

Diseño de un Microsistema Fotovoltaico Aislado Móvil para un Laboratorio de Pruebas para la Industria Petrolera

Yadira Z. Morillo Estrella
Departamento de Energía Eléctrica
Escuela Politécnica Nacional
Quito- Ecuador
yadira.morillo@epn.edu.ec

Patricia E. Otero Valladares
Departamento de Energía Eléctrica
Escuela Politécnica Nacional
Quito- Ecuador
patricia.otero@epn.edu.ec

Nelson V. Granda Gutiérrez
Departamento de Energía Eléctrica
Escuela Politécnica Nacional
Quito- Ecuador
nelson.granda@epn.edu.ec

Resumen— En este documento se detalla el dimensionamiento de un microsistema fotovoltaico aislado para la industria petrolera, específicamente para el laboratorio móvil Vx Spectra de Schlumberger. Este microsistema además de cumplir con los requerimientos de demanda de energía, está dentro de los limitantes de peso, aérea y autonomía mínima de 3 días requeridos por la empresa. Para el desarrollo se realizó un estudio de la radiación solar por el lapso de un año (2020) según datos de NREL, posterior a ello según la demanda máxima de energía se dimensiona el microsistema fotovoltaico para después evaluar los elementos adicionales como inversor y banco de baterías. Al final se realiza el análisis económico del proyecto según su duración en el tiempo, mantenimiento y costo en comparación a la generación con un generador a diesel dando como resultado una rentabilidad del 8.83% y un retorno de la inversión al año 14, considerando que el sistema está implementado es un vehículo móvil capaz de transportar 1600kg con una duración de 20 años. Mediante simulación en un programa especializado como el System Advisor Model (SAM) se determina la factibilidad del diseño.

Keywords— *microsistema fotovoltaico aislado, paneles solares, baterías, System Advisor Model (SAM).*

I. INTRODUCCIÓN

En este documento se detalla el dimensionamiento de un microsistema fotovoltaico aislado para ser utilizado en la industria petrolera para el laboratorio móvil medidor de flujo multifásico con tecnología Vx Spectra de la empresa Schlumberger. Para el desarrollo del microsistema fotovoltaico se propone la implementación de paneles solares de alto rendimiento y capacidad, baterías tipo gel que puedan ser fácilmente manipuladas, estar contenidas en una estructura móvil y cumplir con los requisitos de autonomía, además de un inversor de alta eficiencia para optimizar el sistema.

Para el análisis de viabilidad del proyecto, se ha optado por la simulación System Advisor Model (SAM). Al final, se conocen los parámetros técnicos y económicos del diseño para su viabilidad en comparación con el sistema de generación de energía actual.

II. METODOLOGÍA

Para el estudio se considera como sector de análisis el campo Auca en la provincia de Orellana de latitud -0.6347013189696736 y longitud -76.88166973993435 denominado como lugar de operación del laboratorio móvil Vx Spectra.

A. Recopilación de datos

a) *Estimación de la demanda del laboratorio:* El equipo Vx Spectra se encuentra expresado como equipo de laboratorio el cual cuenta con una fuente de poder 120 VAC. Mediante levantamiento y estudio de cargas de determina que éste en total tiene un consumo de 16653,44 Wh/día dando 499603,4 Wh consumidos al mes.

b) *Estimación de irradiancia:* Al no disponer de equipos de medida de radiación en el sector del campo Auca, se procede a tomar la información proporcionada por el programa System Advisor Model (SAM), la cual es dada por la NSRDB (National Solar Radiation Database) de NREL [6]. Esta información se muestra en la Tabla 1.

TABLA 1: IRRADIACIÓN SOLAR HORIZONTAL GLOBAL PARA EL CAMPO AUCA DE SCHNEIDER SEGÚN NREL

Mes	Horas desde 00:00 Jan 1	GHI (W/m ²)	GHI (kWh/m ² /día)
Enero	372	188.253	4.5181
Febrero	1080	184.439	4.4265
Marzo	1788	168.992	4.0558
Abril	2520	171.992	4.1278
Mayo	3252	170.761	4.0983
Junio	3984	161.579	3.8779
Julio	4716	181.86	4.3646
Agosto	5460	194.753	4.6741
Septiembre	6192	217.224	5.2134
Octubre	6924	214.476	5.1474
Noviembre	7656	207.042	4.9690
Diciembre	8388	203.483	4.8836
		Promedio	4.53

B. Dimensionamiento del microsistema fotovoltaico

a) *Radiación sobre los paneles con respecto al ángulo de inclinación:* Debido a que el microsistema fotovoltaico será colocado de manera inclinada sobre una estructura de remolque es necesario conocer la radiación sobre esta superficie según (1) [1].

$$G_{dm}(\alpha, \beta) = G_{dm}(0) * K * FI * FS \quad (1)$$

En donde β es el ángulo de inclinación, [°], $G_{dm}(\alpha, \beta)$ es el valor medio anual de la irradiación diaria sobre el plano generador en [kWh/m²/día], $G_{dm}(0)$ es el valor medio anual de la irradiación diaria sobre superficie horizontal en [kWh/m²/día], K es la constante según la inclinación óptima del generador, esta tendrá el valor de 1.15 por

encontrarse en la zona ecuatorial [1], FI es el factor de irradiación, FS factor de sombreado el cual es igual a 1 por ser la instalación en un campo abierto.

Para obtener el factor de irradiación se aplica (2) con un ángulo óptimo de inclinación de 10°, [1], [2]:

$$FI=1-\left[1.2\cdot 10^{-4}\left(\beta-\beta_{opt}\right)^2\right] \text{ para } \beta\leq 1 \Rightarrow 0.98^\circ \quad (2)$$

El valor medio anual de irradiación diaria sobre la superficie horizontal $G_{dm}(\alpha,\beta)$ es de 4.53 [kWh/m²/día] según datos del NREL [3].

Con la información anterior se puede calcular la radiación sobre los paneles según (1):

$$G_{dm}(\alpha,\beta)=4.53 \text{ [kWh/m}^2\text{/día]}\cdot 1.15\cdot 0.988\cdot 1$$

$$G_{dm}(\alpha,\beta)=5.14 \text{ [kWh/m}^2\text{/día]}$$

b) *Potencia aproximada del generador según la radiación:* Con el rendimiento energético se puede calcular la potencia aproximada que tendría nuestro generador (3):

$$PR=(E_D\cdot G_{CEM})/(G_{dm}(\alpha,\beta)\cdot P_{mp,min}) \quad (3)$$

Donde PR es el rendimiento energético 0.6 para sistemas con inversor y baterías, E_D es el consumo de energía 16.653 [kWh/día], G_{CEM} es la irradiación a condiciones estándar de medida (CEM), 1 [kWh/m²], $G_{dm}(\alpha,\beta)$ es 5.14 [kWh/m²/día], $P_{mp,min}$ es la potencia mínima requerida por el generador, [W], [4]

Con ayuda de (3) y la información anterior, se puede determinar la potencia mínima requerida por el generador:

$$P_{mp,min}=\frac{16.653 \text{ [kWh/día]}\cdot 1 \text{ [kWh/m}^2\text{]}}{5.14 \text{ [kWh/m}^2\text{/día]}\cdot 0.6}=5.4 \text{ kW.}$$

Por otro lado, la energía promedio que puede proporcionar cada panel fotovoltaico para el mes de menor radiación, en este caso junio, con 3.8779[kWh/m²/día], [3] a radiación promedio de 1 [kWh/m²] y 25°C según (3) es de 1764.445[Wh/día]

Para los paneles seleccionados a condiciones NMOT es decir 800[W/m²], 20°C y velocidad del viento 1m, se tiene como potencia de cada panel 399[W], dando una energía promedio de 1547.28[Wh/día].

c) *Cálculo del número de paneles:*

La ecuación 4 permite calcular el número de paneles necesarios:

$$\#P=\frac{E_D}{P_{PR_NMOT}}=\frac{16.653 \text{ [kWh/día]}}{1.547\text{[Wh/día]}}=10.76 \text{ unidades} \quad (4)$$

Donde #P es el número de paneles, P_{PR_NMOT} es la energía promedio, [Wh/día]

Por aproximación y simetría se colocarán 12 paneles fotovoltaicos de 455 vatios.

d) *Determinación del arreglo:* La ecuación (5) permite determinar el máximo número de paneles a conectar en serie:

$$\#P_{ms}=V_{m_in}/V_p \quad (5)$$

Donde # P_{ms} es el número máximo de paneles en serie, V_{m_in} es el voltaje máximo de entrada, [V] y V_p es el voltaje del panel, 41.1 [V]

$$\#P_{ms}=145\text{VDC}/41.1\text{VDC}=3.53 \text{ unidades}$$

Mediante (6) se determina el número máximo de paneles a conectar en paralelo:

$$\#P_{mp}=C_{inver}/C_{pSCT}=60\text{A}/11.08\text{A}=5.42 \text{ unidades} \quad (6)$$

Donde # P_{mp} es el número máximo de paneles en paralelo, C_{inver} es la corriente soportada por el inversor, [A] y C_{pSCT} es la corriente que aportan los paneles fotovoltaicos a condiciones estándar, [A]

Conforme a los cálculos anteriores se tendrá un arreglo de 12 paneles fotovoltaicos con 3 paneles en serie y 4 en paralelo formando así un arreglo de 4 por 3 con las siguientes características: 12 paneles/123.3V/44.32A. El área aproximada que ocupará el generador será de 27 m² sobre una plataforma móvil.

e) *Diseño del banco de baterías:* para una autonomía de 3 días, y con criterio que la batería no debe exceder en 25 veces la corriente de cortocircuito en condiciones estándar [5] se consideran 3 tipos de baterías: FCD12-200 (ácido sulfúrico, 200Ah, 12V), FCG12-250 (gel, 277.6Ah, 12V) y GFMG-1500 (gel,1590Ah, 2V) . Para la selección se analiza el consumo diario de carga según (7).

$$L_D=E_D/V_N=16653 \left[\frac{\text{Wh}}{\text{día}}\right] /48\text{V}=346.94 \text{ Ah/día} \quad (7)$$

Donde L_D es el consumo diario de la carga, [Ah], E_D es el consumo de la carga, $\left[\frac{\text{Wh}}{\text{día}}\right]$ y V_N es el voltaje nominal del banco de baterías.

Según (8) podemos determinar la capacidad del acumulador para la autonomía de 3 días según el consumo diario de energía calculado anteriormente.

$$C_{20}=\frac{A\cdot LD}{\eta_{inv}\cdot\eta_{rb}\cdot PD_{max}}=\frac{3\text{días}\cdot 346.94 \frac{\text{Ah}}{\text{día}}}{0.87\cdot 0.87\cdot 0.7}=854.53 \text{ Ah} \quad (8)$$

Donde A es 3, C_{20} es la capacidad nominal del acumulador, PD_{max} es la profundidad de descarga máxima, 70%, η_{rb} es el rendimiento energético entre el regulador y el banco de baterías 87%, por datos del inversor y consideraciones técnicas. η_{inv} es el rendimiento del inversor 87%.

Para la selección, se considera que cada banco de baterías debe abastecer los 854.53Ah, siendo FCG12-250 la mejor opción según (9).

$$\frac{C_{20}}{C_{20_b}} * \#bs_48 = \frac{854.5320 \text{ Ah}}{277.6\text{Ah}} * 4 = 12.3131 \text{ u} \quad (9)$$

Donde C_{20} es la capacidad nominal del acumulador en [Ah], C_{20_b} es la capacidad de la batería en [Ah], #b es el número de baterías necesarias y #bs_48 es el número de baterías en serie para cumplir el voltaje de 48[V]. Por tanto según (9) se necesitan 12 unidades, dando 13 como inmediato superior, pero como requisito se debe cumplir 48 [V] en serie por lo que se opta por 16 unidades, dando un arreglo de 4 por 4, para un banco de 4441.6Ah/48V.

f) *Selección del regulador/inversor:* Para el sistema se ha optado por un inversor de 6kW, ya que se garantizará confiabilidad para una carga de 5.4kW y este a la vez puede abastecer de energía en los momentos de alta demanda. Por otro lado, la corriente demandada por la carga es de 19,84 amperios la cual puede ser fácilmente suministrada ya que puede el inversor/cargador GS Series GS6000 puede alcanzar aproximadamente 50 amperios conforme a los 6 kW de potencia y 120 voltios. Adicional la corriente máxima de entrada del generador fotovoltaico soportada por el inversor es de 60 amperios, por tanto, se encuentra dentro del límite y es aceptable ante la corriente de 58.05 amperios para el equipo seleccionado.

C. Simulación del micro sistema fotovoltaico

Para la simulación del micro sistema fotovoltaico se utilizó el programa System Advisor Model (SAM) en su versión 2020.11.29 y modelo PV-Battery, Single owner. La Fig. 1 se muestra la energía generada correspondiente a cada mes tanto en corriente alterna como en corriente continua.

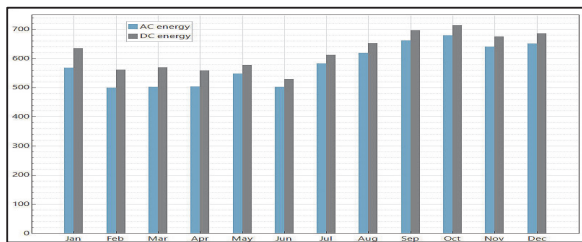


Fig. 1. Energía mensual dada por el micro sistema fotovoltaico. [kwh/mes]

En la Fig. 2 se observa la energía generada por año en un periodo de 25 años.

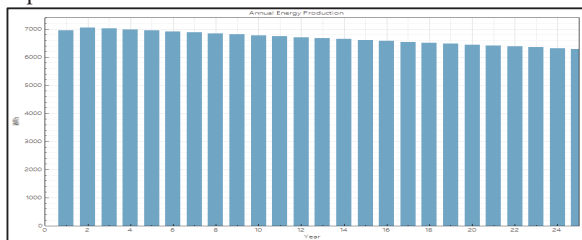


Fig. 2. Energía anual dada por el micro sistema fotovoltaico. [kWh/año].

D. Cálculo del van y tir

Para análisis se considera: costo de energía por generador a diésel: \$ 0.396, costo de energía por generador fotovoltaico: \$ 0.080, presupuesto referencial del micro sistema: \$12.224,70; presupuesto referencial del remolque: \$3000, inversión total (micro sistema fotovoltaico + remolque): \$15.224,70. En el cálculo del VAN se considera una tasa de rendimiento mínima aceptable (TREMA/TEMAR) igual a 5,96; adicional una vida útil de los equipos de 20 años con excepción de las baterías las cuales se deben reemplazar cada 6 años como inversión. De resultado se tiene que el micro sistema fotovoltaico tiene una rentabilidad de 8.83% y se empieza a recuperar el dinero al año 14.

III. DISCUSIÓN

El diseño del sistema se ha desarrollado en base a datos de radiación obtenidos por un programa, esta información podría estar sujeta a cambio ya que no es obtenida directamente en el lugar de instalación por un equipo especializado y llegaría a afectar el diseño. Por otro lado el diseño está limitado a un peso y área específica de uso, lo cual influye significativamente en la selección de los elementos y por tanto su costo; afectando así el análisis económico realizado.

IV. CONCLUSIONES

Para abastecer la energía de 500kWh/mes demandado por el laboratorio, se ha determinado la implementación de 16 baterías de 12 voltios y 250Ah, con un generador fotovoltaico de 12 paneles de 455[W] y mediante la simulación se determina que los meses de menor producción serán febrero, marzo y junio con un valor mínimo de 499.205 [kWh/mes], siendo aún competente para abastecer la energía necesaria para el laboratorio adicional se determina que el proyecto es factible con una rentabilidad del 8.83% la cual supera a la mínima esperada y la inversión puede ser recuperada a partir del año número 14. Para el cálculo de la rentabilidad la diferencia con producción de energía a combustión, es de \$0.316 [l/h], a favor del sistema fotovoltaico.

REFERENCIAS

- [1] López Velasco Walther Germán, "Diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica para la empresa pública metropolitana de transporte de pasajeros de Quito." Accessed: Sep. 03, 2021. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20127?mode=full>
- [2] J. G. Angamarca Ipiales and R. D. Guevara Pajuña, "Diseño de microgeneración fotovoltaica conectada a la red para el suministro eléctrico de los centros operativos y agencias de la eeq ubicados al noroccidente y sur de la ciudad de Quito," Quito, 2020. Accessed: Sep. 03, 2021. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20865?locale=de>
- [3] National Renewable Energy Laboratory (NREL), "Weather Data - System Advisor Model (SAM)." <https://sam.nrel.gov/weather-data> (accessed Mar. 27, 2022).
- [4] P. López Ruiz, "Diseño De Una Instalación Solar Fotovoltaica Para El Suministro De Energía Eléctrica De Una Vivienda Aislada," Universitat Rovira I Virgili, no. 2002, p. 141, 2015, [Online]. Available: <http://decea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/2317pub.pdf>
- [5] Miguel Pareja Aparicio, "Energía solar fotovoltaica Cálculo de una instalación aislada," p. 1162, 2010.