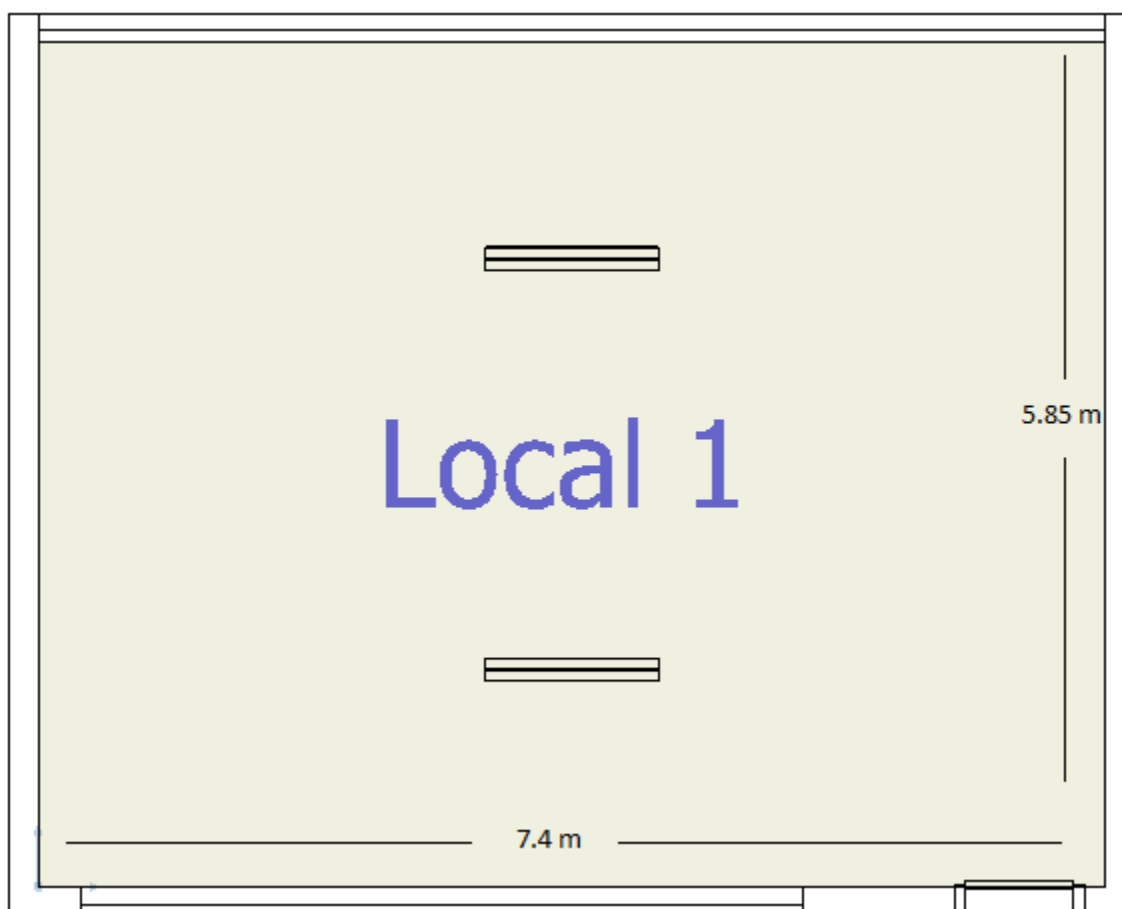
El plano a continuación, contiene todos los edificios y espacios recreativos del colegio, dicho plano fue proporcionado por el colegio. Como se puede ver los índices 1 y 2 marcados con rojo serán los espacios a realizarles el análisis luminotécnico.



Figura 1. Plano del colegio

Salón modelo

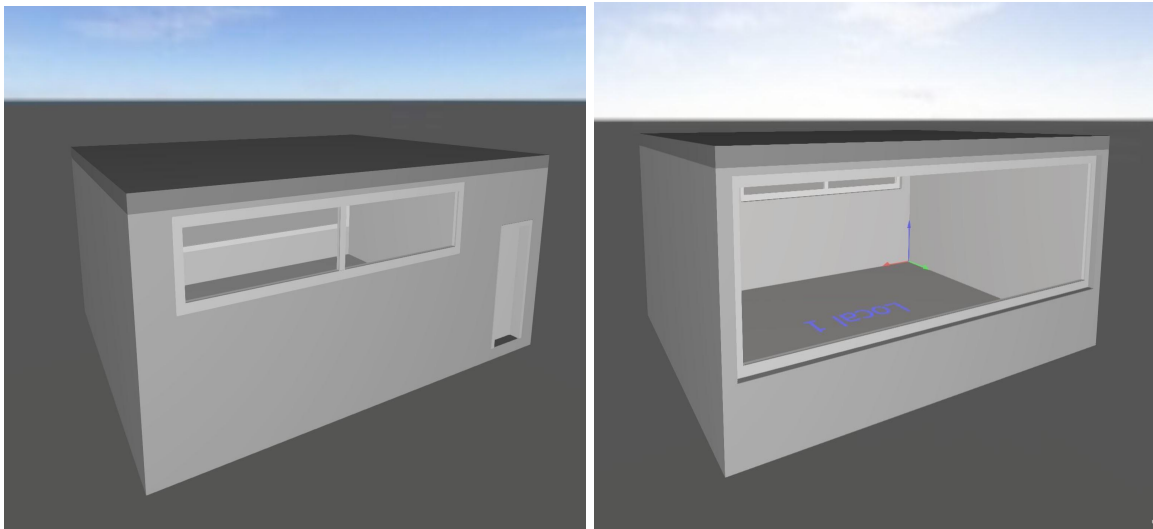
Para el salón modelo ubicado en el edificio del índice 1 se tomaron las respectivas medidas de ancho, largo y altura, así como la posición y cantidad de luminarias. Se define este como salón modelo debido a que hay una cantidad de 7 salones con estas mismas dimensiones en cada piso, el edificio se compone de tres pisos, es decir, se está realizando el análisis luminotécnico para 21 salones. Teniendo esto en cuenta, la siguiente figura muestra el plano del salón modelo con sus respectivas medidas.



ESCALA: 1m = 1,62cm

Figura 2. Plano salón modelo. Fuente: Propia - Diseño en DIALux Evo

y la vista en 3D del respectivo plano, con una vista frontal y posterior del salón.



ESCALA: 1m = 0,6cm

Figura 3. Salón modelo - vista frontal y posterior. Fuente: Propia - Diseño en DIALux Evo

En el modelo se puede observar a simple vista que se compone de una puerta sencilla y dos ventanas, una en la parte superior de la vista frontal y otra en la vista posterior, de acuerdo a lo anterior sus medidas son las siguientes:

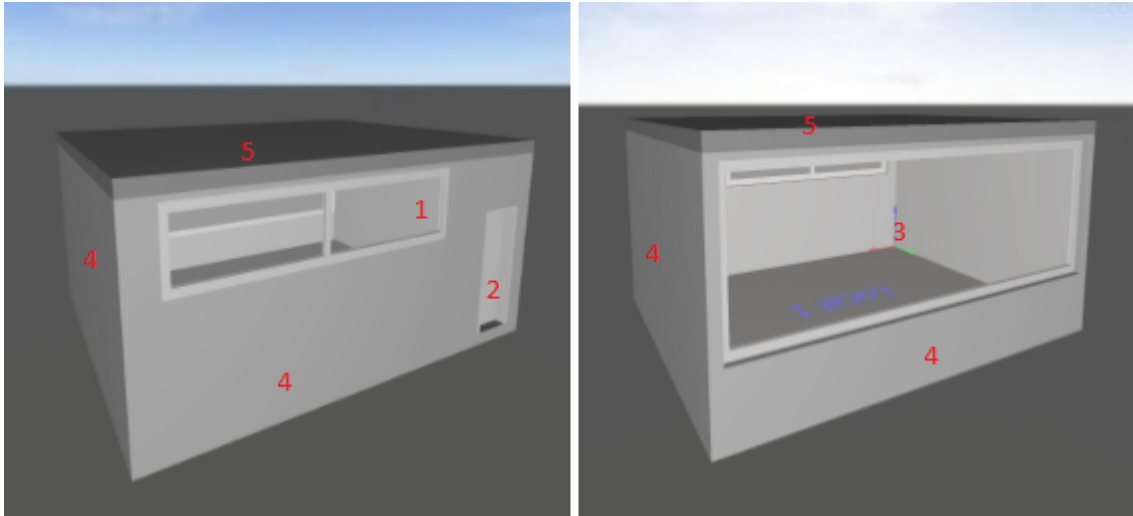
- Altura: 2.8 m
- Ancho: 7.4m
- Profundo: 5.85m

Y como se observa en la figura 2 una cantidad de 2 luminarias por salón, donde cada una está compuesta por dos tubos fluorescentes T12 de 120 cm, cada uno de 39W, es decir se tendría un consumo de 78W por luminaria, dando un total de **156W** por salón.

Acorde a las fases del proyecto se realiza un cambio 1 a 1 de luminarias, esto quiere decir que se tomarán las luminarias actuales y serán reemplazadas por luminarias de menor vataje y mayor vida útil con tecnología LED, para esto, se utilizará el software anteriormente mencionado.

Convenciones

La figura 4 muestra enumeradamente los elementos que componen el salón a estudiar, seguido de su descripción:



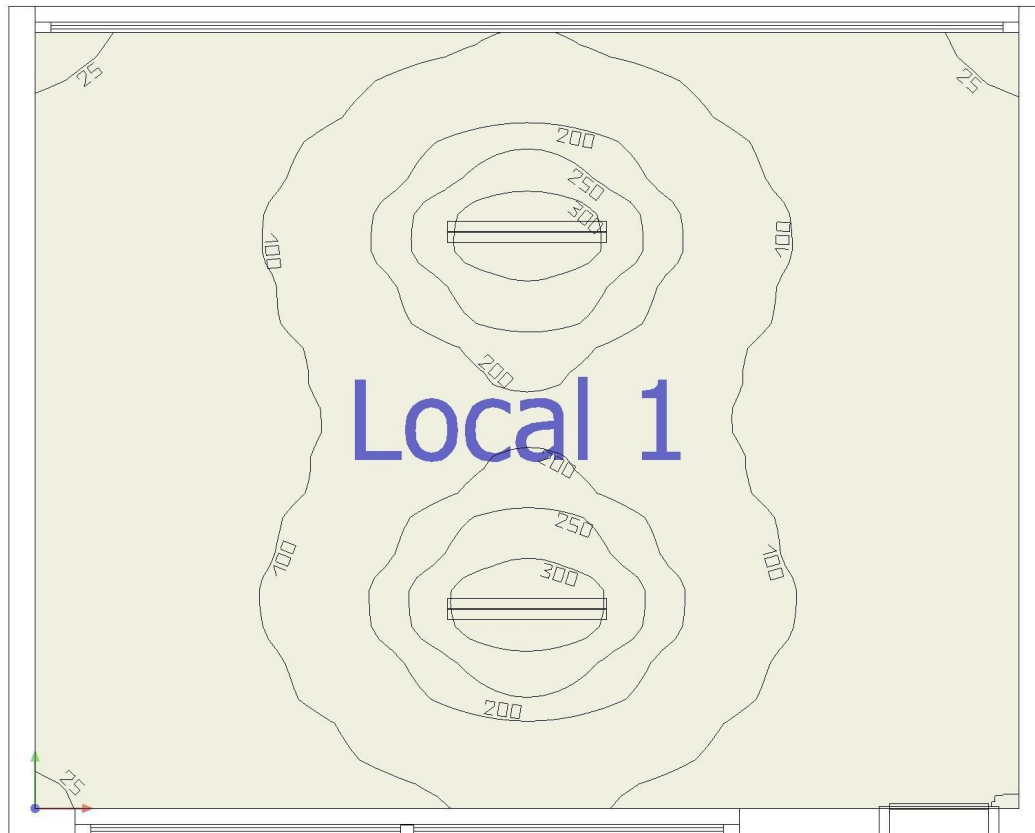
ESCALA: 1m = 0,6cm

Figura 4. Convenciones salón modelo. Fuente: Propia - Diseño en DIALux Evo

1. Ventana frontal
2. Puerta
3. Ventana posterior
4. Paredes
5. Techo

Salón modelo - 1 a 1 - tubo led

La siguiente figura muestra el salón modelo con un cambio 1 a 1 en las luminarias, esto quiere decir que se mantiene la misma posición de las convencionales y se cambia de tecnología.



ESCALA: 1m = 1,48cm

Figura 5. Salón modelo 1a1 tubo led 18W. Fuente: Propia - Diseño en DIALux Evo

Para entender un poco mejor la figura número 5, se debe tener en cuenta que el software permite realizar una simulación de la iluminación con la luminaria usada en ese momento, para efectos de prueba en este caso se tiene una luminaria de tipo tubo con tecnología LED de 18W indicando la cantidad de luxes que habría en cada espacio del salón.

En este momento, con el cambio 1 a 1 se puede indicar que hay un ahorro energético debido al cambio de tecnología, dando en este momento un total de **72W**, pero se puede observar que la cantidad de luxes por espacio decae bastante al alejarse de la luminaria, dando un promedio de 112 lx incumpliendo la **RESOLUCIÓN No. 180540 DE marzo 30 de 2010 del RETILAP** la cual indica que para un salón de clases debe de ser mínimo de **300 lx**, por esta razón se presenta el siguiente modelo.

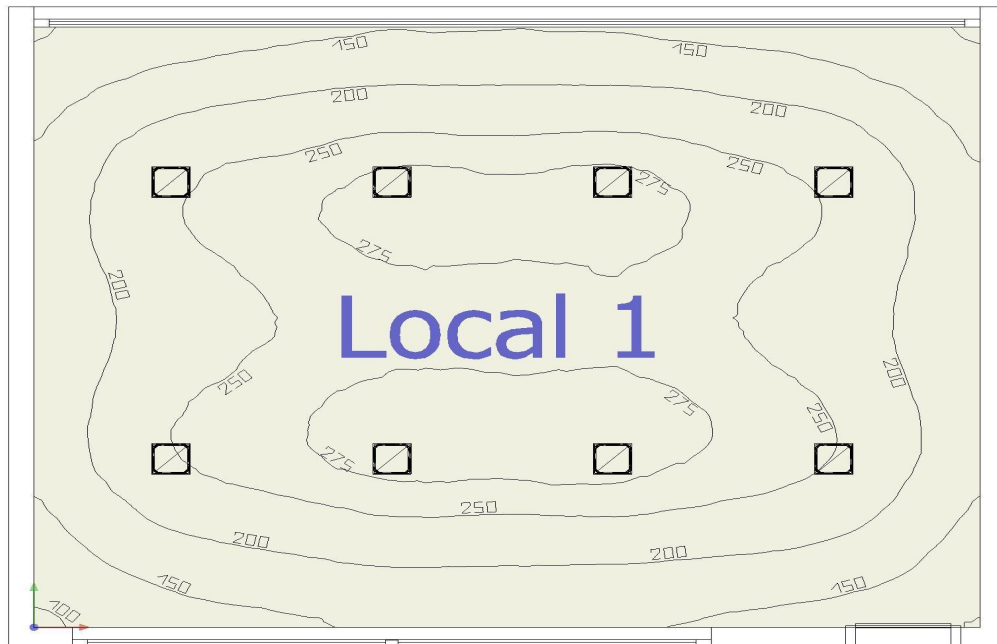
Salón modelo - diseño tubo LED 18W



ESCALA: 1m = 1,42cm

Figura 6. Salón modelo diseño tubo led 18W. Fuente: Propia - Diseño en DIALux Evo

En este diseño se tiene en total el uso de 6 luminarias led, dando un total de **108W** y una cantidad promedio de 215 luxes en el salón mostrando un aumento de luxes por área y una disminución en el consumo de las luminarias, de igual manera se presenta otro tipo de diseño con luminaria de panel led de 30x30 de 19W resultando como lo ve en la figura 7.



ESCALA: 1m = 1,42cm

Figura 7. Salón modelo diseño panel led 19W. Fuente: Propia - Diseño en DIALux Evo

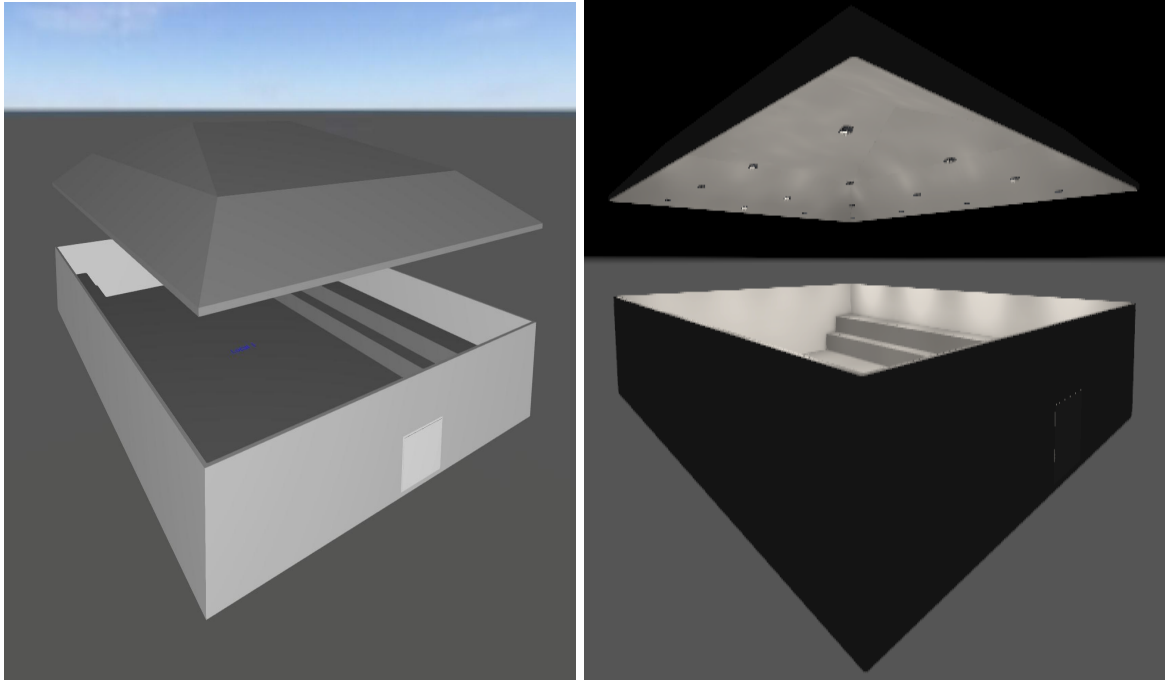
En este caso, para alcanzar los 200 lx mínimo se debe hacer uso de 8 luminarias de panel de 19W dando un total de **152W**.

Teniendo en cuenta los resultados de ambos diseños, la mejor opción para implementar será el diseño de la figura 6, cabe resaltar que estos resultados se emulan sin tener en cuenta la luz natural, siendo este, el peor de los casos, es decir, que se tendrá como mínimo 200 lx sin estar expuestos a luz natural.

Coliseo

Para el coliseo, el cual corresponde al índice 2 del plano mostrado en la figura 1, se tomaron las medidas de la altura, ancho y largo, teniendo en cuenta que la altura que se indica es la de las luminarias que hay actualmente en el coliseo, en este caso el diseño queda de la siguiente forma:

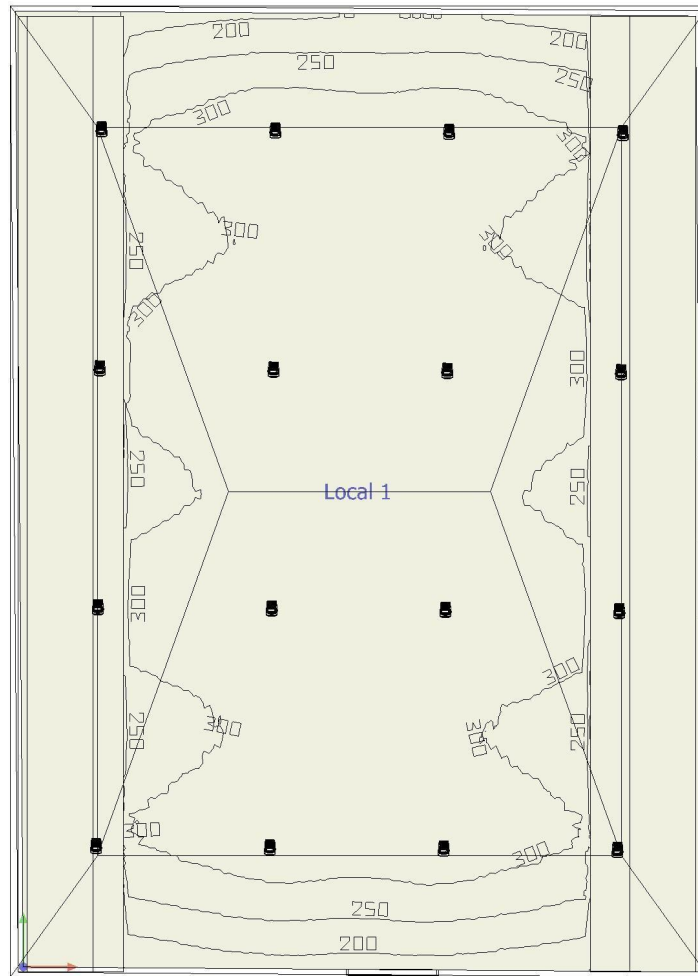
- Altura: 7.5 m
- Ancho: 25.8m
- Profundo: 36.3m



ESCALA: 1m = 0,18cm

Figura 8. Modelo Coliseo. Fuente: Propia - Diseño en DIALux Evo

En este caso se desea realizar un nuevo diseño desde cero debido a que en este momento las instalaciones y posiciones de los reflectores que se están usando no son las más adecuadas, cabe resaltar que actualmente la mayoría de reflectores son **Metal Halide** de **400W** cada uno y se cuenta con un total de 11 reflectores dentro del coliseo, obteniendo un consumo total de **4400W**.



ESCALA: 1m = 0,31cm

Figura 9. Coliseo diseño reflectores 200W. Fuente: Propia - Diseño en DIALux Evo

En este caso se realiza un diseño para alcanzar mínimo 300 lx en promedio en todo el coliseo, para lograr ello se deben usar 16 reflectores con tecnología LED de **200W** obteniendo como resultado un total de **3200W** indicando un ahorro y el aumento de luxes por espacio en el coliseo.

Sistema fotovoltaico

Para el diseño fotovoltaico se hará uso del consumo total indicado en la factura de la luz del colegio, para ello, se realiza un promedio del consumo de los siguientes meses: enero, febrero, marzo y abril, con el fin de tener un diseño más ajustado a los consumos mensuales del colegio.

En este sentido, el consumo total por hora del colegio según los recibos es de:

$$\text{Consumo Total} \times \text{hora} = 1400 \text{ Wh}$$

Una vez se tenga este dato, se puede sacar el consumo por mes:

$$\text{Consumo Total} = 1008 \text{ kWh/mes}$$

Cabe resaltar que este consumo es el realizado en pandemia, para efectos de diseño se tomará 3 veces este consumo, esto respaldado con la información dada por el colegio, la cual indica que en esta pandemia se vio reducida en una tercera parte el pago de energía dando como resultado lo siguiente:

$$\text{Consumo Total} = 3 \text{ MWh/mes}$$

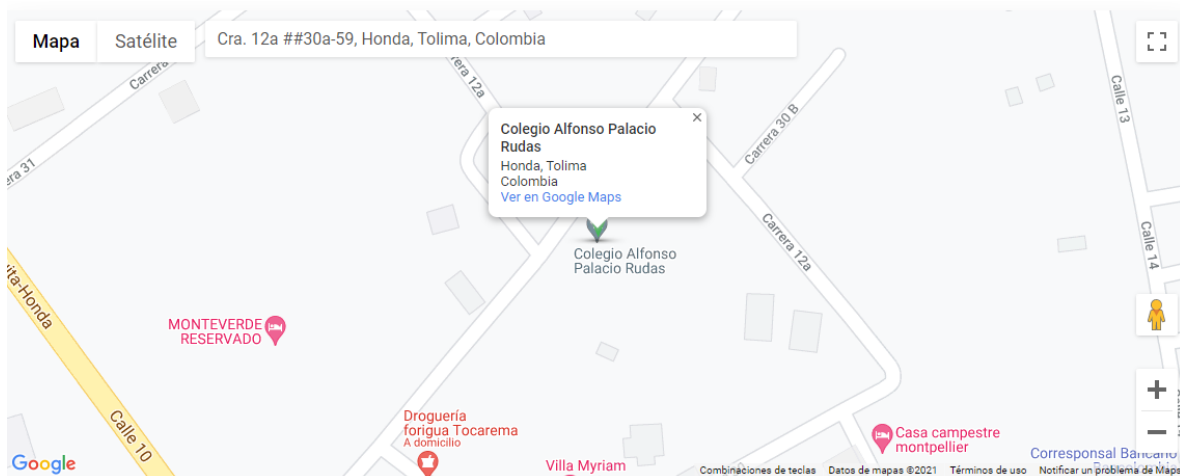
Una vez se tenga el consumo total del colegio por mes, se puede hallar la Potencia del generador fotovoltaico, mediante la ecuación 1:

$$P_{GFV} = \frac{\text{Consumo diario}}{\text{HSS} * \text{PR}} \quad (1)$$

Donde se necesitará el consumo diario, las Horas de Sol Estándar (HSS por sus siglas en inglés) y el Factor de pérdidas (PR), en este momento solo se tiene el consumo diario del colegio, que corresponde a:

$$\text{Consumo Diario} = 100 \text{ kWh/día}$$

Para obtener el HSS se usará una aplicación web que permite obtener datos relacionados a la energía solar dependiendo de la localización [19].



Como resultado se tiene un **HSS** de **4.9 H**.

Así como también se tomará la temperatura máxima y mínima de Honda – Tolima para calcular el PR igualmente se tomarán estos datos desde [19].

$$T_{min} = 24^{\circ} \text{ y } T_{max} = 34^{\circ}$$

Ya con esta información se evalúa el coeficiente de rendimiento (PR) máximo con el panel escogido a la temperatura promedio máxima de la zona, para este caso se seleccionó un panel de 200 W que corresponde a la ficha técnica del proveedor [20], este panel se selecciona por disponibilidad y condiciones. Primero que todo se necesita determinar la temperatura de la celda (T_c) con la Temperatura promedio máxima de la región (T_x), Temperatura de Operación Normal de la Celda ($NOCT$) del panel escogido y la irradiancia probable en la región (G_x) que por lo general se toma irradiancia estándar.

$$T_c = T_x + \frac{NOCT - 20^{\circ}C}{800} G_x \quad (2)$$

Reemplazando en la ecuación número 2 los valores da como resultado:

$$T_c = 34 + \frac{45 - 20^{\circ}C}{800} * 1000$$

$$T_c = 65.25^{\circ}C$$

Luego de esto se determina el delta de temperatura (ΔT) y el delta de potencia (ΔP) con el coeficiente de potencia del panel, dando como resultado lo siguiente:

$$\Delta T = T_c - 25^{\circ}C \quad (3)$$

$$\Delta T = 65.25^{\circ}C - 25^{\circ}C = 40.25^{\circ}C$$

$$\Delta P = \text{coeficiente de potencia} * \Delta T \quad (4)$$

$$\Delta P = -0.41 \frac{\%}{^{\circ}C} * 40.25^{\circ}C = -0.165$$

Ya con esta información se puede calcular el PR máximo y evaluar su resultado con el obtenido en la Potencia del Generador Fotovoltaico y en llegado caso redimensionándolo si es necesario.

$$PR_{m\acute{a}x} = 1 + \Delta P \quad (5)$$

$$PR_{m\acute{a}x} = 1 - 0.165 = 0.835 = 83\%$$

Siendo este valor el máximo de pérdidas que se pueden llegar a obtener, para efectos de diseño se tomará un **PR de 80%**.

Una vez obtenidos todos estos valores se puede retomar la ecuación número 1 y hallar la Potencia del generador fotovoltaico.

$$P_{GFV} = \frac{100 \text{ kWh/dia}}{4.9 * 0.8} = 25.5 \text{ kW}$$

Ahora con estos valores se debe de tener en cuenta las correcciones por temperatura del panel, para ello se debe determinar la temperatura de la celda a temperatura máxima y mínima y el delta de temperatura (ΔT) para ambos casos, para esto se toma la ecuación número 2 dando como resultado.

$$T_{Cmax} = 65.25^{\circ}C$$

$$T_{Cmin} = 55.25^{\circ}C$$

Y luego reemplazamos en la ecuación número 3.

$$\Delta T_{max} = 65.25^{\circ}C - 25^{\circ}C = 40.25^{\circ}C$$

$$\Delta T_{min} = 55.25^{\circ}C - 25^{\circ}C = 30.25^{\circ}C$$

Ahora se debe calcular el delta de voltaje (ΔV) y el delta de corriente (ΔI) para cada ΔT utilizando los coeficientes del panel dados en la ficha técnica, en este caso, son:

$$\text{Coeficiente de voltaje} = -0.31\%/^{\circ}C$$

$$\text{Coeficiente de corriente} = +0.06\%/^{\circ}C$$

Con estos valores se calcula el ΔV y el ΔI para ambas temperaturas:

$$\Delta V_{max} = \text{coeficiente de Voltaje} * \Delta T = -0,124775 \quad (6)$$

$$\Delta I_{max} = \text{coeficiente de Corriente} * \Delta T = 0,02415 \quad (7)$$

$$\Delta V_{min} = \text{coeficiente de Voltaje} * \Delta T = -0,093775 \quad (8)$$

$$\Delta I_{min} = \text{coeficiente de Corriente} * \Delta T = 0,01815 \quad (9)$$

Luego se calcula V_{OC} e I_{SC} para cada Temperatura, teniendo en cuenta que los datos nominales están dados en la ficha técnica.

$$V_{OC} = 27.86 V \text{ e } I_{SC} = 7.05 A$$

$$V_{OC(T_{max})} = V_{OC} * (1 + \Delta V_{max}) = 24.3837 V \quad (10)$$

$$I_{SC(T_{max})} = I_{SC} * (1 + \Delta I_{max}) = 7.22 A \quad (11)$$

Y lo mismo para la temperatura mínima:

$$V_{OC(T_{min})} = V_{OC} * (1 + \Delta V_{min}) = 25.2474 V \quad (12)$$

$$I_{SC(T_{min})} = I_{SC} * (1 + \Delta I_{min}) = 7.177 A \quad (13)$$

Una vez determinadas todos los factores de potencia y de temperatura se diseña el inversor, esta debe cumplir con el factor de dimensionamiento del inversor (FDI) con la siguiente ecuación:

$$FDI = \frac{P_{INVERSOR}}{P_{GFV}} \quad (24)$$

Donde los valores óptimos de FDI están entre los 0.8 y 1, en este caso se seleccionó un inversor de 20 kW [21] teniendo en cuenta la relación anterior, para ello se comprueba si el FDI está dentro de lo estipulado.

$$FDI = \frac{20 kW}{25.5 kW} = 0,792 \quad (24)$$

Como se ve en lo anterior no está entre los rangos estipulados para un correcto sobredimensionamiento del inversor, para ello se decide reducir la Potencia del generador fotovoltaico a **24 kW**, dando como resultado el siguiente **FDI = 0,83**.

Realizados todos estos cálculos se puede sacar el número total de paneles solares que correspondan a estas potencias halladas, para este caso, se tomará la potencia total que se desea sobre la potencia de un panel solar, en este caso **200W**, que dará como resultado un total de **120 paneles solares**.

Una vez se tenga la cantidad de paneles totales se debe de encontrar la mejor forma de conexión entre ellos, cumpliendo con los toques máximos y mínimos de voltaje y corriente que tienen el inversor por entrada, que en el caso de **Voltaje** el máximo por entrada es de **1000 V** y el de **Corriente** es de **33 A**. Dicho esto se sacan las posibles conexiones serie – paralelo entre los paneles solares y así hallar el voltaje y corriente dependiendo de la temperatura, así como lo muestra la siguiente tabla.

Serie	Paralelo	Tmáx		Tmín	
		VOC	ISC	VOC	ISC
120	1	2926,052	7,220	3029,691	7,177
60	2	1463,026	14,440	1514,845	14,355
40	3	975,350	21,660	1009,897	21,533
30	4	731,513	28,881	757,422	28,711
24	5	585,210	36,101	605,938	35,889
20	6	487,675	43,321	504,948	43,067
15	8	365,756	57,762	378,711	57,423
12	10	292,605	72,202	302,969	71,779
10	12	243,837	86,643	252,474	86,135
8	15	195,070	108,303	201,979	107,669
6	20	146,302	144,405	151,484	143,559
5	24	121,918	173,286	126,237	172,270
4	30	97,535	216,607	100,989	215,338
3	40	73,151	288,810	75,742	287,118
2	60	48,767	433,215	50,494	430,677
1	120	24,383	866,430	25,247	861,354

Tabla 1. Límites por conexión

Como se puede observar la fila que se sombrea de color amarillo es la única que cumple con los límites indicados en la ficha técnica del inversor. Una vez con el tipo de conexión que tendrá el diseño, se proponen los siguientes diagramas de conexiones.

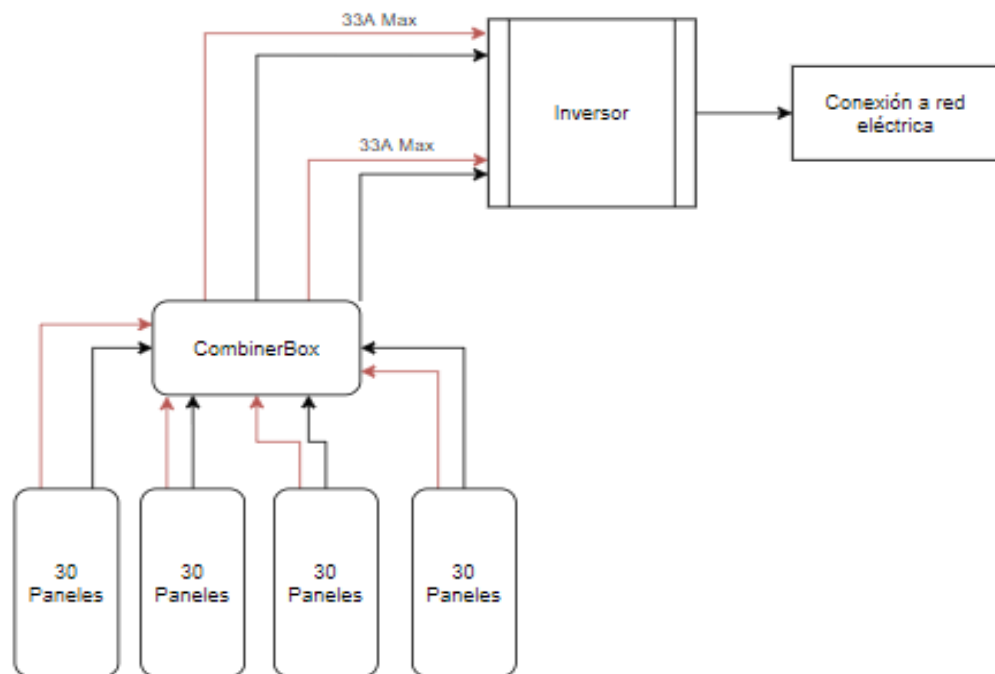


Figura 11. Diagrama de conexiones Fuente: Propia

Diagrama unifilar

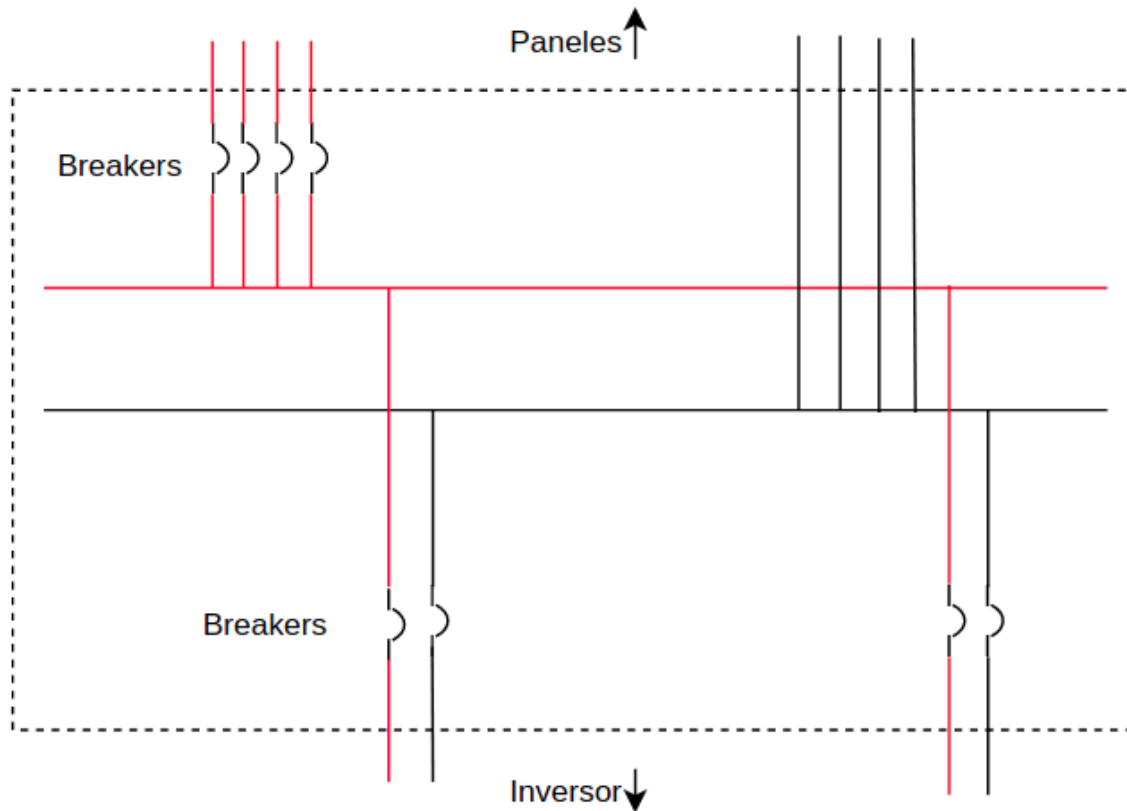


Figura 12. Diagrama unifilar. Fuente: Propia

Sistema fotovoltaico con led

El siguiente diseño permite combinar las dos anteriores propuestas, la cuales abarcan la implementación de tecnología LED y el diseño del sistema fotovoltaico para suplir el consumo de dichas luminarias. Para lograr esto se da por entendido que el consumo de energía de las luminarias es la tercera parte de la energía total consumida en el colegio, es decir, **1 MWh/mes**, al realizar el diseño de la figura 5 se tiene una reducción del **31%** del consumo, permitiendo un ahorro energético de **0.31 MWh/mes** por las luminarias LED, es decir, habrá un consumo de energía total de **2.69 MWh/mes**, entendido esto, se puede realizar la siguiente operación para hallar la generación total fotovoltaica para la alimentación de las luminarias LEDs.

$$P_{GFV} = 0.2 * 24 \text{ kW} = 4.8 \text{ kW}$$

En este caso se toma de referencia la potencia fotovoltaica de la segunda propuesta que son los **24 kW** y se multiplica por **0.2** que representa aproximadamente el consumo total de energía de las luminarias LED, dando como resultado que la potencia total del generador fotovoltaico debe ser de **4.8 kW**, ya

con esta información es posible hallar la cantidad de paneles fotovoltaicos que se deben agregar para generar esta potencia, dando como resultado un total de **24 paneles solares de 200W**, con esto en cuenta se puede hallar la producción mensual aproximada de este generador que como resultado es de **705 kWh/mes**, permitiendo ver que el consumo total por el colegio será de **1.795 MWh/mes**.

Análisis de ahorro

Planteadas las 3 propuestas se tienen diferentes opciones que le permitirán un ahorro energético al colegio, las cuales se muestran a continuación:

1. Implementando el diseño de la figura 6 en el edificio se tiene una reducción de aproximadamente el 31% de consumo energético de las luminarias, es decir, **0.31 MWh/mes** del total consumido por el colegio.
2. Implementando la propuesta del análisis fotovoltaico, se dimensiona para suplir en un 100% el consumo energético de todas las instalaciones del colegio, teniendo en cuenta que se deben instalar los **120 paneles** para generar **24 kW** diarios y que se cuenta con un **HSS de 4.9h**.
3. Implementando la propuesta del sistema fotovoltaico y uso de tecnología led, se tiene un ahorro de **705 KWh/mes**, quiere decir que al consumo total con luminarias LED que es de **2.69 MWh/mes** se le hará la reducción de esa parte producida por el generador fotovoltaico, es decir, que se verá reflejado un consumo total de aproximadamente de **1.985 MWh/mes** dejando ver que hay una reducción del **33.83%** en el consumo total de energía.

Análisis Financiero

Dados los anteriores análisis de ahorro por cada propuesta, se plantea un costo aproximado por la implementación de cada una de ellas.

1. En el caso de implementar la propuesta número 1, se propone por disponibilidad luminaria de tubo led de 18W, que en el mercado actual tiene un costo de **\$19.950 Pesos c/u**, es decir, por salón, un total de **\$119.700 Pesos**, teniendo esto en cuenta, se sabe que el cambio se hará para 21 salones, dando como resultado una inversión en luminarias de **\$2.513.700 Pesos**, donde el retorno de la inversión se dará por el ahorro en el consumo de luminarias. (Precio de la luminarias tomado de [25]).

Teniendo en cuenta los recibos de luz del colegio, se toma **\$4.000.000 Pesos** como el promedio mensual que pagan por energía, donde el ahorro

por luminarias LED será el **31%** de la tercera parte, es decir, aproximadamente **\$415.000 Pesos** mensuales, con los que se puede hallar el número de meses en los que se recuperará la inversión, en este caso aproximadamente **10 Meses**, considerando que la vida útil de las luminarias LED es de aproximadamente 36 meses se puede decir que se tendrá una ganancia en meses de 26, dando como resultado un valor de **\$10.790.000 Pesos**.

2. Para la propuesta en la que se desea suplir en totalidad el consumo del colegio, se da un aproximado del valor total con los elementos de mayor valor en el proyecto, que son los paneles solares y el inversor, en este caso, cada panel solar ya mencionado, tiene un costo **\$312.000 Pesos c/u**, es decir, para un total de 120 paneles solares, se tiene un resultado de **\$37.440.000 Pesos**, y para el inversor un valor de **\$14.263.968**, dando como resultado una inversión aproximada de **\$51.703.968 Pesos**, donde el retorno a la inversión se dará en el ahorro del consumo de energía total del colegio.(Precios tomados de [26-27])

En este caso, se toman los **\$4.000.000 Pesos** del consumo mensual y se resta el valor de consumo nocturno que es aproximadamente la cuarta parte del valor, es decir, **\$1.000.000 Pesos** según la información suministrada por el cliente, y considerando que en un promedio se tiene un valor de 4.9 horas de sol estándar por día, se podría estimar que el **41%** de los **\$3.000.000 Pesos** restantes serán cubiertos por el generador fotovoltaico, que corresponde a un ahorro aproximadamente de **\$1.230.000 Pesos** mensuales, con los que podemos hallar la cantidad de meses en los que se recuperará la inversión, dando como resultado aproximadamente **42 meses**, luego de esto, teniendo en cuenta que la vida útil de los paneles solares es de 20 años y su inversor de igual forma, se tiene una ganancia de **\$243.540.000 Pesos**

3. En la tercera propuesta se presenta una combinación de entre las dos anteriores, la cual lleva la inversión total en luminarias dada en la primera con un valor de **\$2.513.700 Pesos** y el uso del mismo panel solar pero en menor cantidad, dando un precio total de **\$7.488.000 Pesos** y con un inversor que se ajuste a las características ya planteadas, con un valor de **\$4.826.397 Pesos**, que corresponde a un inversor de 5kW, esto por disponibilidad en el mercado y los rangos de potencia que manejan desde fábrica, es decir, se tendrá una inversión de **\$14.827.397 Pesos**, donde el retorno a la inversión se dará por la implementación de las luminarias y uso de energía no convencional para el consumo de la misma. (Precios tomados de [25, 26, 28]).

Esta solución conlleva el ahorro inicial de la propuesta 1, en la que se tiene de **10.790.000 Pesos** por 26 meses, con el cambio de la luminaria y para el

generador fotovoltaico se comprende de un costo de **\$12.314.397 Pesos**. Luego de esto, se debe contemplar el ahorro de las luminarias en el consumo total, obteniendo un gasto mensual de **\$3.585.000 Pesos**, en este caso como el generador fotovoltaico solo se dimensionó para el consumo de energía de las luminarias, es decir, para un total de **0.69MW/h/mes** que corresponde a un gasto de aproximadamente **\$919.000 Pesos**, de lo que se debe considerar el **41%** de horas de sol estándar, dando como resultado que el valor cubierto por el generador será de **\$377.000 Pesos** mensuales, de los que se tendrá un retorno a la inversión en **33 meses**, permitiendo de esta forma, obtener una ganancia de **\$78.039.000 Pesos**.

8. Conclusiones

Teniendo en cuenta lo explicado anteriormente, se proponen 3 diferentes proyectos que tienen como objetivo obtener un ahorro en el consumo energético de una entidad por medio de un análisis técnico financiero, donde en cada propuesta se explican los costos, el retorno a la inversión y las ganancias aproximadas dependiendo de la vida útil de los elementos a implementar, por otro lado, el documento también permite tener un acercamiento de qué tan necesario y viable es realizar este tipo de proyectos, los cuales conllevan el cambio de tecnología en las luminarias y el uso de energía no convencional para suplir este consumo de las mismas.

Considerando las propuestas planteadas y viendo el tiempo en retornar la inversión, la mejor alternativa que garantiza una viabilidad financiera es la número 3, puesto que las ganancias que tienen al finalizar su retorno de inversión son mayores a las demás considerando su costo inicial, dicha propuesta retorna su inversión en los primeros **33 Meses** y sus ganancias se verán reflejadas durante los siguientes **207 Meses**, el cual representa un valor medio entre todas las propuestas.

Dicho esto, se da por entendido que el mejor proyecto desde una perspectiva de viabilidad técnica y financiera, es aquel que contempla la migración de luminarias a tecnologías LED e implementa un sistema fotovoltaico para suplir el consumo de las mismas.

Bibliografía

- [1] Martha Nuñez et al. "Estudio de percepción sobre energía limpia y auto sostenible". In: IJMSOR: International Journal of Management Science and Operation Research 3.1 (2018), pp. 11–15. URL: <http://ijmsoridi.com/index.php/ijmsor/article/view/89>.
- [2] Serrano, Ana & Martinez, Abelardo & Guarddon-Muñoz, Oscar & Santolaya-Sáenz, José. (2015). Analysis of energy saving in industrial LED lighting: A case study. DYNA. 82. 231-239. 10.15446/dyna.v82n191.45442.
- [3] Bravo Castro, "Propuesta de ahorro de energía con iluminación LED", Ingeniería, Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, 2018.
- [4] F. Li, D. Chen, X. Song and Y. Chen, "LEDs: A Promising Energy-Saving Light Source for Road Lighting," 2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2009, pp. 1-3, doi: 10.1109/APPEEC.2009.4918460.
- [5] O. A. Ogungbenro and M. C. Ndinechi, "Design, construction and testing of multipurpose energy saving LEDs and its implications on energy crisis in Nigeria," 3rd IEEE International Conference on Adaptive Science and Technology (ICAST 2011), 2011, pp. 226-230, doi: 10.1109/ICASTech.2011.6145175.
- [6] A. W. Louw and C. Neethling, "Digital LED lighting solutions," 2013 Proceedings of the 21st Domestic Use of Energy Conference, 2013, pp. 1-4.
- [7] M. F. Pinto, T. R. F. Mendonça, F. Coelho and H. A. C. Braga, "Economic analysis of a controllable device with smart grid features applied to LED street lighting system," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2015, pp. 1184-1189, doi: 10.1109/ISIE.2015.7281640.
- [8] D. Garcia-Llera et al., "Optimizing LED lamps design for street lighting with staggered arrangement allowing energy saving strategies in a Lighting Smart Grid context," 2015 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2015, pp. 1-8, doi: 10.1109/IAS.2015.7356872.
- [9] M. F. Pinto, T. R. F. Mendonça, C. A. Duque and H. A. C. Braga, "Street lighting system for power quality monitoring and energy-efficient illumination control," 2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2016, pp. 34-39, doi: 10.1109/ISIE.2016.7744861.
- [10] M. F. Lee and N. Q. Zulkafli, "A case study on energy saving through lighting system for building: An internal energy review," 2016 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), 2016, pp. 575-579, doi: 10.1109/PECON.2016.7951626.
- [11] S. Leva, F. Satta and A. Dolara, "Sustainable campus: Renovation of lighting fixtures for the reduction of CO2 emissions," 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/EEEIC.2017.7977537.
- [12] B. T. Jeremias, E. M. Yoxkin, J. R. T. Juan and R. G. Francisco, "Photovoltaic Energy, LED Technology and Energy Efficiency in the ITSAO," 2018 XXXI INTERNATIONAL SUMMER MEETING ON POWER AND INDUSTRIAL APPLICATIONS (RVP-AI), 2018, pp. 19-22, doi: 10.1109/RVPAI.2018.8469891.

- [13] K. R. Wagiman, M. N. Abdullah, M. A. M. Ariff and M. Y. Hassan, "Techno-economic analysis of lighting system retrofit at the industrial training institute," 5th IET International Conference on Clean Energy and Technology (CEAT2018), 2018, pp. 1-6, doi: 10.1049/cp.2018.1332.
- [14] A. Wiśniewski, "The Calculation of Energy Saving in use Light Management Systems," 2018 VII. Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4), 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/LUMENV.2018.8521043.
- [15] D. Li, Z. Kun and Q. Gao, "Zero Energy Consumption LED Intelligent Lighting System Based on the Technology of PoE," 2018 37th Chinese Control Conference (CCC), 2018, pp. 7639-7643, doi: 10.23919/ChiCC.2018.8483337.
- [16] M. M. Omran, V. Aziz and K. Youssef, "Energy Efficient Lighting System," 2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), 2019, pp. 307-310, doi: 10.1109/MEPCON47431.2019.9008179.
- [17] A. Suresh, J. P. Salis and K. R. Shailesh, "Lighting Optimization to save energy in an Indoor Sports Facility," 2019 Second International Conference on Advanced Computational and Communication Paradigms (ICACCP), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICACCP.2019.8883019.
- [18] C. D. Angie, A. G. Andrés, "Propuesta para el desarrollo de un proyecto fotovoltaico conectado a red en las instalaciones del hotel chicalá en la ciudad de Neiva, Huila", ingeniería eléctrica, universidad distrital francisco José de caldas, 2016
- [19] [Online] <https://ccee.mx/solar>
- [20] ECOGREENENERGY [Online] <https://autosolar.co/pdf/fichatecnica-1002123.pdf>
- [21] SMA [Online] <https://www.suncolombia.com/pdf/80.STPTLUS1230DUS173127Wnew-convertido-convertido.pdf>
- [22] UPME [Online] https://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf
- [23] MINENERGIA [Online] <https://www.minenergia.gov.co/retilap>
- [24] UPME [Online] <https://www1.upme.gov.co/Normatividad/196-2020.pdf>
- [25] MercadoLibre [Online] https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-615660278-tubo-led-luz-blanca-base-de-fijacion-120-centimetros-120-JM#position=5&search_layout=stack&type=item&tracking_id=8d37604c-1076-4b39-88a3-88cc07f30bce
- [26] AutoSolar [Online] <https://autosolar.co/paneles-solares-12v/panel-solar-200w-12v-policristalino-ecogreen>
- [27] SUNCOLOMBIA [Online] <https://www.suncolombia.com/product/inversor-sma-sunny-tripower-20000tl-stp-20000tl/>

[28] SUNCOLOMBIA [Online]

<https://www.suncolombia.com/product/inversor-sma-sunny-boy-5-0-us-sb5-0-1-us/>