

Dimensionado Y Evaluación Técnica Para Electrificar Los Zonas Rurales En La Provincia Ciego De Ávila.

Dr., P.T. Francisco García Reina
pancho@unica.cu¹

MSc., P.I Viviana Martínez Cárdenas
viviana@eleccav.une.cu¹

MSc., P.I Jesús Junco Barrisonte
jjunco@gmail.com¹

MSc., P.A Ivelisse Almanza Fundora
ivellises@unica.cu¹

Ing., P.I Liliana Campo Martínez
jolymart88@gmail.com¹

RESUMEN

En Cuba, a partir de la diversificación de la economía están surgiendo nuevos asentamientos rurales, por esta razón actualmente en la provincia hay 135 viviendas sin electrificar, para las cuales hay que tomar la decisión de como electrificarlas. Para realizar este trabajo se realizó un diagnóstico de las 135 viviendas rurales sin electrificar, definiendo la distancia a que se encuentran de la red de distribución del Sistema Electroenergético Nacional en cada municipio y se desarrolló el método de cálculo para el dimensionado del sistema fotovoltaico autónomo elaborándose el presupuesto de la red de distribución primaria y secundaria en una distancia de 1km para evaluar la soluciones desde el punto de vista económico y ambiental, el cual evidencia que este tipo de propuesta es necesario conocerla para tomar la decisión más factible en el momento de electrificar zonas rurales.

Palabras claves: energía fotovoltaica, sistemas fotovoltaicos autónomos, viviendas rurales, eficiencia energética.

ABSTRACT

In Cuba, as a result of the diversification of the economy, new rural settlements emerge, for this reason there are currently 135 homes without electrification in the province, for which the decision on how to electrify them must be made. To carry out this work, a diagnosis was made of the 135 rural houses without electrification, defining the distance to which they are from the distribution network of the National Electroenergetic System in each municipality and the calculation method was developed for the dimensioning of the autonomous photovoltaic system, being developed the budget of the primary and secondary distribution network in a distance of 1km to evaluate the solutions from the economic and environmental point of view,

¹ Departamento de Mecánica Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad de Ciego de Ávila, UNICA.

which shows that this type of proposal needs to be known to make the most feasible decision at the time of electrifying rural zones

Keywords:

photovoltaic energy, autonomous photovoltaic systems, rural housing, energy efficiency.

INTRODUCCIÓN

En Cuba, el acceso al servicio eléctrico constituye uno de los principales beneficios que recibe la población, lo que quedó demostrado al cierre del 2018, cuando el Ministro de Energía y Minas en funciones Alfredo López, informó, que el 100 % de la población cubana censada hasta el 2016 poseía servicio eléctrico, ya fuese por la interconexión al Sistema Electroenergético Nacional (SEN), a través de Grupo de Generación Eléctrica o por vía de las fuentes renovables de energía.

Desde el 2016 en que se realizó el levantamiento de viviendas sin electrificar y hasta la actualidad, se ejecuta el decreto 300 del Ministerio de la Agricultura, referido a la entrega de tierras en usufructos hasta 20 años para su usos y explotación a personas naturales, para la producción bienes que satisfagan la alimentación territorial, surgiendo nuevos asentamientos rurales y montañosos acogidos a este decreto, con bienhechurías en las áreas otorgadas, a las cuales no se le ha podido prestar el servicio de electricidad..

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos usando software de simulación fotovoltaica Solar Pro. V4.6 de JAPAN SOLAR ENERGY SOCIETY, con el fin de dimensionar el sistema fotovoltaico aislado y la evaluación técnica de su implementación.

MATERIALES Y MÉTODO

En este trabajo se utilizaron los datos tomados del sitio web: NASA Surface Meteorology and Solar Energy-Available Tables. Sobre la insolación de la provincial Ciego de Avila.

Para el diseño del sistema se calculó la dimensión real del sistema fotovoltaico autónomo, validando su resultado con la aplicación computacional, confeccionada en el software de simulación fotovoltaica Solar Pro. V4.6 de JAPAN SOLAR ENERGY SOCIETY, que posee la capacidad de calcular valores diarios de radiación solar a partir de mediciones sobre las trayectorias solares de la localidad, permitiendo determinar con los subprogramas el diseño, optimización y simulación de sistemas autónomos. También incluye una base de datos con modelos de módulos FV y modelos de inversores Una de las potencialidades, es que provee información pérdidas por efecto de sombras cercanas durante todo el año, que lleva a vías de hecho una metodología que permite dimensionar de forma óptima los sistemas fotovoltaicos no conectados a la red, propiciando utilizar las mejores soluciones técnicas y económicas.

RESULTADO

Como resultado del diagnóstico realizado, utilizando la tabla del centro por municipio y consejo popular se definió que con excepción del municipio Morón en el consejo popular El Vaquerito donde existen 8 viviendas a menos de 1km de la red del SEN, en las restantes 127 viviendas se debe electrizar con sistemas fotovoltaicos autónomos.

Para la determinación real del dimensionamiento del sistema fotovoltaico autónomo realizamos la estimación del consumo que debe cubrir la instalación fotovoltaica propuesta para cada vivienda aislada sin electrificar.

Para saber el consumo energético diario de cada equipo, podemos usar la siguiente fórmula:

$$\text{Energía-Equipo [Whd]} = \text{Potencia unitaria [W]} * \text{Número de horas uso diario [h]}$$

y se mide en Whd (Wattios hora dia).

se puede usar la siguiente tabla como una **referencia aproximada**:

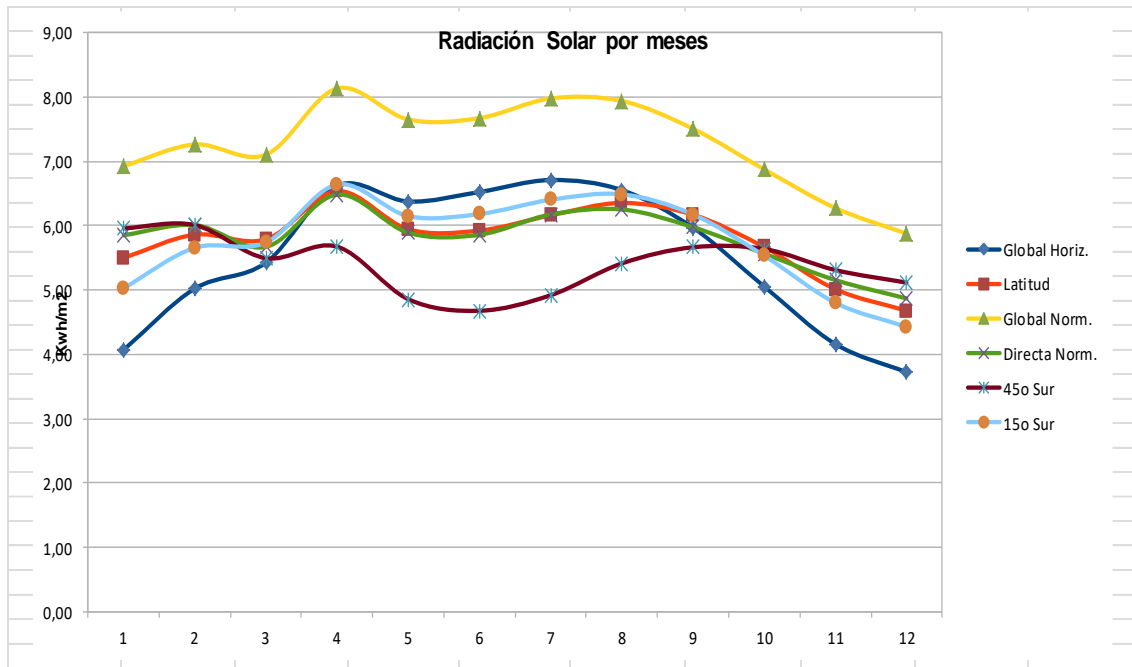
| Equipo | Potencia [W] | Uso diario [horas/dia] |
|-----------------------------|--------------|------------------------|
| Dispositivos de Iluminación | 20-50W | 3-4 horas |
| Televisión | 300W | 3-4 horas |
| Reproductor DVD – BlueRay | 30W | 1 hora |

| Equipo | Potencia [W] | Uso diario [horas/día] |
|----------------------|--------------|------------------------|
| Lavadora A++ | 700W | 1 hora |
| Secadora | 2000W | 1 hora |
| Aspiradora | 1200W | 1 hora |
| Aire Acondicionado | 1800W | 3 horas |
| Ordenador | 250W | 4 horas |
| Nevera | 200W | 4 horas |
| Cocina Vitrocerámica | 1500W | 1 hora |
| Horno Microondas | 1500W | 0,5 horas |
| Lavavajillas | 1100W | 1,5 horas |
| Congelador | 250W | 4 horas |

Ese valor de irradiación en condiciones estándar de medida es de 1000 watts/m². Es decir, si se dispone de los datos de irradiación solar de un determinado día y se divide entre 1000, se obtienen las HSP.

Por ejemplo, si tenemos una irradiación de 3.720 Wh/m², para pasarla a HSP, se divide entre 1.000W/m², con lo que obtenemos 3.72 HPS.

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------|---------|-------|-------|------|-------|-------|--------|------------|---------|-----------|-----------|-------|
| Latitud: | 22,41 | | | | | | | | | | | | |
| Longitud: | -78,04 | | | | | | | | | | | | |
| Valores de Radiación Solar sobre Superficies con varias inclinaciones (kwh/m ²) | | | | | | | | | | | | | |
| | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | DICIEMBRE | ANUAL |
| Global Horiz. | 4,07 | 5,02 | 5,43 | 6,62 | 6,38 | 6,53 | 6,71 | 6,55 | 5,97 | 5,05 | 4,16 | 3,72 | 5,57 |
| Latitud | 5,50 | 5,86 | 5,79 | 6,54 | 5,95 | 5,93 | 6,16 | 6,36 | 6,17 | 5,67 | 5,01 | 4,68 | 5,80 |
| Global Norm. | 6,93 | 7,26 | 7,11 | 8,13 | 7,65 | 7,67 | 7,98 | 7,94 | 7,51 | 6,88 | 6,28 | 5,88 | 7,27 |
| Directa Norm. | 5,85 | 6,01 | 5,67 | 6,49 | 5,89 | 5,86 | 6,18 | 6,25 | 5,98 | 5,57 | 5,16 | 4,87 | 5,81 |
| 45° Sur | 5,96 | 6,01 | 5,50 | 5,68 | 4,86 | 4,68 | 4,92 | 5,42 | 5,67 | 5,64 | 5,31 | 5,12 | 5,38 |
| 15° Sur | 5,03 | 5,66 | 5,74 | 6,64 | 6,15 | 6,18 | 6,40 | 6,49 | 6,18 | 5,53 | 4,80 | 4,43 | 5,79 |
| Temperatura | 27,0 | 27,5 | 28,4 | 29,4 | 30,4 | 31,1 | 31,8 | 32,0 | 31,4 | 30,2 | 28,9 | 27,9 | 29,6 |



El método de cálculo utilizado en las viviendas del Consejo Popular Guayacanes del Municipio Majagua en la provincia Ciego de Ávila. Suponemos un consumo para una vivienda con uso diario durante todo el año, como por ejemplo:

| | Potencia (W) | Hora/Día | Cantidad (u) | Total Potencia (W) | Total Potencia con un margen de seguridad del 20%(W) |
|--|--------------|----------|--------------|--------------------|--|
| • 6 (Seis) Luminarias fluorescentes | 0,00356 | 4,5 | 6 | 0,096 | 0,115 |
| • 1 (Un) Televisor de hasta | 0,0114 | 5 | 1 | 0,057 | 0,068 |
| • 1 (Un) Cargadores de teléfonos móviles | 0,0025 | 2 | 1 | 0,005 | 0,006 |
| • 1 (Un) Refrigerador | 0,078 | 1 | 24 | 1,872 | 2,246 |
| • 2 (Dos) Ventiladores | 0,006 | 10 | 2 | 0,120 | 0,144 |
| • 1 (Un) Olla eléctrica de cocción | 0,058 | 2 | 1 | 0,116 | 0,139 |
| • 1 (Un) Equipo de música pequeño | 0,015 | 2 | 1 | 0,030 | 0,036 |
| Total Potencia para 1 día | | | | 2,296 | 2,755 |

Con los datos de esta “**Tabla de Consumos**” obtenemos el consumo medio diario de la instalación al que se le ha aplicado un 20% como margen de seguridad que es el recomendado según la bibliografía referida al tema de este trabajo, a partir de que en la instalación habrá pérdidas por rendimiento de la batería y del inversor y esto influye en la energía necesaria final.

Generalmente, para el buen dimensionamiento, tomaremos un rendimiento de la batería de un 95%, del inversor un 90% y de los conductores un 100%.

Así pues para el cálculo de los **consumos medios diarios (L_{md})** consideramos la siguiente expresión:

$$L_{md} = \frac{L_{md,DC} + \frac{L_{md,AC}}{\eta_{inv}}}{\eta_{bat} \cdot \eta_{con}} = \frac{450 + \frac{1950}{0,90}}{0,95 \cdot 1} = 2.755 Wh / día$$

Siendo (L_{md}) el consumo medio de energía diario, ($L_{md,DC}$) el consumo medio de energía diario de las cargas en continua y ($L_{md,AC}$) el de las cargas en alterna.

O bien, si lo queremos expresar como el consumo de energía medio en Ah/día:

$$Q_{Ah} = \frac{L_{md}}{V_{BAT}} = 114,8 Ah / día$$

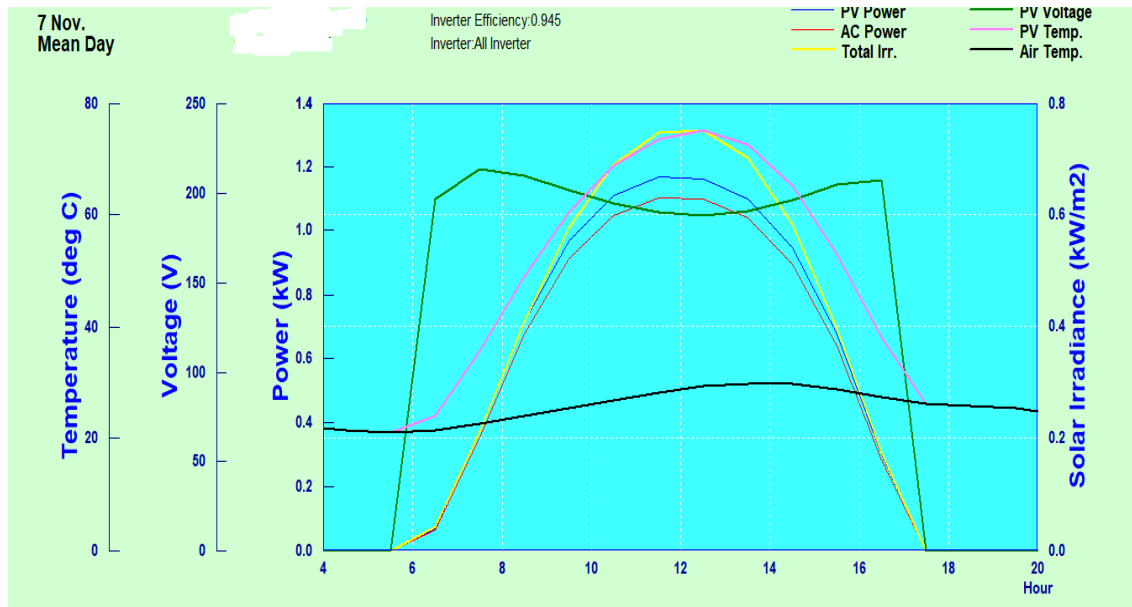
Como era de esperar, el consumo medio diario real es ligeramente superior al nominal, pues como se mencionaba, hemos tomado en cuenta las pérdidas que se pueden producir en algunos de los elementos de la instalación y el margen de seguridad del 20%.

Como dato adicional, podríamos calcular el consumo total anual (L_T) y medio anual (L_{ma}):

$L_T = L_{md} * 365 \text{ días} = 1.005.575 \text{ Wh/año}$ $L_{ma} = L_T/365 = 2.755 \text{ Wh/día}$ (En este caso coincide con el medio diario, pues el consumo que se ha estimado es constante todo el año, no sucedería así si hubiera variaciones de consumos estacionales)

Una vez calculado el consumo, buscamos los datos de radiación solar global en utilizando, por ejemplo, el HOMER, PVGIS, que es una aplicación online gratuita:

Tendremos una pantalla tal como esta:



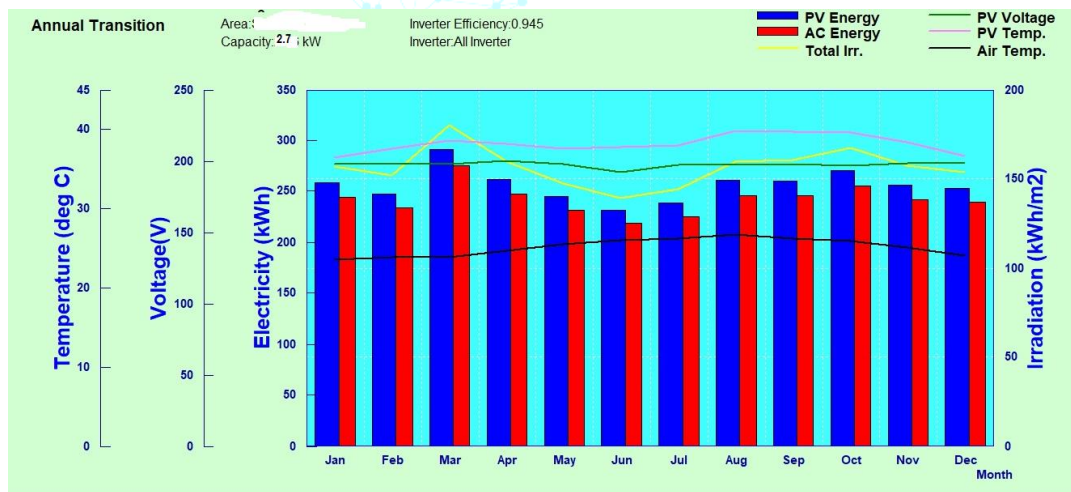
Una vez hechos los cálculos, obtendremos la siguiente “**Tabla de Radiaciones**” (Wh/m²/dia) según las inclinaciones que queramos ir estudiando:

| Mes | Inclinación 30° | Inclinación 40° | Inclinación 50° | Inclinación 60° |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Enero | 3.240 | 3.240 | 3.400 | 3.480 |
| Febrero | 3.630 | 3.830 | 3.930 | 3.940 |
| Marzo | 4.860 | 4.960 | 4.940 | 4.800 |
| Abril | 5.250 | 5.160 | 4.950 | 4.630 |
| Mayo | 5.680 | 5.430 | 5.070 | 4.600 |
| Junio | 6.120 | 5.770 | 5.300 | 4.730 |
| Julio | 6.320 | 5.990 | 5.540 | 4.960 |
| Agosto | 5.990 | 5.830 | 5.530 | 5.100 |
| Septiembre | 5.360 | 5.410 | 5.320 | 5.100 |
| Octubre | 4.200 | 4.390 | 4.460 | 4.420 |
| Noviembre | 3.100 | 3.330 | 3.470 | 3.530 |
| Diciembre | 2.780 | 3.040 | 3.220 | 3.320 |

Calculamos ahora la **inclinación óptima** para nuestra instalación, para ello aplicamos el **Criterio del Mes Crítico**, así pues, se ha de preparar a partir de la tabla de radiaciones, la “**Tabla de Cocientes Consumo / Radiación**” que es la que se muestra a continuación:

| Mes | Inclinación 30° | Inclinación 40° | Inclinación 50° | Inclinación 60° |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Enero | 850,31 | 850,31 | 810,29 | 791,67 |
| Febrero | 758,95 | 719,32 | 701,02 | 699,24 |
| Marzo | 566,87 | 555,44 | 557,69 | 573,96 |
| Abril | 524,76 | 533,91 | 556,57 | 595,03 |
| Mayo | 485,04 | 507,37 | 543,39 | 598,91 |
| Junio | 450,16 | 477,47 | 519,81 | 582,45 |
| Julio | 435,92 | 459,93 | 497,29 | 555,44 |
| Agosto | 459,93 | 472,56 | 498,19 | 540,20 |
| Septiembre | 513,99 | 509,24 | 517,86 | 540,20 |
| Octubre | 655,95 | 627,56 | 617,71 | 623,30 |
| Noviembre | 888,71 | 827,33 | 793,95 | 780,45 |
| Diciembre | 991,01 | 906,25 | 855,59 | 829,82 |

Una vez que se conocen esos valores se elige a continuación el menor de todos ellos que en este caso corresponde al valor de 829,82 y 60 ° de inclinación (señalado en negrita y celda gris oscuro).



Es decir, nuestra instalación deberá disponer de una inclinación de 60° para esta localidad de Guayacanes.

Procedemos ahora con el cálculo del **número total de módulos solares necesarios:**

$$N_T = \frac{L_{mdcrit}}{P_{MPP} \cdot HPS_{crit} \cdot PR} = \frac{2755}{180 \cdot 3,32 \cdot 0,90} = 5,12 \approx 6$$

Calculamos entonces ahora la capacidad nominal necesaria de una [batería solar](#) en función de la profundidad de descarga estacional y diaria. La mayor de ellas será la que seleccionemos, pues de lo contrario podríamos incurrir en una insuficiencia estacional o diaria.

Capacidad nominal de la batería en función de la descarga máxima diaria (Cnd):

$$C_{nd}(Wh) = \frac{L_{md}}{P_{Dmax,d} \cdot F_{CT}} = \frac{2755}{0,15 \cdot 1} = 18.367Wh$$

$$C_{nd}(Ah) = \frac{C_{nd}(Wh)}{V_{BAT}} = \frac{18367}{24} = 765,3Ah$$

Capacidad nominal de la batería en función de la descarga máxima estacional (Cne):

$$C_{ne}(Wh) = \frac{L_{md} \cdot N}{P_{Dmax,e} \cdot F_{CT}} = \frac{2755 \cdot 6}{0,7 \cdot 1} = 23.614,3Wh$$

$$C_{ne}(Ah) = \frac{C_{ne}(Wh)}{V_{BAT}} = \frac{23614,3}{24} = 983,9Ah$$

Para calcular la **corriente de entrada al regulador** hacemos el producto corriente de cortocircuito de un módulo, en este caso la del SW180 de SolarWorld es de $I_{sc} = 5,30$ Amp., y multiplicamos por el número de las ramas (la corriente de cada rama en paralelo será aproximadamente la misma) en paralelo calculado anteriormente:

$$I_{entrada} = 1,25 \cdot I_{MOD,SC} \cdot N_p = 1,25 \cdot 5,30 \cdot 7 = 46,37A$$

Para el cálculo de la **corriente de salida** hemos de valorar las potencias de las cargas DC y las cargas AC:

$$I_{salida} = \frac{1,25 \cdot (P_{DC} + \frac{P_{AC}}{\eta_{inv}})}{V_{BAT}} = \frac{1,25 \cdot \left(15 + \frac{350 + 110}{0,95}\right)}{24} = \frac{624,01}{24} = 26A$$

el **cálculo del inversor para solar aislada**, únicamente hemos de calcular la suma de las potencias de las cargas de alterna. En nuestro caso, sería la lavadora (350W) y el aire acondicionado de (110W) y aplicar un margen de seguridad del 20%.

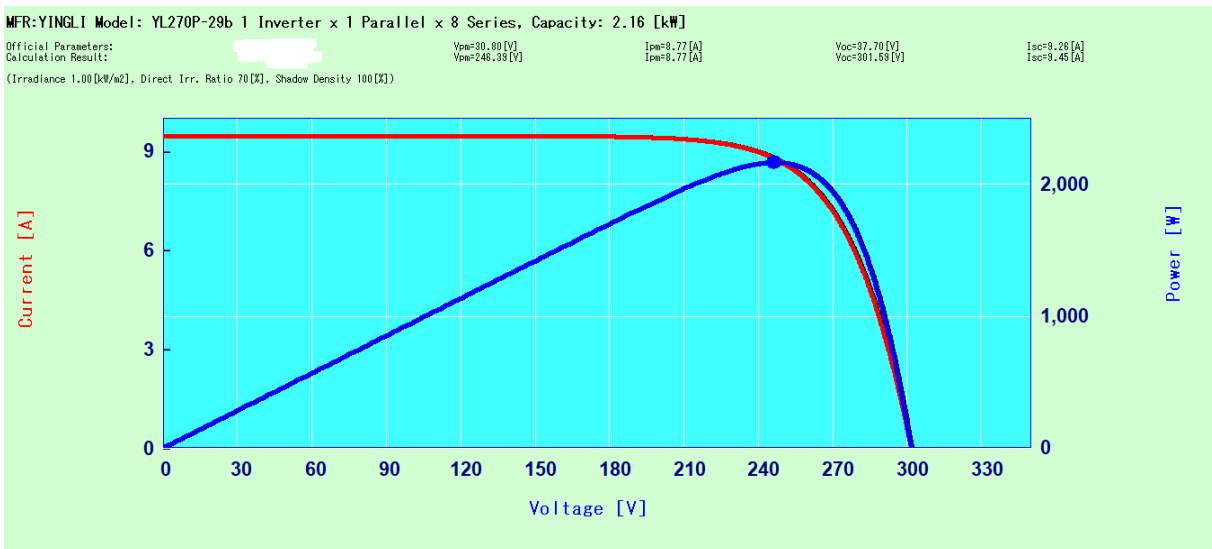
Así pues:

$$P_{inv} = 1,2 \cdot P_{AC} = 1,2 \cdot (350 + 110) = 552W$$

Es por esta razón que, para evitar problemas y deficiencias en el correcto funcionamiento de nuestra instalación, es recomendable hacer un sobredimensionamiento que contemple los picos de arranque:

$$P_{inv} = 1,2 \cdot P_{AC} = 1,2 \cdot (350 \cdot 4 + 110) = 1.812W$$

Es decir, nuestro inversor debería cubrir, al menos, 1.812W de demanda para tener bien cubiertas las necesidades de la vivienda, incluso los picos de demanda por arranque del motor de la lavadora.



Valoración financiera comparando la solución de electrificar la vivienda aislada a 1 km de la red del SEN con la instalación del sistema fotovoltaico aislado.

Presupuesto de la Línea de transmisión primaria y secundaria

El costo de 1km de línea secundaria asciende a 10,931.34 pesos totales de ellos en CUC 6,319.84 y la red primaria a 13.2 kv tiene un costo estimado de 20,623.01 pesos totales de ellos 11,563.51 en CUC

Comparación de soluciones técnicas

El costo del montaje del módulo fotovoltaico asciende a 27,691.45 pesos totales de ellos 6,761.36 pesos en CUC, por lo que cuando una vivienda está a 1km o menos de la red primaria la solución más factible es electrificar conectándose a esta red, lo que representa una disminución de 3,863.90 pesos totales de ellos 11,122.09 pesos en CUC si se instalase un sistema fotovoltaico autónomo.

CONCLUSIONES

1. Se realizó el diagnóstico de la viviendas definiendo que el municipio Morón en el Consejo Popular Vaquerito las 8 viviendas sin electrificar están entre 400 y 500 m de la red donde se podrá conectar al SEN por lo que se propone eléctrica conectándose las viviendas al SEN
2. Se diseñó el micro sistema fotovoltaico autónomo en correspondencia con las prestaciones que pondrán tener los habitantes a partir de que se logre instalar el sistema con lo cual mejora su calidad de vida, definiendo que para la iluminación de la vivienda con 6 lámparas, usos de un refrigerador , uso de un TV, facilidad de tener un cargador de celular y una olla de presión y un equipo de música pequeño el consumo total anual asciende a 2.755 Wh/día (En este caso coincide con el medio diario, pues el consumo que se ha estimado es constante todo el año) *para lo cual* se requieren 7 paneles solares de 180 w, un inversor de 1812 w de potencia con un rendimiento del 95%, el regulador de carga debería soportar una corriente, como mínimo de 47 Amp. a su entrada y 26

Amp. a su salida con 6 días de autonomía con lo cual se satisface la resiliencia energética frente a eventos meteorológicos.

3. La valoración financiera del presupuesto y el costo de la instalación de un módulo de viviendas aisladas demostró la factibilidad de instalar este micro sistema fotovoltaico autónomo en las viviendas con menos de 1km de la línea eléctrica del SEN.

BIBLIOGRAFIA

STOLIK D.: Cuando la única energía es el sol. Un programa fotovoltaico para Cuba, Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Junio1992.

BARLOW R.L. et al.: Status and experience of solar PV pumping in developing countries. Tenth B.C. Photovoltaic Solar Energy Conference. Proceedings of the International Conference. Lisbon, Portugal. April 8-12, 1991. pp. 1143-1146.

SOROKIN A. & Zamboni G.: Zambelli photovoltaic pumping station (70 kWp) operating experiences and results. Tenth B.C. Photovoltaic Solar Energy Conference. Proceedings of the International Conference. Lisbon, Portugal. April 8-12, 1991. pp. 822-825.

KILFOYLE D. et al.: Lessons learned from testing, photovoltaic vaccine refrigerators. 21ST IEEE Conference on Photovoltaic Specialists Conf Proceeding. Orlando, Florida. May, 1990. v. 2. pp. 985-990.

KATO K.: International Photovoltaic Science and Engineering Conference(PVSEC 5). Kyoto, Japan. November, 1990. pp.901-904

SUSUKI M. et al.: International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC 5). Kyoto, Japan. November, 1990. pp.889-992.

ZABUKOVER J.: DOE. USA. 1991.

PAGLIAI G.: PV and TLC. Workshop. on Mat. SC. and Phys. of Non Conv. En. September, 1989. Trieste.

JENING C. et al.: Photovoltaic research at Pacific Gas and Electric Company. Twenty-Second IEEE Photovoltaic Specialists Conference – 1991. Las Vegas. October 7-11, 1991. vol. 1. pp. 593-599.

Software utilizado, Solar Pro v4.6

