Dimensionamiento solar fotovoltaico usando System Advisor Model para proyectos rurales agrícolas sin red eléctrica compartida

Andrés Giovanny Carrión Granados

Luis Alejandro Arias

Juan Sebastián Solís Chaves

Resumen

Como propuesta para cambiar el uso de la energía tradicional por una alternativa solar fotovoltaica que trabaje en conjunto con un sistema de almacenamiento de baterías de forma eficiente, renovable y que, además, sea rentable para el consumidor, se presenta un dimensionamiento de un sistema solar fotovoltaico con bancos de baterías y su despacho en un sistema de riego (goteo) con motobombas para cultivos en la zona de Fusagasugá, a través del software *System Advisor Model*.

Palabras clave: agricultura; baterías; energía solar fotovoltaica; energías renovables; sistemas de riego; System Advisor Model SAM.

Introducción

La implementación del sistema interconectado nacional (SIN) en Colombia, presenta cifras alarmantes de falta de conexión en las zonas rurales del país, donde no se cuenta con la infraestructura requerida para suministrar este recurso a la gran mayoría de veredas, en 18 de los 32 departamentos del país. Gran parte de estas zonas manejan soluciones energéticas poco eficientes, al utilizar fuentes sustentadas a través de gasolina o diésel, evidenciando problemáticas en términos de contaminación, altos costos en compra del combustible y carencia de producción ininterrumpida de energía; estas regiones son denominadas tradicionalmente, con el término de 'zonas no interconectadas' (ZNI).

El dimensionamiento de un sistema fotovoltaico con baterías para realizar procesos de riego de cultivos con motobombas es simulado, usando el software SAM (por sus siglas en inglés: *System Advisor Model*), enfocándose en resultados técnicos y económicos que permitan brindar una solución renovable y económica que apoye

el cambio paulatino de las fuentes convencionales de energía (FCE), a las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER).

Generación de electricidad en la ZNI dentro del territorio colombiano

La importancia del desarrollo económico de un país depende del alcance que presenten los avances tecnológicos, sociales y de infraestructura que le permitan tener una población estable y sostenible, siendo el desarrollo agropecuario, una de las principales prioridades en el desarrollo económico, la cual genera empleabilidad y abasto para sus ciudadanos y la exportación de sus productos. Colombia, al tener una superficie de 11.143 millones de km^2 y, una población estimada de 51 millones de habitantes, ha identificado un mínimo desarrollo de infraestructura a la hora de interconectar eléctricamente las zonas rurales, donde se presenta la mayor concentración de producción agropecuaria.

Vivas (2019) sostiene que, aún hoy en día, en Colombia, existen 1.710 poblados que aún se alumbran con velas; la región occidental es la que presenta mayor carencia eléctrica, manifestando periodos energéticos de cinco a siete horas diarias, como en el poblado de Sipí, en el departamento del Chocó.

Las regiones norte y sur de Colombia también presentan tasas de conexión mínima; en la región central del país, a la cual se le dio prioridad en este estudio, a pesar de ser uno de los territorios que cuenta con la mayor infraestructura energética en el país, todavía se observa extensas zonas rurales que no se abastecen con un recurso ininterrumpido energético, siendo Chipaque, Cachipay, Fusagasugá, La Palma, Acacias, Nimaima, Medina, entre otros centros rurales en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca, Meta y Tolima, los que no tienen este recurso vital para los procesos agropecuarios modernos que requieren de electricidad para mantener los cultivos de cada zona.

Figura 1

Estado de la cobertura eléctrica y ZNI en la región central

Fuente: Hurtado et al. (2020).

Sistema de riego (goteo)

Con el propósito de cultivar un área determinada aplicando la cantidad necesaria en las plantas, se requiere generar un proceso de irrigación superficial a través de componentes hidráulicos que producen diferentes variantes de riego inundación y por aspersión. Este sistema también es definido como una "aplicación oportuna y uniforme de agua a un perfil del suelo para reponer el agua consumida por cultivos entre dos riegos consecutivos" según Gurovich (1985, p. 62).

Para este proyecto, se realizó una asignación de riego al cultivo por goteo, el cual consiste en infiltrar el agua hacia las raíces del cultivo, irrigando de manera directa la zona primordial a través de tuberías y goteros (emisor) que mejoran el rendimiento de crecimiento y productividad de las plantas.

Las motobombas absorben la energía mecánica y la transforman en energía cinética, la cual se transfiere a un fluido, con el fin de movilizarla de un lugar a otro, a un mismo nivel o diferente nivel con velocidades variables, según sea el caso de su aplicación, y son fundamentales para los procesos de irrigación.

La motobomba de referencia para este proyecto es de tipo centrifuga, con motor eléctrico, trifásica (220/440V), el cual consume una potencia de 3 HP (caballos de fuerza) durante ocho horas de trabajo, tiempo perfecto para los procesos de irrigación de los cultivos.

Con el fin de brindar una alternativa energética al ZNI que se encuentra en Fusagasugá, se hizo los cálculos para que un sistema de riego disponga de una zona de 2000 m^2, teniendo en cuenta los elementos necesarios para generar un proceso de irrigación a los cultivos que son dispuestos en dicho lugar, como:

Tabla 1

Parámetros para el cálculo del sistema de riego

Parámetros	Valor/unidad
Terreno a cultivar	$2000m^2$
Cantidad de mangueras	Mag
Cantidad de goteros por mangueras	mag_{gt}
Cantidad total de goteros	gt
Camas de cultivo	$CCultivo$
Cantidad de agua esparcida para el sistema de riego en litros	L_{gt}
Cantidad de agua de referencia	L_r
Consumo por minuto	C_m
Tiempo de riego	T_r
Ancho del terreno	n

En aras de conocer la potencia que requiere la motobomba para realizar el riego en el cultivo, se debe considerar la energía que consume al mes y a diario; para ello, se utilizó las siguientes ecuaciones:

$$C_{cultivo} = \frac{n}{1{,}2} \Rightarrow \frac{20}{1{,}2} = 84 \text{ camas} \Rightarrow gt = \frac{mag}{mag_{gt}} \Rightarrow 84 * 400 = 16800 \; goteros \quad (1\text{-}1)$$

$$C_m = \frac{L_{gt}}{60min} \Rightarrow \frac{16800L}{60min} = \frac{240L}{min} \Rightarrow T_r = \frac{L_r}{C_m} \Rightarrow \frac{6000L}{240L/min} = 25 \text{ minutos} \quad (1\text{-}2)$$

El consumo energético que presenta la bomba será de unos 25 minutos, exponiendo la cantidad de tiempo que requiere el cultivo para mantenerse hidratado y que, no evidencie sequedad o ahogamiento. Para conocer la carga que requiere la motobomba, se toma la energía que esta produce durante una hora, según el diseño de referencia de 3.3 HP (2,24 kWh), junto con el tiempo en el que debe producir energía, brindando un total de 0,929 kWh. Para fines de la simulación, la energía mensual requerida referenciada por estas motobombas para 4000 m^2, es de 1,858 kWh. La estimación de este consumo energético se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2

Energía requerida de la motobomba en el riego

Energía	Periodo	Energía	Periodo
2.23 kWh	60 minutos	0.0373 kWh	1 minuto
0.0373 kWh	1 minuto	0,929 kWh	25 minutos

Generación Eléctrica Solar Fotovoltaica

La energía solar es considerada como un recurso renovable en las FNCER; funciona a través del efecto fotoeléctrico, absorbiendo la radiación electromagnética generada por el sol; es denominada en irradiancia (magnitud que describe la potencia incidente por superficie con una unidad de medida en kW/m^2) e irradiación (unidad de superficie a lo largo del tiempo).

Dichas emisiones de radiación electromagnética no se obtienen únicamente de forma directa al sol; puede haber otros métodos de recolección a través del reflejo de la radiación que pasa sobre las nubes, el aire, vapor y otras partículas encontradas en el ambiente (radiación difusa) y el reflejo que presenta desde la tierra, edificios, montañas y otros cuerpos (radiación albedo). De estos elementos, se presenta tecnologías que utilizan este recurso y generan energía térmica o eléctrica que trabajan de forma variada, como:

- Heliostatos: recolección solar al movimiento de dos ejes
- Térmicos: uso del suministro de agua, con el fin de calentarla a través de la energía calorífica que emite el sol

- Fotovoltaica: transformación directa de la luz solar en electricidad, empleando el efecto fotoeléctrico, transfiriendo la radiación del sol a una celda y, produciendo una diferencia de potencial eléctrico entre ellas, generando corriente continua (CC).

Sistemas de Producción eléctrica solar fotovoltaica

Teniendo en cuenta factores de uso, economía y eficiencia en el mercado global, un sistema solar fotovoltaico (SFV) presenta mayor crecimiento, al volverse recurso energético más económico y seguro a nivel mundial, generando mejores oportunidades de compra y mejorando su producción, como consecuencia de los apoyos realizados por parte de los gobiernos globales e inversiones privadas y, por cumplir con los objetivos de energía asequible y no contaminante impuesto por las Naciones Unidas.

La producción de un SFV se explica como un conjunto de equipos que permiten la generación de energía eléctrica a través de la luz solar, con el fin de contribuir al gasto energético que se observa en grandes y pequeñas ciudades, pueblos, zonas rurales y apartadas, donde el consumo eléctrico utiliza, mayormente, productos de energía fósil (gasolina, diésel y carbón).

Los proyectos SFV están divididos en sistemas conectados a la red local eléctrica, la cual funciona como un aporte que tiene como fin, apoyar el requerimiento eléctrico local y el sistema fotovoltaico independiente (*Stand alone PV – System*), que opera de forma autónoma, puesto que su tarea se basa en cumplir al 100 % la demanda eléctrica, dependiendo de su necesidad.

Los componentes que establecen un sistema SFV están enfocados en generar, regular, transformar y distribuir la energía, con equipos específicos que trabajan en un proyecto eléctrico concreto; estos elementos son:

- Módulo solar fotovoltaico
- Regulador de carga
- Inversor solar (si es requerido para equipos con carga CA)
- Baterías para aplicaciones solares.

Los módulos solares, también conocidos como paneles solares, están conformados por numerosas celdas unificadas que convierten la luz en electricidad, proceso conocido como efecto fotoeléctrico, el cual se genera al retener los fotones, que contienen electrones dentro de la luz solar. Estos se encuentran retenidos, generando una corriente eléctrica que puede ser utilizada como electricidad (Gillman, 2015).

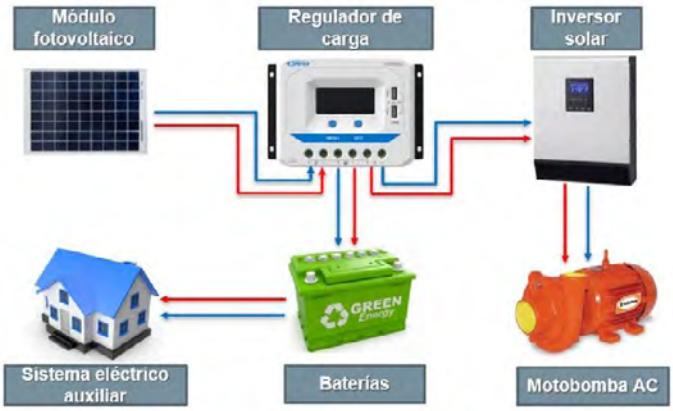
La función del inversor de corriente se basa en cambiar la tensión de entrada en corriente continua producida por los módulos solares, a una de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada, con el fin de que el sistema SFV distribuya su producción en equipos de CC y CA.

Los sistemas SFV no compensan el consumo energético en horas de la noche; por lo tanto, en la implementación del proyecto se incluye un banco de baterías que

permita una distribución con equipos con carga CA y CC, con el objetivo principal de dimensionar un SFV para motobombas que trabajan con carga CA para riegos (goteo) en la zona de Fusagasugá y, en la noche, permitir con las baterías, energizar un sistema eléctrico auxiliar.

Figura 2

Esquema de diseño del sistema de riego SFV con banco de baterías



Es menester tener en cuenta factores de rendimiento y trabajo de cada uno de los equipos, que no solo permitan el funcionamiento del proceso, sino que se encuentren acoplados el uno con el otro, para no generar daños y pérdidas energéticas.

Para conocer la cantidad de módulos solares para el proyecto, es necesario realizar una ecuación de dimensionamiento que permita vislumbrar la cantidad de energía producida, que cumpla con la demanda del objetivo principal, que es el sistema de riego; para ello se tiene en cuenta la cantidad de módulos en total, que alimentarán el sistema (N_m), la potencia requerida por la motobomba (P) y, la capacidad total de carga que suministra el módulo (STC).

$$\mathbf{N_m \frac{P}{STC}} \qquad (2)$$

SAM, al ser un software norteamericano, cuenta con una base de datos de la Comisión Energética de California (CEC), la cual calcula la eficiencia de conversión de energía solar en electricidad, de los módulos disponibles comercialmente.

El módulo SunPower SPR-X22-480-COM seleccionado para este proyecto, utilizando la base de datos CEC, produce una potencia máxima de 480.320 W; está conformado por 128 celdas solares individuales que generan alrededor de 3.73 W, dependiendo del clima de la zona. Para calcular la cantidad de módulos que necesita el sistema SFV, se procede a realizar el cálculo pertinente, utilizando la ecuación (2.1)

$$N_m = \frac{P}{STC} = N_m = \frac{1858\,W}{480.320\,W} = N_m = 3.8\,modulos \qquad (2.1)$$

La cantidad de módulos requeridos, según la ecuación 2.1, muestra que son necesarios, redondeando la cifra, cuatro módulos; no obstante, la eficiencia de las celdas solares al día de hoy no generan una eficiencia del 100 %; el módulo de referencia cuenta con un porcentaje de 22,23 7 %; en consecuencia, se requiere acomodar un número mayor de módulos que permitan reemplazar esta carencia energética, con el fin de que el sistema sea autónomo y no dependa de un sistema interconectado para generar el proceso deseado.

Sistema de almacenamiento de energía por baterías – BESS

Las baterías para aplicaciones solares cumplen con la función de acumular la energía generada por el SFV, en situaciones donde la producción energética de los módulos sea escasa o nula. Dicho proceso de almacenamiento se produce a través de un proceso químico que puede clasificarse en diferentes métodos, dependiendo del tipo de batería que se selecciona.

Los tipos de baterías para aplicaciones solares de mayor uso actualmente en el mercado son las de ácido de plomo, las cuales están divididas en diferentes categorías, obedeciendo a su proceso químico:

- Inundadas: baterías que se encuentran sumergidas con un electrolito líquido
- VRLA gel: baterías reguladas por válvulas; el electrolito no es un líquido, sino un polvo de silicio que forma un gel para la batería
- VRLA AGM: baterías que absorben la energía a través de una fibra de vidrio situada entre sus placas.

Otro tipo de baterías en el mercado global son las baterías Ion-Litio, denominadas así, debido a que usan sales con este compuesto, para permitir el paso de electrones mediante ciertas reacciones químicas que liberan y almacenan la energía eléctrica.

Según Beard (2019), no son sencillas las condiciones de funcionamiento y el diseño de los componentes en el ciclo inicial, como tampoco, la inspección de los cambios en varios parámetros a lo largo de varios ciclos. Además, en muchos parámetros los cambios dependen de las condiciones de funcionamiento o del historial de la batería, con lo cual es necesario considerar los parámetros físicos con que están fabricadas las baterías.

La Tabla 3, a continuación, expone los parámetros físicos generales con los que cuentan las baterías.

Tabla 3

Características comparativas entre las baterías de Ácido de Plomo e Ion-litio

Batería	Inundadas	VRLA AGM	Ion-Litio
Seguridad	Aceptable	Alta	Muy alta
Ciclos	200-500	500-1200	2000-5000
Contaminación	Muy contaminante	Contaminante	Contaminante
Profundidad de descarga	50-60 %	60-70 %	70-90 %

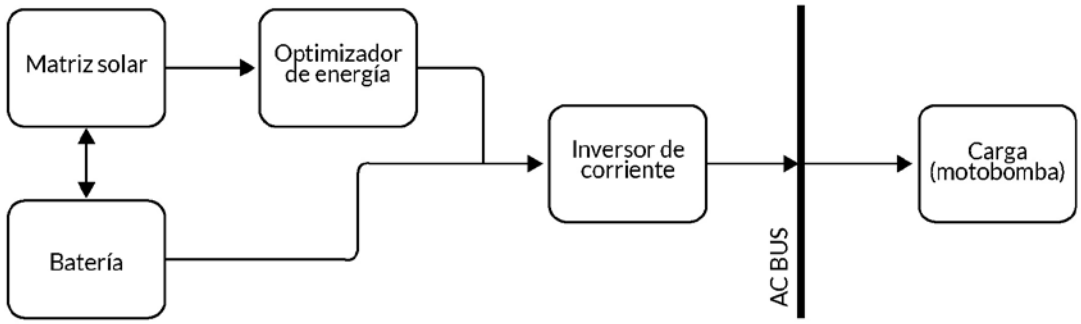
Los parámetros expuestos ejemplifican los componentes físicos que más se debe observar al momento de ejecutar la selección del banco de baterías. Cabe destacar que, el proceso se efectúa teniendo en cuenta factores externos como los económicos, ambientales y de uso, para un proyecto. Una batería está diseñada para alimentar procesos eléctricos específicos, durante periodos de tiempo que van de tres a 15 días, con ninguna irradiación solar o, con una mínima (Unidad de Planeación Minero Energética, UPME, 2003).

Para definir la cantidad necesaria de potencia y capacidad en la batería, es necesario conocer la configuración que requieren las baterías para delimitar aquellos parámetros; por lo tanto, se requiere aclarar que la capacidad, que se determina en amperios hora (Ah), aumenta si la conexión de las baterías se realiza en paralelo; por el contrario, si la conexión se da en serie, el valor en aumento se presenta en la tensión (V), definiendo así el arreglo de baterías que se desea durante el tiempo de vida del proyecto.

Para la integración del banco de baterías en el sistema SFV de este proyecto se utilizó un modelo que asume el rol de generar energía que requiere una carga que no se encuentra conectada a la red eléctrica compartida.

Figura 3

Batería FV conectada en CC detrás del medidor



Uno de los factores con mayor relevancia en la selección de una o varias baterías solares es su ciclo de vida, que define todo el proceso que puede soportar el BESS

dentro de su capacidad ya que, con el tiempo, la degradación del compuesto que permite el efecto electroquímico que conserva la energía producida por los módulos, disminuye el rendimiento de las baterías, hasta el punto de hacer indispensable su reemplazo, ya que no cumplen con el ciclo de profundidad adecuado que abastezca el sistema.

La simulación realizada en SAM cuenta con un tiempo de vida de 25 años, con un proceso de estudio anual, con el propósito de conocer el comportamiento del sistema durante su periodo de trabajo. Atendiendo la posibilidad de que las baterías se hallen o no en un sitio con clima estándar de 25 °C, se utilizó un banco de baterías compuesta Ion-litio, dada su gran seguridad; además, cuenta con un mayor ciclo de vida, significando la cantidad de usos continuos que permite realizar la batería; su proceso de desarrollo es contaminante; no obstante, tiene la ventaja de poseer estándares más bajos que las baterías inundadas y, maneja una profundidad de descarga que se explica como la capacidad de descarga en la que trabaja la batería, sin afectar sus ciclos de vida.

La batería Ion-litio de referencia para el sistema de riego SFV es la UF483040; posee las características requeridas que soportan el proceso de riego durante un año, en caso de ser necesario, cumpliendo el objetivo de alimentar a un sistema eléctrico auxiliar. Las características que presenta esta batería son:

Tabla 4

Características del modelo de batería UF483040

Batería	Modelo UF483040
Química	Ion-litio (Li-FePO4)
Tensión nominal	51,2 V
Capacidad nominal	30 Ah
Energía nominal	1536 W
Max corriente de descarga	40 A
Ciclos de vida	>6000 ciclos
Temp. de operación	0 – 45 ° Celsius

Con el fin de conocer la cantidad necesaria de baterías para el sistema de riego, se realiza un cálculo que permita conocer la cantidad requerida de baterías para efectuar su proceso principal de alimentar un sistema eléctrico alterno y servir como soporte para el proceso de irrigación.

Los parámetros para el dimensionamiento de baterías en este proyecto son: Potencia de la motobomba o energía total a generar $E_\ gt$=929 kW/H; Horas de autonomía de la batería $D_{aut} \Rightarrow 1h$; Tensión de la batería seleccionada $V_n \Rightarrow 51.2V$; Capacidad de la batería seleccionada $C_n \Rightarrow 30Ah$; Energía total de la batería $E_{bt} \Rightarrow 1536W$; Profundidad de descarga de la batería $Pd_{max} \Rightarrow 80\ \%$.

Se toma E_{gt} y se multiplica por D_{aut} para conocer la autonomía de la batería Aut_b

$$E_{gt} * D_{aut} = Aut_b \Rightarrow 929\,W * 1\,h = 929\,W \quad (3.1)$$

Se divide el resultado por Pd_{max}

$$\frac{\mathbf{Aut_b}}{\mathbf{Pd_{max}}} \Rightarrow \frac{\mathbf{929W}}{\mathbf{0{,}8}} = \mathbf{1161W} \quad (3.2)$$

Obteniendo B_{opt}, el cual es el resultado del dimensionamiento óptimo del banco de batería. Luego se halla la capacidad que requiere el sistema C_{total} que se da en la unidad Ah, por lo que se toma B_{opt} y se divide por V_n

$$\frac{\mathbf{B_{opt}}}{\mathbf{V_n}} \Rightarrow \frac{\mathbf{1161W}}{\mathbf{51{,}2V}} = \mathbf{22,6Ah} \quad (3.3)$$

Para la cantidad de baterías que se requiere en el sistema, en conexión paralela se toma C_{total} y se divide por C_n, mismo proceso que se realiza para conocer la conexión en serie con los valores B_{opt} dividido con E_{bt}

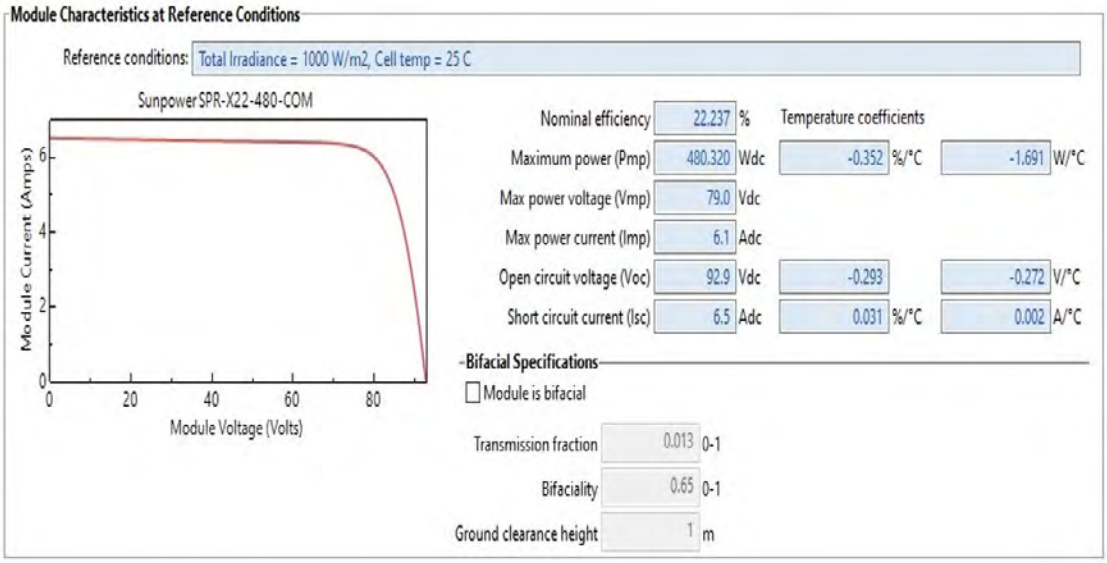
$$\frac{C_{total}}{C_n} \Rightarrow \frac{22{,}6Ah}{30Ah} = 0,75\ baterias \quad | \quad \frac{B_{opt}}{E_{bt}} \Rightarrow \frac{1161W}{1536W} = 0,75\ baterias \quad (3.4)$$

System Advisor model – SAM

SAM es una herramienta de simulación que vincula los modelos de rendimiento técnicos a modelos financieros, detallados para predecir el rendimiento económico de los sistemas de energía renovable, como sostienen DiOrio et al. (2015). Este sistema permite suponer un gran número de simulaciones de modelos renovables, facilitando al usuario, configurar procesos con las condiciones óptimas de utilizar el recurso energético en el entorno.

Figura 4

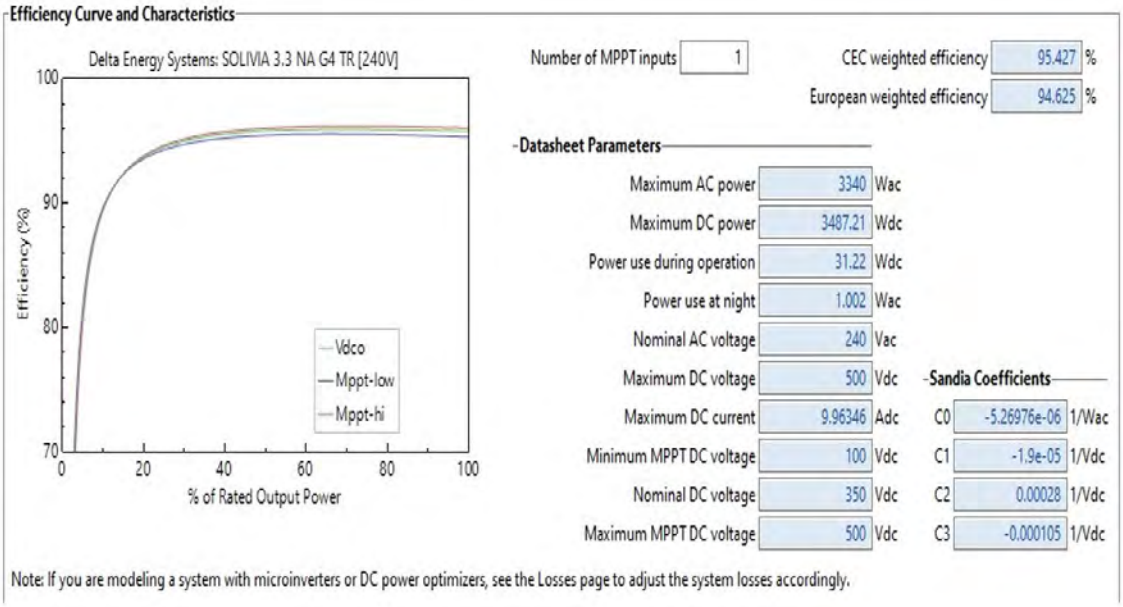
Curva de corriente-tensión y características del módulo de referencia



Ya sean modelos de energías solares concentradas, fotovoltaicos, eólicos, marinos, geotérmicos, entre otros, este sistema permite acomodar trabajos en donde es posible incluir BESS y pilas de combustible fotovoltaica, que funcionan como complementos detallados para los dos primeros procesos mencionados.

Figura 5

Eficiencia y características del inversor de referencia

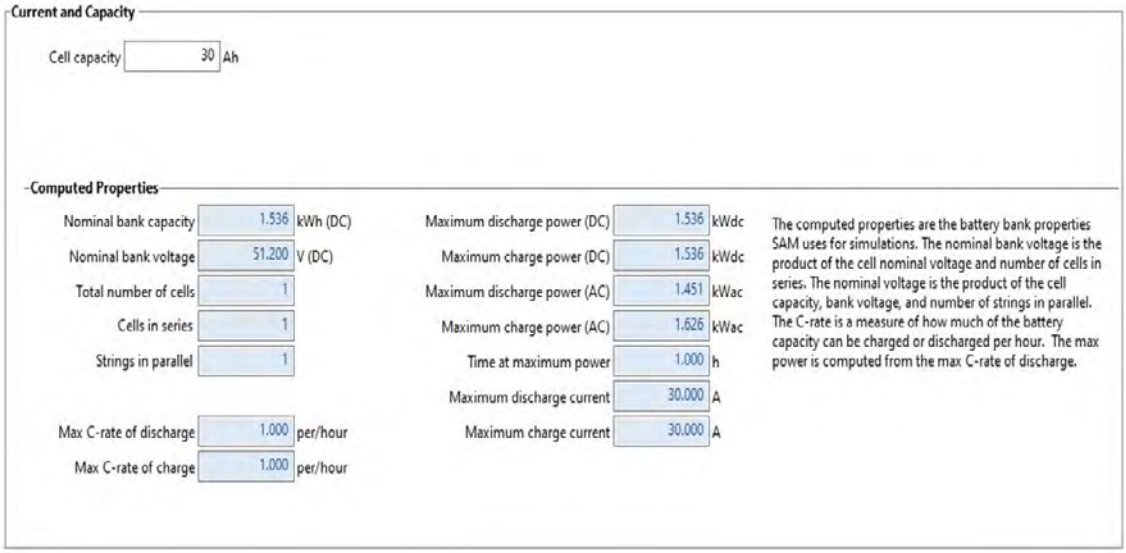


El modelo SFV es el recurso que se optó para los procesos de irrigación de un cultivo en la zona de Fusagasugá, aplicando el sistema fotovoltaico detallado, que divide sus configuraciones con el fin de escoger el tipo de módulo, inversor, carga y configuración BESS que se requiere para este proyecto.

El sistema fotovoltaico detallado permite realizar configuraciones de selección de posición geográfica de la zona a trabajar, establecer un diseño adecuado para el trabajo, donde se incluye la cantidad de módulos e inversores para el proceso, junto con el emplazamiento azimut que ubica a los módulos, dependiendo de la posición solar e, introducir los cálculos para la carga y las baterías, junto con su proceso de uso de forma anual.

Figura 6

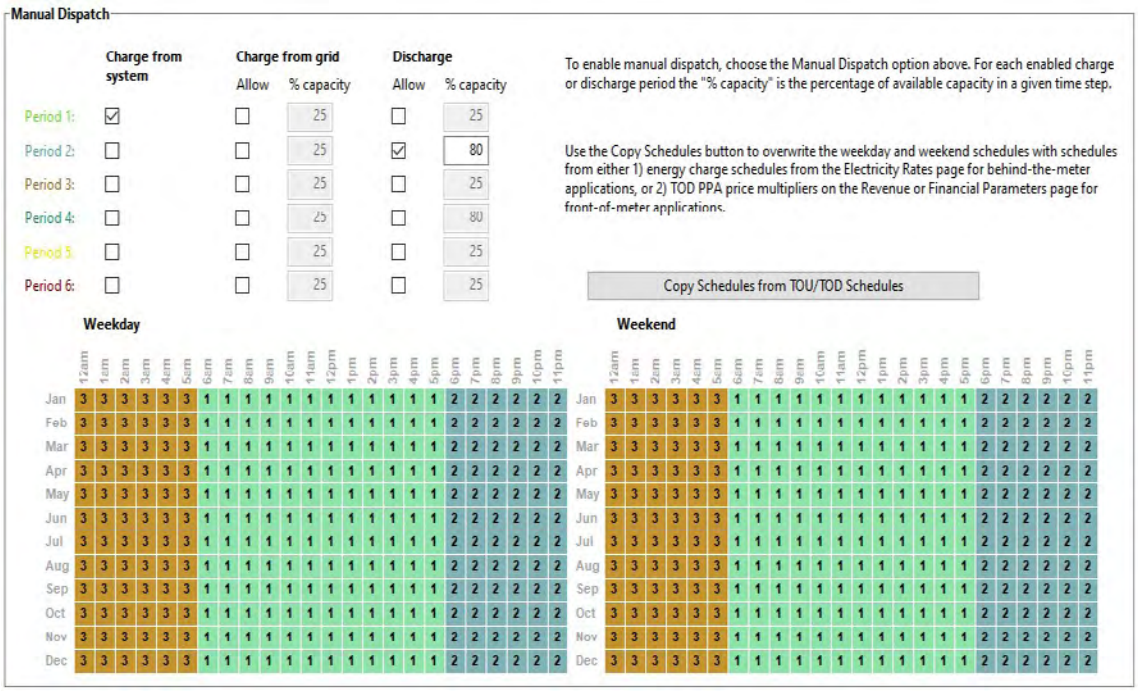
Configuración SAM de la capacidad y corriente del banco de baterías



SAM no cuenta con un catálogo de selección propia de baterías que se venda en el mercado global. Para su configuración, el usuario debe incluir todos los datos que requiere un banco de baterías (tiempo de vida, capacidad, número de baterías, voltaje de las celdas, degradación, pérdidas, despacho), con el propósito de simular un banco propio que puede usar como referencia, los parámetros técnicos y químicos de la misma, para que el proceso de simulación permita ser llevado al trabajo de campo.

Figura 7

Configuración del calendario entre semanas del banco de baterías



Resultados técnicos de simulación

La meta de este proyecto consiste en integrar un sistema de generación SFV, a un sistema de riego de forma autónoma, reemplazando el uso de fuentes tradicionales de energía fósil en las ZNI del país, utilizando como referencia, el sector rural de Fusagasugá, con el fin de brindar un efecto positivo en el impacto ambiental, reduciendo las contaminaciones emitidas por los gases de efecto invernadero, derivador del proceso de combustión de la gasolina y el diésel.

Por lo tanto, el proceso de implementación debe funcionar de tal forma que el sistema sea autosustentable y permita el cambio energético de las celdas con el banco de baterías, cuando sea necesario; de lo contrario, su función se empleará en las tareas principales a las cuales se le ha entregado una asignación.

Los principales datos que obtuvo SAM al realizar la configuración del sistema, muestran resultados de capacidad, energía y rendimiento, exponiendo valores del primer año de vida del proyecto.

Tabla 5

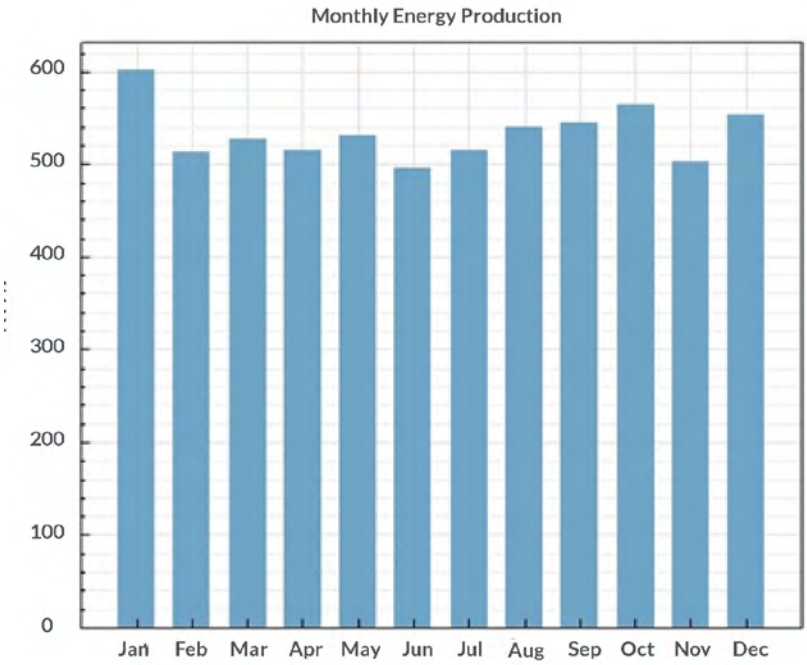
Resumen de parámetros energéticos y de rendimiento del sistema en el primer año de uso

Parámetros	Valor
Energía anual (año 1)	6.401 kWh
Factor de capacidad (año 1)	19 %
Rendimiento energético (año 1)	1.666 kWh/kW
Rendimiento de la batería	87,66 %
Carga de la batería	100 %

Otro elemento importante que SAM expone es la generación mensual de energía en el primer año; esto permite conocer los valores de producción de mayor y menor rendimiento que hubo en el primer año de vida del proyecto.

Figura 8

Producción de energía mensual para el primer año de vida útil del proyecto

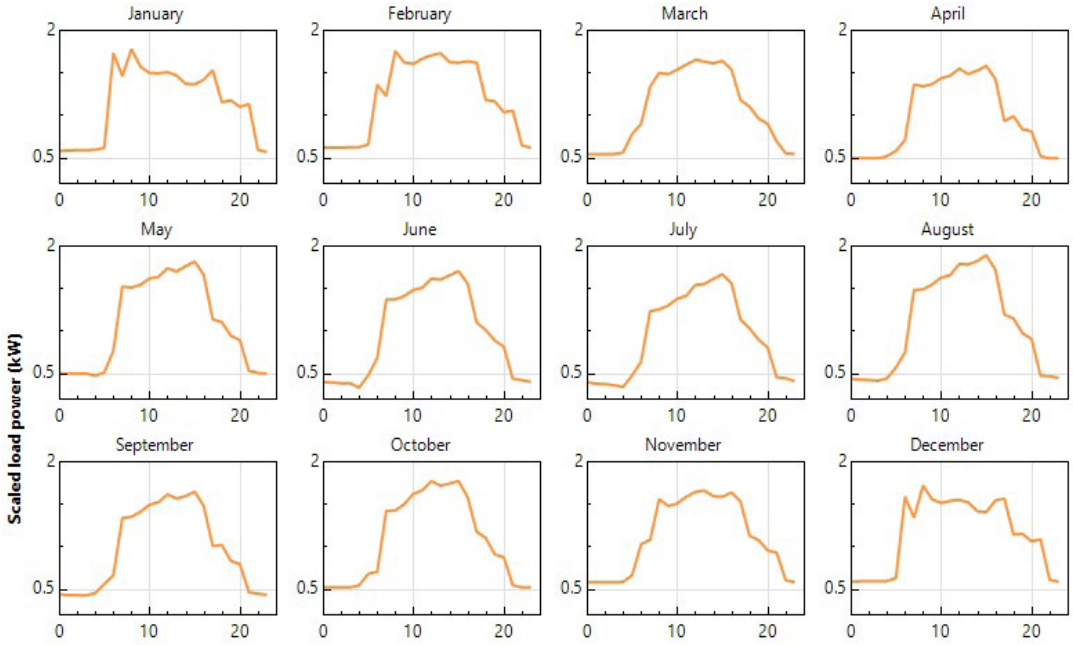


Esta variación se presenta debido a los cambios climáticos que tiene la zona de Fusagasugá a lo largo del año, siendo la temporada de lluvias que hay en mitad de año, una temporada de menor rendimiento energético, como se puede evidenciar en el mes de junio, donde los módulos solares recolectaron alrededor de 4.95 kWh, en comparación con el mes de enero, donde hay mayor producción, exponiendo datos con un valor de 6 kWh.

SAM despliega algoritmos que representan en tablas, la potencia configurada para las motobombas, en diferentes paneles que evidencian el consumo diario, semanal, mensual; y, agrega un perfil de carga, comparativo con los meses en donde se utiliza la motobomba. Este resultado permite exponer de mejor forma, el consumo que requiere el sistema dentro de un perfil de carga.

Figura 9

Perfil promedio diario mensual de un año de carga eléctrica

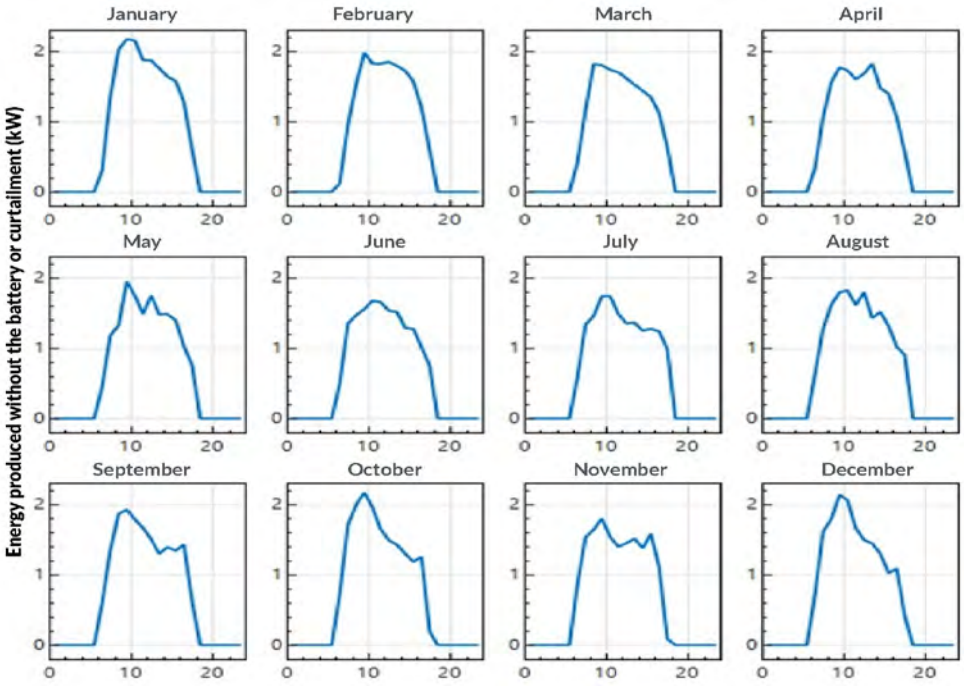


Se puede observar que, los datos ingresados en SAM muestran un consumo entre los 1.5 y los 2 kWh, entregando una mayor energía después de las 12 h y reduciendo su carga desde las 18 h, debido a la distribución explicada. Este margen se muestra debido a los picos de carga que la motobomba puede llegar a consumir dentro de los 25 minutos que requiere de trabajo.

Al realizar la configuración de los módulos en SAM, se detalla la cantidad de energía acumulada a lo largo del día, empezando sus funciones a las 5 h y concluyendo su proceso a las 18.30 h. A menor radiación, menor cantidad de energía producida, debido a la eficiencia de los paneles y al acoplamiento de seguimiento, en donde los módulos van en sincronía con el movimiento del sol, que aumenta o disminuye su producción.

Figura 10

Energía producida sin batería o reducción mensual

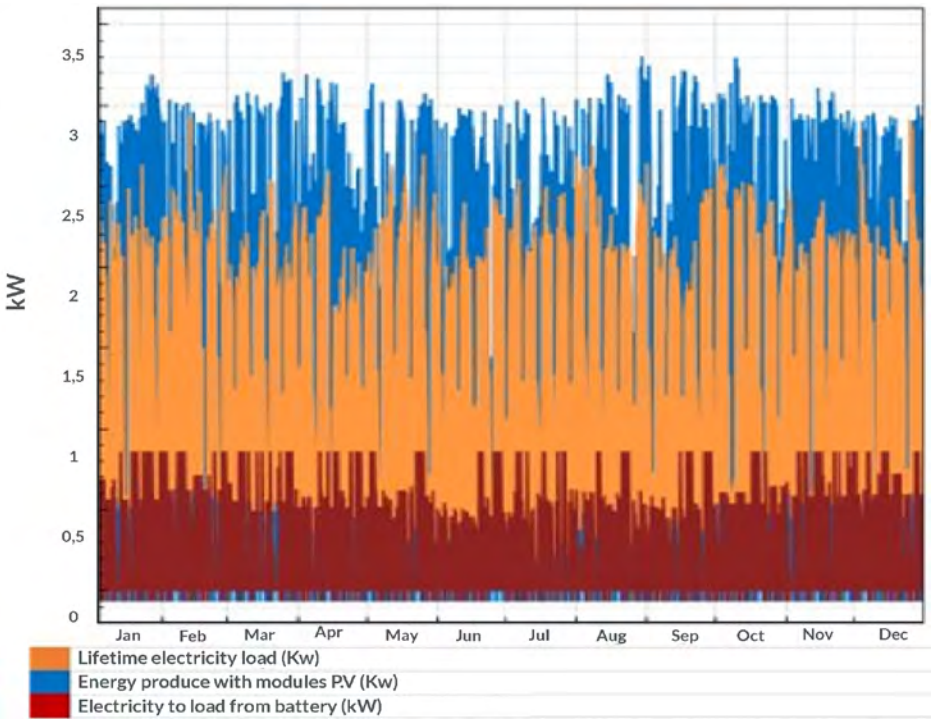


Como se logra evidenciar, con el paso de los meses el sistema genera menos energía, debido a la época de invierno y temporada de lluvias en la que entra Fusagasugá durante el año. Este es un factor que no contempla el cálculo teórico, al igual que la reserva que requieren las baterías, por lo que es necesario cubrir con más módulos la cuota energética que requiere el sistema.

El siguiente resultado sirve como conclusión en el ejercicio de simulación, en aras de exponer un diseño óptimo para la ZNI agricultora de Fusagasugá y, servir como preludio a una guía de configuración y simulación en un sistema de riego SFV en el programa SAM.

Figura 11

Resultados de carga y energéticos del sistema



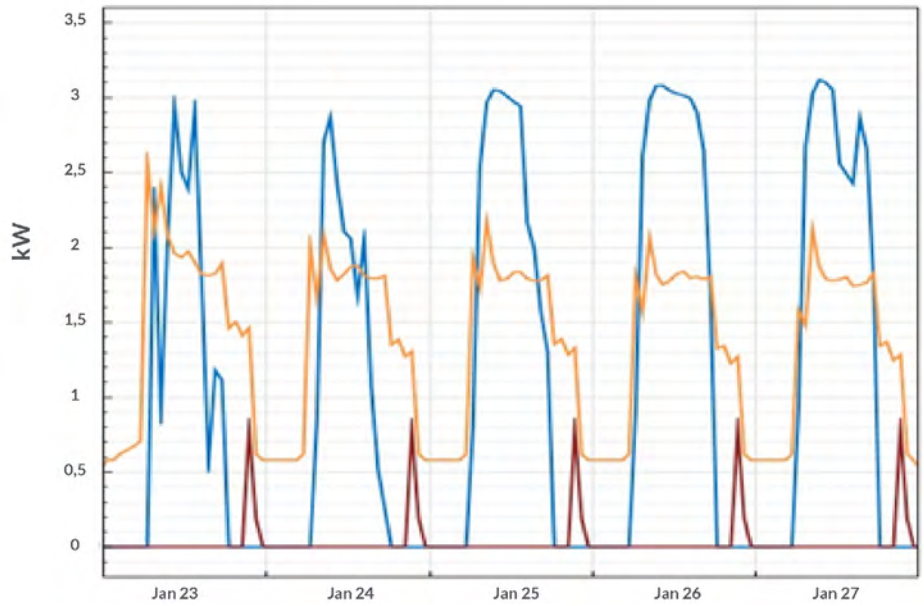
Las series de tiempo con valores instantáneos son la comparación de los resultados de carga, energía solar producida y producción energética de las baterías de forma anual. La carga generada oscila en los 1.5 a los 2 kWh; no obstante, SAM no es un software hecho para procesos de riego; los picos energéticos presentados en la Figura 11 son la muestra de un proceso de consumo comercial, por lo que es menester realizar ajustes dentro del software, para brindar resultados a favor de que el lector reconozca la utilidad de la simulación a la carga de las motobombas en cualquier horario del año.

Se concluye que, el uso de energía anual en el sistema siempre será mayor a la carga que requiere el sistema de riego y, a este resultado, las baterías cumplen con su objetivo primario de brindar energía a un sistema eléctrico alterno, ya sea de uso residencial o comercial.

Para interpretar más detalladamente los resultados expuestos, la Figura 11 tiene como objetivo, demostrar dos periodos de tiempo (enero y junio) de trabajo del sistema, donde se contempla sus comportamientos entre el mes con mayor y menor producción energética.

Figura 12

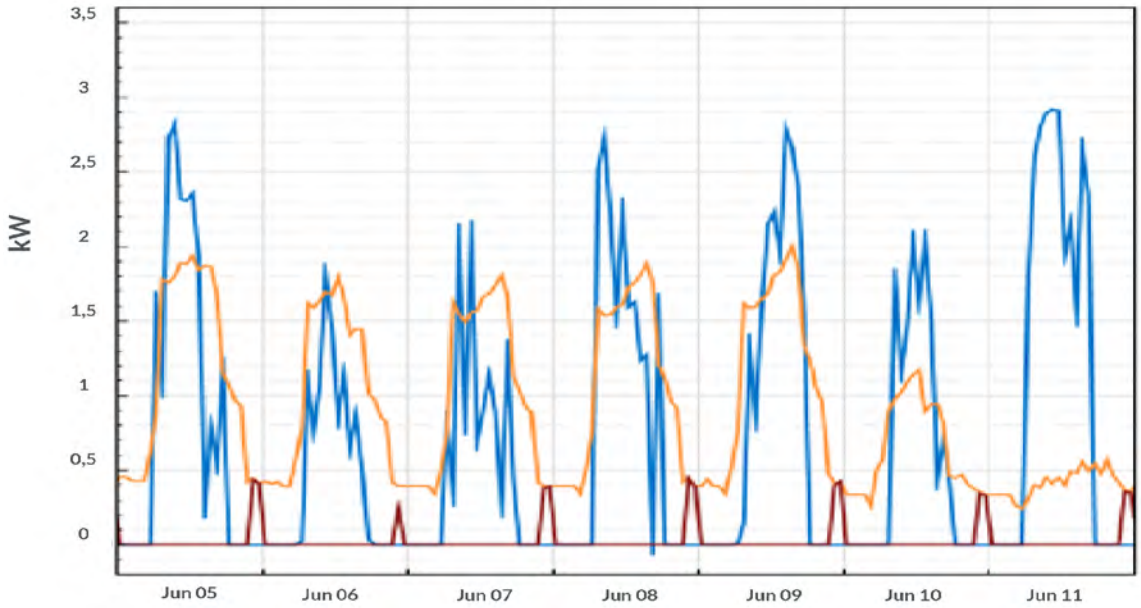
Resultados de carga y energéticos en una serie de tiempo en el mes de enero



La energía producida por los módulos solares genera la cantidad estimada para alimentar la carga de las motobombas durante todos los meses del año, suministrando alrededor de, entre los 2 a los 3.1 kWh, sin requerir de un suministro externo de electricidad durante el mes de enero, al mismo tiempo que alimenta el banco de baterías durante el día y este realiza su proceso de descarga para procesos eléctricos alternos de entre los 0.5 a los 0.85 kWh durante seis horas continuas.

Figura 13

Resultados de carga y energéticos en una serie de tiempo en el mes de junio



Durante el mes de junio, los resultados evidenciaron un cambio en la acumulación y entrega de energía, a pesar de que el sistema tuvo los mismos componentes; debido a los cambios climáticos y a la temporada de lluvias presentes en la zona de Fusagasugá, el sistema redujo su producción a un pico mínimo de 1.9 kWh el día 6 de junio, aumentando su producción a un valor mayor de los 2.5kWh el resto de la semana; sin embargo, cumplió con el objetivo de suministrar los 1.85 kWh de energía que requería el sistema de riego durante toda la semana, al igual que las baterías.

Conclusiones

Se explicó de forma detallada los procesos que se debe llevar a cabo para dimensionar y simular un modelo computacional técnico de un Sistema SFV con un banco de baterías que alimenta una motobomba que se utiliza para el riego de cultivos dentro de la ZNI de Fusagasugá, Cundinamarca, Colombia.

A través del software SAM se logró realizar una simulación cercana a la realidad, la cual define los procesos de transformación de energía de los módulos solares, obteniendo valores variables de energía generada que cumplen con el objetivo de entregar 0,926kWh por motobomba a la carga. La interacción con un banco de batería cumple con los 6000 ciclos de carga y con un porcentaje de carga del 80 %, descarga del 20 %, para la potencia de un sistema eléctrico alterno.

Luego de un proceso de análisis del banco de baterías, se determinó que SAM utiliza las baterías como una herramienta de soporte dentro del sistema, ya que no lo considera como un generador primario de energía, sino que lo utiliza como respaldo, en caso de llegar a ocurrir una falla en el sistema de generación SFV, por lo que su principal objetivo es el de cubrir el gasto energético de un sistema eléctrico alterno y, como objetivo secundario, servir como soporte al sistema de riego.

Referencias

Beard, K. W. (2019). *Linden's Handbook of Batteries* (5th ed.). McGraw-Hill

DiOrio, N., Dobos, A., Janzou. S., Nelson, A., & Lundstrom, B. (2015). *Technoeconomic modeling of battery energy storage in SAM*. National Renewable Energy Laboratory.

Gillman, P. (2015). *SAM Photovoltaic Model Technical Reference*. National Renewable Energy Laboratory.

Gurovich, L. (1985). *Fundamentos y Diseño de Sistemas de Riego*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura IICA.

Hurtado, A., Patarroyo, A., Ocaciones, M. Á., Cruz, F., Salinas, J. D., Gutiérrez, L. A., Matéus, J. A., Villarraga, W. K., Guerrero, O. D., Ovalle, J. A. y Goyeneche, H. S. (2020). Eficiencia Energética. https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/04/Eficiencia-Energe%CC%81tica-V7.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2003). Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/energias_alternativas/normalizacion/ANTEPROYECTO_DE_NORMA-CELDAS_Y_BATERIAS_SECUNDARIAS_PARA_SIS.pdf

Vivas, J. (2019, 10 de febrero). Los 1.710 poblados que aún se alumbran con velas en Colombia. *El Tiempo*. https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/los-poblados-que-aun-no-tienen-energia-electrica-en-colombia-324980.