

Viabilidad de la implementación de un sistema fotovoltaico para el suministro eléctrico de una mina en el municipio de Sardinata

Feasibility of the implementation of a photovoltaic system for the electrical supply of a mine in the municipality of Sardinata

Pablo Andrés Gómez Monsalve
Magister en Controles Industriales
Fundación de Estudios Superiores Comfanorte
ingpablogomez@gmail.com
Cúcuta-Colombia

Resumen

El presente artículo se fundamenta en el Estudio de Viabilidad de un Sistema Fotovoltaico para el suministro eléctrico de la mina la PIRAGUA ubicada en el municipio de Sardinata Norte de Santander, como una opción para mejorar la calidad del servicio eléctrico, ahorro de energía, aprovechamiento de los recursos naturales y con el objetivo de aportar una solución a un problema crucial como lo es la contaminación ambiental a consecuencia de la generación de electricidad a partir de fuentes convencionales de energía. El método consiste en conocer qué parte de la energía utilizada en la Mina la Piragua puede ser captada a través de la energía solar FV, con el objeto de proponer el reemplazo de los grupos electrógenos actuales y conseguir a mediano plazo un desarrollo industrial parcial sostenible. Este estudio se realizó para 3 secciones diferentes de la mina donde a partir de los resultados del análisis financiero se concluye que es posible implementar los sistemas para cada una de las secciones, pero sólo se lograría la recuperación de la inversión realizada y obtener unos ahorros por concepto de pago de la factura de energía durante la vida útil del sistema para la sección de equipos eléctricos del socavón de la mina. Finalmente se presentan especificaciones técnicas para la implementación de estos sistemas.

Palabras Clave: Carbón; mina; sistema fotovoltaico; viabilidad.

Abstract

The present research work is based on the Feasibility Study of a Photovoltaic System for the electrical supply of the PIRAGUA mine located in the municipality of Sardinata Norte de Santander as an option to improve the quality of electric service, energy saving, Use of natural resources and with the aim of providing a solution to a crucial problem such as environmental pollution as a result of the generation of electricity from conventional sources of energy. The method consists in knowing which part of the energy used in the Mine the Canoe can be captured through the PV solar energy, with the purpose of proposing the replacement of the current generators and obtaining in the medium term a development Industrial sustainable development. This study was performed for 3 different sections of the mine where from the results of the financial analysis it is concluded that it is possible to implement the systems for each of the sections, but only the recovery of the investment made and obtain savings by Concept of payment of energy bill over the life of the system for the section of mine underground electrical equipment. Finally, technical specifications are presented for the implementation of these systems.

Keywords: Coal; mine; photovoltaic system; feasibility.

Revista Mundo Fesc, 13, Enero- Junio 2017.

ISSN (Impreso) 2216-0353, ISSN (En Línea) 2216-0388

Forma de citar: Gómez, P.A. (2017). Viabilidad de la implementación de un sistema fotovoltaico para el suministro eléctrico de una mina en el municipio de Sardinata. Mundo Fesc, 13, 86-97.

Recibido: 2 Septiembre de 2016.

Aceptado: 9 Diciembre de 2016.

1. Introducción

La sociedad moderna se está viendo enfrentada a una serie de fenómenos naturales de alto impacto que los expertos no dudan en atribuir a los efectos del cambio climático en el mundo, para esto se ha propuesto de manera general la utilización de recursos renovables para la producción de energía eléctrica y su uso local o transmisión a los sitios donde sea requerida.

Los recursos renovables ofrecen la oportunidad de obtener energía para diversas aplicaciones. Su aprovechamiento tiene menores impactos ambientales que el de las fuentes convencionales, y ofrecen el potencial para satisfacer la totalidad de nuestras necesidades de energía, presentes y futuras. Además, su utilización contribuye a conservar los recursos energéticos no renovables y propicia el desarrollo regional (González, 2008).

La investigación se realizó con el interés de aportar una solución a un problema crucial contemporáneo como lo es la contaminación ambiental a consecuencia de la generación de electricidad a partir de fuentes convencionales de energía y el aumento de los costos de la energía eléctrica tradicional. Esta situación se va volviendo más crítica según aumenta la demanda del recurso energético debido al crecimiento poblacional y al continuo desarrollo de tecnologías que son dependientes del suministro eléctrico (Camargo & Dallos, 2011). Por este motivo, se han venido desarrollando alternativas a este escenario que impliquen el aprovechamiento de recursos renovables como lo es la energía solar que, siendo limpia e inagotable, representa beneficios a largo plazo en lo que respecta a la satisfacción de las necesidades energéticas del hombre (Fernández, 2010).

2. Marco Teórico

2.1 Energía Solar

Se llama energía solar a la energía de radiación obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol. Como resultado de reacciones nucleares de fusión, y que llega

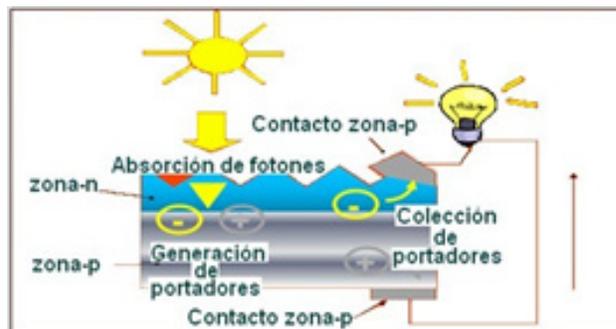
a la Tierra (infrarrojo, luz visible y ultravioleta).

La intensidad de la radiación solar en el borde exterior de la atmósfera se llama constante solar, y su valor medio es $700 \text{ [W/m}^2\text{]}$, pero debido a la absorción y a la dispersión de la radiación al interactuar los fotones con la atmósfera, determina una intensidad real disponible menor que incide en la superficie terrestre (Gacitua, 2011).

2.2 Panel Fotovoltaico

Un panel fotovoltaico funciona utilizando en forma directa la luz solar, la que al incidir en la celda libera los electrones que pueden ser atrapados por el campo eléctrico basada en el denominado “efecto fotovoltaico”, o producción de una corriente eléctrica. El efecto se produce en las capas de semiconductores como consecuencia de la absorción de radiación luminosa, que es donde se crea la corriente de Electrones. Estos semiconductores son especialmente tratados para formar dos capas diferentes (tipo p y tipo n) y formar un campo eléctrico, positivo en una parte y negativo en la otra.

En la Figura 1 se muestra en forma Gráfica el principio del funcionamiento de los paneles



solares.

Figura 1. Diagrama principio fotovoltaico.

Fuente: Martínez, 2003

La característica eléctrica de una celda FV está dada por su curva característica I-V, que muestra la corriente I (en Ampere, [A]) que fluye a través de la celda, en función de la tensión V (en Volt, [V]), que existe entre los bordes de la celda. La

curva depende de la intensidad de la radiación incidente [W/m^2] y de la temperatura de la celda (Martínez, 2003).

2.2.1 Tipos de paneles fotovoltaicos.

Hoy en día existen varios tipos de paneles fotovoltaicos se caracterizan, desde un punto de vista eléctrico, por una serie de parámetros o curvas, y es posible clasificarlos ya sea por el material de construcción o por su proceso de fabricación; entre los más usados se encuentran:

Paneles monocristalinas de silicio: Están fabricadas de un cristal. Estas celdas son relativamente caras, pero alcanzan eficiencias del orden del 25%.

Paneles policristalinas de silicio: Están formadas por varios granos cristalinos unidos de forma aleatoria entre ellos. El proceso para producirla es más simple y se alcanzan eficiencias del orden del 20 %.(Martínez, 2003).

2.2.2. Componentes de una Instalación de Paneles Fotovoltaicos.

Los componentes esenciales de una instalación solar con paneles fotovoltaicos varían según su esquema, el cual puede ir desde un par de kW (kilowatt, unidad de potencia) en una instalación residencial hasta decenas de MW (en una generación a gran escala. Es posible hacer instalaciones de gran escala aplicables a grandes



Figura 2. Instalación solar fotovoltaica con inversor, utilización a 120VCA.
Fuente: Escobar, 2013

Una instalación de gran escala para aplicaciones industriales requiere de una mayor superficie expuesta a la radiación solar, pudiendo ser de unas

pocas a cientos de hectáreas, dependiendo de la magnitud del proyecto. Estas instalaciones se han masificado en el último tiempo y operan como una central de generación, inyectando la energía en las líneas de transmisión o distribución del sistema eléctrico (Escobar, 2013).

Los componentes de la instalación son los siguientes:

Panel: el panel fotovoltaico se forma por la unión eléctrica de varias celdas encargadas de transformar de una manera directa la energía de la radiación solar en electricidad, en forma de corriente continua. Puede estar compuesto de uno o más grupos de celdas conectados en serie o en paralelo (con unión por una parte de los polos positivos y, por otro, de los negativos), según el voltaje o la intensidad de corriente que se quiere alcanzar. La característica principal del panel fotovoltaico es su curva I-V. Si el panel fotovoltaico se constituye de celdas de igual curva I-V, todas en buen estado (sin errores de conexión), la curva I-V del panel será proporcionalmente idéntica a la de la celda.

Control y acondicionador de potencia: la finalidad de este componente es producir un correcto acople entre el panel, la acumulación y la carga (aplicaciones).

Baterías de acumulación: la batería es un dispositivo que tiene como función almacenar la electricidad generada por el panel FV y suministrarla a los equipos de uso cuando ésta sea demandada. Normalmente ocurre que el ciclo de demanda de energía no coincide con la disponibilidad de energía generada por el panel FV, por lo tanto se recurre a la acumulación de energía.

Una ventaja de las baterías es que impone una fuente de voltaje constante entre el panel y la carga, por lo que el panel opera con mayor eficiencia ya que se encuentra trabajando más cerca de los puntos de potencia máxima.

Arreglo de paneles: los paneles fotovoltaicos se disponen en grupos, cuya configuración depende principalmente del sistema de seguimiento. La configuración del arreglo de paneles fotovoltaicos incide en el tipo de estructura de soporte que se utiliza para la instalación de los paneles fotovoltaicos (Calvo, 2009 y Escobar, 2013).

3. Metodología

Para este estudio se aplicó una investigación de tipo exploratoria donde se realizó una estimación de las condiciones de radiación solar en el sector donde se encuentra ubicada la mina. Con esta información se realizará el cálculo independiente del requerimiento total de energía eléctrica para las siguientes secciones: 1) Iluminación en el socavón de la mina. 2) Equipos eléctricos en el socavón de la mina. 3) Campamento minero, ya obtenidos estos datos se desarrolla la ingeniería básica para la implementación independiente de cada una de las secciones. con las características de los equipos se procede a desarrollar el estudio financiero para la implementación del sistema fotovoltaico en cada sección.

4. Resultados

4.1 Radiación solar

Para realizar el sistema solar fotovoltaico se requiere contar con información sobre la disponibilidad solar en el municipio de Sardinata, la cual tiene una medida correspondiente a radiación solar global sobre superficie horizontal con unidades de kWh/m².

Para la obtención de estos datos se ingresó a la página del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia). Donde cuentan con mapas solares como se ve en la figura 3.

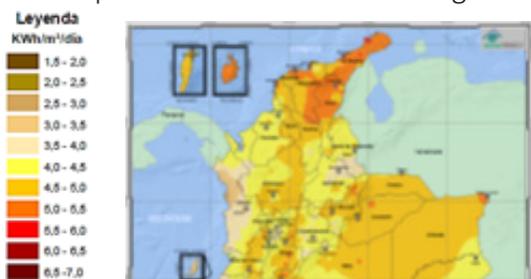


Figura 3. Mapa radiación solar Colombia
Fuente: IDEAM, 2016.

Con esta información se puede observar que la radiación promedio en el área de Cúcuta y alrededor esta 4,0 -4,5 kWh/m² según la escala de colores usada por IDEAM.

En figura 4 se puede observar con la tendencia mensual de la radiación solar mostrando una información promedio mensual de radiación y los meses donde se tendrá menor radiación solar (IDEAM, 2016).

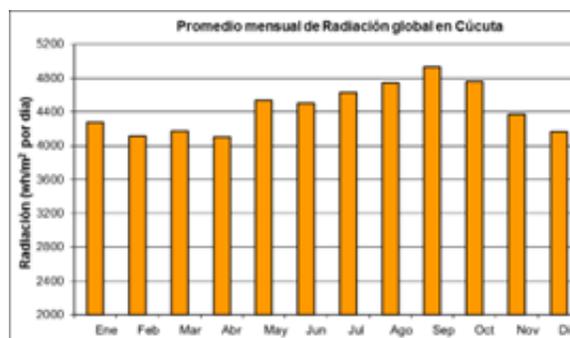


Figura 4. Promedio mensual de radiación global en Cúcuta
Fuente: IDEAM, 2016

4.2 Diseño del sistema solar fotovoltaico aislado

4.2.1 Diagnóstico de consumo mensual

Para realizar este diagnóstico fue necesario consultar los costos que se generan por el uso de la fuente actual de generación de electricidad, por parte de la compañía eléctrica.

El periodo de conexión a la red de suministro de energía eléctrica que se analizó para el desarrollo de esta investigación fueron las facturas en el periodo comprendido de Febrero de 2016 a junio de 2016. De estas cinco facturas se obtuvieron los datos de consumo en kWh, la tarifa aplicada por kWh, y el costo por factura como se ve en la tabla 1.

Tabla 1
Información extraída de las facturas de los últimos 5 meses

Mes	Tarifa aplicada	Consumo mes(kWh)	Costo en pesos
Febrero	359,12	11440	4108333

Marzo	364,51	17160	6254992
Abril	369,97	11880	4395244
Mayo	375,52	12980	4874250
Junio	381,16	14960	5702154

Fuente: Autor.

Analizando la tabla 1 se encontró que el costo por kWh tiene un incremento mensual del 1,5%, si esta tasa de incremento continúa en diciembre del 2016 el costo por kWh será de 416,78 eso quiere decir que si en junio 2016 el costo por 14960 kWh fue de 5,702,154 pesos y en diciembre por esa misma cantidad se cancelaría 6,235,029 pesos, teniendo un incremento de 532.875 pesos más que en el mes de junio. Con esto se puede ver que el uso del servicio de energía tradicional tiende a ir en aumento. En la figura 5 se observa una proyección del aumento del costo del kWh si este permanece constante.

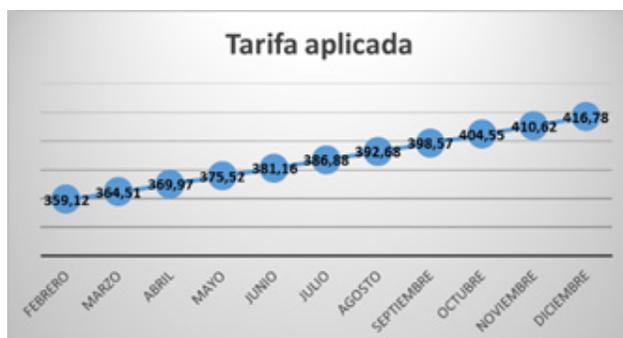


Figura 5. Estimación del aumento en el costo del kWh por mes del año 2016.

Fuente: Autor

4.2.2 Disponibilidad del recurso solar

Para determinar la disponibilidad de radiación solar se tomaron los datos del mes con el índice más bajo, como se puede ver en la figura 5 los meses de febrero y abril presentaron una 4,1 kWh/m².

4.2.3 Horas solares pico HSP

Para calcular las HSP se utilizó la siguiente ecuación:

$$HSP = k * \text{radiación mínima kWh}$$

Donde k es un valor de corrección atmosférica que se determina según el ambiente al que están expuestos los paneles solares en este caso de estudio se usa 0,9 ya que está en una zona con presencia de carbono.

$$HSP = (0.95) * 4,1 \text{ kWh} = 3.9 \text{ h}$$

4.3 Consumo iluminación en el socavón de la mina

Para esta sección se realizó un recorrido por el socavón observando el tipo de bombillos que utilizaban y cuantos se encontraban en funcionamiento como se puede ver en la figura 6.



Figura 6. Iluminación del socavón mina LA PIRAGUA
Fuente: Autor

Según lo encontrado y la información suministrada por el Técnico Electricista la cantidad de bombillos en total son 20, después de esta información se habló con el Ingeniero de Minas y quien indicó que se desean colocar 20 bombillos más para iluminar otras secciones del socavón; con esta información se determinó que el consumo total de energía simultánea era de 12.472(kWh/día) sumándole un margen del 25% por seguridad da un total de 15.59 (kWh/día).

4.3.1 Costo

Para la implementación de este sistema se aconseja utilizar kits solares ya que estos suministran la cantidad kWh estos kits están entre 8000 y 10000 euros siendo más económicos que comprar sus partes por separado.

El kit con mejor prestación fue el suministrado por la página Auto solar que trabaja con este tipo

de cargas y su fabricante INGETEAM con un costo de 8002.15 euros (Kit Solar Autoconsumo Baterías 3000W 15000Wh/día) (Autosolar, s.f.). Con el precio actual \$3.214 pesos por euro el kit tendría un costo aproximado de \$30.720.000 con envío.

4.4 Consumo campamento minero

Se realizó una inspección del campamento recopilando información de los equipos eléctricos como se observa en la figura 7.



Figura 7. Campamento LA PIRAGUA

Fuente: Autor

Con la información se determinó que el consumo total de energía simultánea era de 41.7 (kWh/día) sumándole un margen del 25% por seguridad da un total de 52(kWh/día).

El resultado anterior da un valor estimado de todos los equipos consumiendo simultáneamente, se aplicó un factor del 60%, lo cual indica que el 60% de consumo total diario considerado estará funcionando de manera simultánea, esto en razón de no sobredimensionar el sistema.

$$E_{total\ consumida} = 52 * 60\% = 31.2\ kWh\ por\ día$$
$$31,2 = 31\ kWh/día$$

4.4.1 Costo

El kit con mejor prestación fue el suministrado por la página Auto solar que trabaja con este tipo de cargas y su fabricante INGETEAM con un costo de 17166,15 euros. (Kit Solar Autoconsumo Baterías 6000W 33000Wh/día) (Autosolar, s.f.). Con el precio actual \$3.214 pesos por euro el kit tendría

un costo aproximado de \$60.173.000 pesos con envío.

4.5 Equipos eléctricos en el socavón de la mina

Debido a que la empresa no contaba con la documentación de todos los equipos presentes en el socavón de la mina, se realizó un recorrido recopilando la información de los equipos eléctricos como se observa en la figura 8 tomando información de los equipos más críticos y con más demanda de uso entre ellos: ventiladores industriales, motores, malacate.

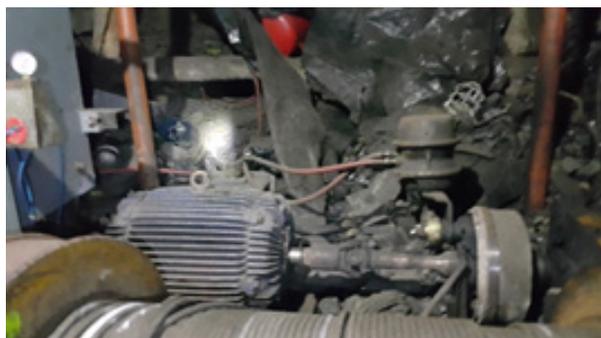


Figura 8. Equipos eléctricos presentes en el socavón de la mina LA PIRAGUA

Fuente: Autor

La sumatoria de consumos de energía alcanza un valor aproximado de 524 kWh(valor con el margen del 25%) por día, ya que esto es un valor estimado de todos los equipos consumiendo simultáneamente, se aplicó un factor del 85%, lo cual indica que el 85% de consumo total diario considerado estará funcionando de manera simultánea, esto en razón de no sobredimensionar el sistema.

$$E_{total\ consumida} = 524 * 85\% = 445,4\ kWh\ por\ día$$
$$445,4 = 445\ kWh/día$$

Como no se encuentra kits para suministra esta potencia se realizan los cálculos de manera separada para dar un estimado en costos del sistema.

4.5.1 Número de Paneles solares

Para el Cálculo del Número de Paneles solares se

aplica la siguiente ecuación

$$NT = \frac{445000Wh}{310 * 3.9 * 0.9} = 409 \text{ paneles solares}$$

NT: Número Total de Paneles solares

Lmacrit=energía total consumida

PMPP= Potencia Pico del Módulo seleccionado

HPScrit= Horas de sol pico del mes crítico.

PR = Factor Global de Funcionamiento, se asumirá 0.9

$$NT = \frac{L_{mdcrit}}{P_{MPP} * HPS_{crit} * PR}$$

4.5.2 Costo

Tabla 2

Costo del sistema para los equipos eléctricos del socavón

Artículo	Cantidad	Precio unit	Precio total
Panel	409	\$1.000.000	\$409.000.000
Inversor	9	\$ 20.600.000	\$185.400.000
Soporte	\$ 1.070.000 para 16 paneles		\$26.750.000
Material eléctrico	\$6.447.302		
VALOR TOTAL DE LA INVERSIÓN	\$627.597.302		

Para este sistema no se implementó el uso de baterías ya que el costo del mismo tendría un incremento considerable por consiguiente la energía suministradas durante los periodos con ausencia de radiación solar serán realizados por la empresa de servicio público.

4.6 Evaluación de los beneficios financieros

Al implementar el sistema fotovoltaico en la mina LA PIRAGUA para cada sección se lograra cubrir parte o la totalidad de la demanda energética como consecuencia de esto el costo por pago a la empresa de suministro eléctrico disminuirá, lo que significa un ahorro que a través del periodo de vida útil del sistema se irá acumulando. Se tiene en cuenta:

- La vida útil del panel, en este caso es de 25

años.

- Los costos de kWh proyectados.
- El consumo energético de referencia sobre el cual fue dimensionado el sistema solar fotovoltaico, para cada sección

4.7 Cálculo del ahorro anual por sistema

Utilizando la ecuación línea para calcular el incremento anual del kWh (Guevara & Pérez, 2015).

$$C_{Anual} = (0,67977 * A) + P_k$$

Donde:

A = #año

Pk= Promedio kWh del último año

Para cada sección se tienen un sistema independiente los cuales están diseñados para cubrir las necesidades calculadas para cada uno, en el momento en que esta sea mayor, el valor restante pasará a ser cubierto por el suministro de la red generando costos.

4.7.1 Ahorro sección de iluminación del socavón anual

Usando el método período de recuperación el ahorro que se logra a los 25 años (vida útil del sistema) corresponde a \$54.222.000, y la recuperación de la inversión se logra a los 15 años. Se debe recordar que este ahorro representan los valores que se obtendría cuando la demanda de energía eléctrica no supera los 15 kWh al día el cual es cubierto por el sistema solar fotovoltaico y en la noche por la carga de las baterías. Se debe tener en cuenta que por ser un sistema solar fotovoltaico conectado a la red, y en cuyo caso existirá una demanda de energía mayor por inclusión de nuevos elementos estos serán cubiertos por la compañía eléctrica.

Aplicando el método anterior, esta indica que la recuperación sería a los 14 años de la vida útil del sistema, para obtener una información más precisa se debe tener en cuenta que el sistema adicionalmente incurre en costos de propiedad y uso.

Para calcular el costo de propiedad y uso del sistema se tuvo en cuenta la depreciación, y el costo de capital.

4.7.1.1 Costo de propiedad y uso del sistema de iluminación

Tabla 3

Diferencia entre ahorro y costo de propiedad y uso anual sistema de iluminación

AÑO	AHORRO ACO- MULADO	COSTO DE ILU- MINACIÓN	TOTAL X AÑO
1	\$ 2.124.219	\$ 29.491.200	-\$ 27.366.981
2	\$ 4.252.160	\$ 28.262.400	-\$ 24.010.240
3	\$ 6.383.823	\$ 27.033.600	-\$ 20.649.777
4	\$ 8.519.207	\$ 25.804.800	-\$ 17.285.593
5	\$ 10.658.313	\$ 24.576.000	-\$ 13.917.687
6	\$ 12.801.141	\$ 23.347.200	-\$ 10.546.059
7	\$ 14.947.690	\$ 22.118.400	-\$ 7.170.710
8	\$ 17.097.962	\$ 20.889.600	-\$ 3.791.638
9	\$ 19.251.955	\$ 19.660.800	-\$ 408.845
10	\$ 21.409.669	\$ 18.432.000	\$ 2.977.669
11	\$ 23.571.106	\$ 17.203.200	\$ 6.367.906
12	\$ 25.736.264	\$ 15.974.400	\$ 9.761.864
13	\$ 27.905.144	\$ 14.745.600	\$ 13.159.544
14	\$ 30.077.746	\$ 13.516.800	\$ 16.560.946
15	\$ 32.254.069	\$ 12.288.000	\$ 19.966.069
16	\$ 34.434.115	\$ 11.059.200	\$ 23.374.915
17	\$ 36.617.882	\$ 9.830.400	\$ 26.787.482
18	\$ 38.805.370	\$ 8.601.600	\$ 30.203.770
19	\$ 40.996.581	\$ 7.372.800	\$ 33.623.781
20	\$ 43.191.513	\$ 6.144.000	\$ 37.047.513
21	\$ 45.390.167	\$ 4.915.200	\$ 40.474.967
22	\$ 47.592.542	\$ 3.686.400	\$ 43.906.142
23	\$ 49.798.640	\$ 2.457.600	\$ 47.341.040
24	\$ 52.008.459	\$ 1.228.800	\$ 50.779.659
25	\$ 54.222.000	\$ 0	\$ 54.222.000

Fuente: Autor.

Como se observa en la tabla 3 a partir de 10 años de la vida útil, el ahorro estimado es mayor al costo de propiedad y uso por lo que a partir de ahí se empieza a obtener un ahorro real.

Con estos datos, se puede ver que al final de la vida útil los ahorros dados por costo de electricidad alcanzan para recuperar la inversión inicial.

4.7.1.2 Valor presente neto y tasa interna de retorno sistema de iluminación

Tabla 4

Ensayo-error para el cálculo de la TIR sistema de iluminación

VPN ILUMINACIÓN	
TASA (%)	VPN (\$)
3%	\$ 109.974.202
4%	\$ 69.805.310
5%	\$ 37.535.197
6%	\$ 11.587.924
7%	\$ 584.577
6.53%	\$ 0
7%	-\$ 9.284.621
8%	-\$ 34.088.416
10%	-\$ 33.423.127

Fuente: Autor.

A partir de la tabla 4 se puede observar el comportamiento del VPN del proyecto a diferentes tasas de descuento; la TIR se encuentra entre 6-7% y por ensayo-error se obtiene un valor aproximado con la desventaja de que se requiere el uso de mayor cantidad de cifras significativas para que el VPN se haga cero.

4.7.2 Ahorro sección equipos eléctricos en el socavón de la mina anual

Usando el Método período de recuperación el ahorro que se logra a los 25 años corresponde a \$1.608.585.997, y la recuperación de la inversión se logra a los 10 años. Se debe recordar que este ahorro representan los valores que se obtendría cuando la demanda de energía eléctrica no supera los 445 kWh al día el cual es cubierto por el sistema solar fotovoltaico. Se debe tener en cuenta que por ser un sistema solar fotovoltaico conectado a la red, y en cuyo caso existirá una demanda de energía mayor por inclusión de nuevos elementos estos serán cubiertos por la compañía eléctrica así como el consumo en horas nocturnas.

4.7.2.1 Costo de propiedad y uso del sistema para equipos eléctricos del socavón

Tabla 5

Diferencia entre ahorro y costo de propiedad y uso anual sistema de los equipos eléctricos del socavón

AÑO	AHORRO ACOMULADO	COSTO DE ELÉCTRICOS DEL SOCAVÓN	TOTAL X AÑO
1	\$ 63.018.500	\$602.493.410	-\$ 539.474.910
2	\$ 126.147.412	\$577.389.518	-\$ 451.242.106
3	\$ 189.386.735	\$552.285.626	-\$ 362.898.891
4	\$ 252.736.471	\$527.181.734	-\$ 274.445.263
5	\$ 316.196.617	\$502.077.842	-\$ 185.881.225
6	\$ 379.767.176	\$476.973.950	-\$ 97.206.774
7	\$ 443.448.146	\$451.870.058	-\$ 8.421.912
8	\$ 507.239.527	\$426.766.166	\$ 80.473.361
9	\$ 571.141.321	\$401.662.274	\$ 169.479.047
10	\$ 635.153.526	\$376.558.382	\$ 258.595.144
11	\$ 699.276.142	\$351.454.490	\$ 347.821.652
12	\$ 763.509.170	\$326.350.598	\$ 437.158.572
13	\$ 827.852.610	\$301.246.706	\$ 526.605.904
14	\$ 892.306.462	\$276.142.814	\$ 616.163.648
15	\$ 956.870.725	\$251.038.922	\$ 705.831.803
16	\$ 1.021.545.400	\$225.935.030	\$ 795.610.370
17	\$ 1.086.330.486	\$200.831.138	\$ 885.499.348
18	\$ 1.151.225.984	\$175.727.246	\$ 975.498.738
19	\$ 1.216.231.894	\$150.623.354	\$ 1.065.608.540
20	\$ 1.281.348.215	\$125.519.462	\$ 1.155.828.753
21	\$ 1.346.574.948	\$100.415.570	\$ 1.246.159.378
22	\$ 1.411.912.093	\$75.311.678	\$ 1.336.600.415
23	\$ 1.477.359.649	\$50.207.786	\$ 1.427.151.863
24	\$ 1.542.917.617	\$25.103.894	\$ 1.517.813.723
25	\$ 1.608.585.997	\$0	\$ 1.608.585.997

Fuente: Autor.

Como se observa en la tabla 5 a partir de 8 años de la vida útil, el ahorro estimado es mayor al costo de propiedad y uso por lo que a partir de ahí se empieza a obtener un ahorro real.

Con estos datos, se puede ver que al final de la vida útil los ahorros dados por costo de electricidad alcanzan para recuperar la inversión inicial.

4.7.2.2 Valor presente neto y tasa interna de retorno del sistema para equipos eléctricos del socavón

Tabla 6

Ensayo-error para el cálculo de la TIR del sistema para equipos eléctricos del socavón

VPN EQUIPOS	
TASA (%)	VPN(\$)
3%	\$ 6.219.169.857
4%	\$ 4.838.438.588
5%	\$ 3.713.118.483
6%	\$ 2.793.525.066
7%	\$ 2.040.167.512
8%	\$ 1.421.555.687
9%	\$ 912.499.118
10%	\$ 492.783.338
11%	\$ 146.136.659
11,49%	\$ 0
12%	-\$ 140.578.870

Fuente: Autor.

A partir de la tabla 6 se puede observar el comportamiento del VPN del proyecto a diferentes tasas de descuento; la TIR se encuentra entre 11-12% y por ensayo-error se obtiene un valor aproximado con la desventaja de que se requiere el uso de mayor cantidad de cifras significativas para que el VPN se haga cero.

4.7.3 Ahorro sección campamento anual

Usando el Método período de recuperación el ahorro que se logra a los 25 años corresponde a \$112.058.800, y la recuperación de la inversión se logra a los 14 años. Se debe recordar que este ahorro representan los valores que se obtendría cuando la demanda de energía eléctrica no supera los 31 kWh al día el cual es cubierto por el sistema solar fotovoltaico y en la noche por la carga de las baterías. Se debe tener en cuenta que por ser un sistema solar fotovoltaico conectado a la red, y en cuyo caso existirá una demanda de energía mayor por inclusión de nuevos elementos estos serán cubiertos por la compañía eléctrica.

4.7.3.1 Costo de propiedad y uso del sistema para el campamento

Tabla 7
Diferencia entre ahorro y costo de propiedad y uso anual para el campamento

CAMPAMENTO			
AÑO	AHORRO ACO- MULADO	CTO CAMPAME- TO	TOTAL X AÑO
1	\$ 4.390.053	\$ 57.766.080	-\$ 53.376.027
2	\$ 8.787.797	\$ 55.359.160	-\$ 46.571.363
3	\$ 13.193.233	\$ 52.952.240	-\$ 39.759.007
4	\$ 17.606.361	\$ 50.545.320	-\$ 32.938.959
5	\$ 22.027.180	\$ 48.138.400	-\$ 26.111.220
6	\$ 26.455.691	\$ 45.731.480	-\$ 19.275.789
7	\$ 30.891.893	\$ 43.324.560	-\$ 12.432.667
8	\$ 35.335.787	\$ 40.917.640	-\$ 5.581.853
9	\$ 39.787.373	\$ 38.510.720	\$ 1.276.653
10	\$ 44.246.650	\$ 36.103.800	\$ 8.142.850
11	\$ 48.713.619	\$ 33.696.880	\$ 15.016.739
12	\$ 53.188.279	\$ 31.289.960	\$ 21.898.319
13	\$ 57.670.631	\$ 28.883.040	\$ 28.787.591
14	\$ 62.160.675	\$ 26.476.120	\$ 35.684.555
15	\$ 66.658.410	\$ 24.069.200	\$ 42.589.210
16	\$ 71.163.837	\$ 21.662.280	\$ 49.501.557
17	\$ 75.676.955	\$ 19.255.360	\$ 56.421.595
18	\$ 80.197.765	\$ 16.848.440	\$ 63.349.325
19	\$ 84.726.267	\$ 14.441.520	\$ 70.284.747
20	\$ 89.262.460	\$ 12.034.600	\$ 77.227.860
21	\$ 93.806.345	\$ 9.627.680	\$ 84.178.665
22	\$ 98.357.921	\$ 7.220.760	\$ 91.137.161
23	\$ 102.917.189	\$ 4.813.840	\$ 98.103.349
24	\$ 107.484.149	\$ 2.406.920	\$ 105.077.229
25	\$ 112.058.800	\$ 0	\$ 112.058.800

Fuente: Autor.

Como se observa en la tabla 7 a partir de 9 años de la vida útil, el ahorro estimado es mayor al costo de propiedad y uso por lo que a partir de ahí se empieza a obtener un ahorro real.

Con estos datos, se puede ver que al final de la vida útil los ahorros dados por costo de electricidad alcanzan para recuperar la inversión inicial.

Valor presente neto y tasa interna de retorno del sistema para el campamento

Tabla 8
Ensayo-error para el cálculo de la TIR del sistema para el campamento

VPN CAMPAMENTO	
TASA (%)	VPN (\$)
3%	\$ 261.819.919
4%	\$ 176.595.623
5%	\$ 107.941.740
6%	\$ 52.567.084
7%	\$ 7.863.442
7.2%	\$ 0
8%	-\$ 28.242.404
9%	-\$ 57.403.310

Fuente: Autor

A partir de la tabla 8 se puede observar el comportamiento del VPN del proyecto a diferentes tasas de descuento; la TIR se encuentra entre 7-8% y por ensayo-error se obtiene un valor aproximado con la desventaja de que se requiere el uso de mayor cantidad de cifras significativas para que el VPN se haga cero.

5. Análisis

Analizando los datos obtenidos, se puede ver que al final de la vida útil los ahorros dados por costo de electricidad para cada una de las secciones alcanzan para recuperar la inversión inicial, pero solo el sistema de los equipos eléctricos del socavón logró obtener un ahorro durante los 25 años más que suficiente para lograr comprar un sistema totalmente nuevo.

6. Conclusiones

Con los datos obtenidos del IDEAM se pudo observar que los índices de radiación en Cúcuta tienen un rango alto entre 4,0 - 4,5 kWh/m² lo que permite obtener un incremento en la potencia de salida que va a suministrar cada uno de los paneles solares al sistema fotovoltaico y con esto reducir la cantidad de paneles necesarios para la implementación de este tipo de sistemas.

Uno de los grandes inconvenientes que se tienen al implementar este tipo de sistemas son los altos costos en la inversión inicial y el largo periodo de tiempo que se necesita para la recuperación de la misma; esto ocasiona que este tipo de tecnología no sea llamativo para los diferentes sectores industriales de Colombia.

Una de las ventajas de los sistemas fotovoltaicos, es que su implementación se puede lograr de logrando que el sistema presente beneficios desde el momento que este se instala y a lo largo de su vida útil, permitiendo así el aprovechamiento de una fuente inagotable de energía.

La industria de la energía solar fotovoltaica se encuentra en un creciente aumento en los últimos años lo que la hace que cada año se vuelva más competitiva comparada con otras tecnologías que han tenido un periodo mayor de desarrollo. En la actualidad estos sistemas solares ya se encuentran respaldados por bancos de baterías lo que ocasiona que puedan suministrar energía en horas donde hay ausencia de radiación solar.

A partir de los resultados del análisis financiero se concluye que es posible implementar los sistemas para cada una de las secciones, pero que solo se lograría la recuperación de la inversión realizada y obtener un ahorro por concepto de pago de la factura de energía durante la vida útil del sistema para la sección de equipos eléctricos del socavón de la mina.

Los beneficios ambientales más relevantes como resultado de instalar el sistema solar fotovoltaico son la reducción en las emisiones de CO₂ y la opción de poder disponer los módulos al final de la vida útil mediante el reciclaje de sus componentes, lo que permitiría a la mina LA PIRAGUA ser un ejemplo en la iniciativa mundial en la reducción de contaminantes ambientales.

7. Referencias

Autosolar. (s.f.). Tienda de energía solar. Recupe-

rado de <https://autosolar.es/>

Calvo, F. (2009). *Análisis de viabilidad para la implementación de sistemas de generación eléctrica usando energía solar para uso residencial* (Tesis de pregrado). Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia. p.62.

Camargo, J., & Dallos, Á. (2011). *Evaluación del potencial de generación de energía eléctrica por medio de paneles fotovoltaicos en las edificaciones y zonas endurecidas de la sede central de la universidad industrial de santander* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. p. 179.

Escobar, D. (2013). *Estudio técnico - económico para la implementación masiva de sistemas solares fotovoltaicos para los estratos cinco y seis de la ciudad de cali*. universidad autónoma de occidente (Tesis de pregrado). Santiago de cali, Colombia, p.118.

Fernández, J. (2010). *Compendio de energía solar: Fotovoltaica, Térmica y Termoeléctrica*. Madrid, España: Mundi-Prensa, Ed.

Gacitua, R. A. (2011). *Estudio de factibilidad del uso de energía solar en procesos de la gran minería del cobre* (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile, p.80.

González, E. (2008). *Sistema fotovoltaico con mínimo almacenamiento de energía en el enlace de CD* (Tesis de maestría). Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México, p. 125.

Guevara, C., & Pérez, L. (2015). *Análisis de viabilidad del suministro de energía eléctrica a la granja la fortaleza ubicada en melgar-tolima mediante la implementación de un sistema solar fotovoltaico* (Tesis de pregrado). Universidad Libre. Bogotá, Colombia, p.137.

IDEAM. (2016). Atlas Radiacion. Recuperado de <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>

Martínez, V. (2003). Estado del arte y evaluación técnica de la generación termosolar de electricidad. Universidad de Chile.