

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLE EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

-Mejores Prácticas-

Documento preparado por:	<p>DR. AARÓN SÁNCHEZ JUÁREZ Responsable Técnico del Proyecto Parcela Agrovoltaica, Sostenible Y Educativa Instituto de Energías Renovables Universidad Nacional Autónoma de México</p>
Informe realizado para:	<p>INFORME FINAL DEL PROYECTO SECTEI 220/21</p>
Institución financiadora:	<p>SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN Ciudad de México</p>

Febrero de 2024



MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

PREFACIO

Los procesos de monitoreo en las ciencias son la herramienta fundamental para la adquisición de datos de los fenómenos observables con el objeto de estudiarlos, encontrar correlaciones entre sus parámetros o variables y determinar los comportamientos e inferir su desenvolvimiento a futuro.

Para que la adquisición de datos provea datos confiables y seguros, se deben establecer metodologías que incluyan la identificación de parámetros y variables relacionados con el fenómeno bajo estudio, diferenciar aquellos que son cuantificables de los que no, determinar los métodos o procesos para cuantificarlos y seleccionar los instrumentos de medida con base a la magnitud del parámetro o variable a medir y la precisión e incertidumbre de la medida.

El presente documento tiene por objeto proporcionar ideas básicas sobre aspectos de monitoreo, identificación de variables o parámetros y los indicadores de seguimiento para proyectos agrovoltaicos.

Va dirigido a estudiantes, profesores e investigadores cuyas actividades están relacionadas con la observación de eventos, procesos, o fenómenos naturales y que están en la necesidad de medir comportamientos de variables y su estudio para la explicación y seguimiento de los eventos.

Aunque el lenguaje técnico en muchas ocasiones es complicado, se ha tratado de usar palabras comunes con el objeto de que los conceptos sean entendidos.



MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

AGRADECIMIENTOS

El material consultado para la realización de éste documento proviene de muchas fuentes, públicas y privadas, todas ellas disponibles en la literatura o en sitios electrónicos, algunas se agregan en la sección Bibliografía recomendada.

Se agradece a los integrantes y colaboradores del proyecto M en ES José Ortega Cruz, M en I Edson Osvaldo Ángel Ruíz, M en I Miguel Ángel Guevara Nieto, la búsqueda de material fuente y las aportaciones bibliográficas otorgadas.

RENUNCIA

Este documento fue escrito para que sirva de material de apoyo para el diseño y desarrollo de proyectos de monitoreo dentro del marco de documentos entregables para el Informe Final del proyecto *Parcela Agrovoltáica, Sostenible y Educativa*, No. SECTEI/220/21 financiado por la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación de la CDMX.

Ni la SECTEI, ni la Universidad Nacional Autónoma de México a través del Instituto de Energías Renovables, ni alguno de sus investigadores o empleados, garantiza o asume responsabilidad legal alguna, tanto explícitamente como implícitamente, por la exactitud, integridad o utilidad de cualquier información, aparato, producto o proceso mencionado, ni manifiesta que su uso no infringe derechos de propiedad privada.

Las prácticas y procedimientos que se presentan en este manual son recomendaciones solamente y no reemplazan ninguna normativa local, estatal o nacional aplicable a los edificios, electricidad, plomería u otros requisitos normativos. El lector es responsable de determinar los requerimientos normativos aplicables y permanecer en el cumplimiento con ellos.

Ni los autores y ni los colaboradores así como las instituciones que se mencionan ofrecen garantía alguna sobre el uso y aplicaciones de esta publicación. Este documento fue escrito de buena fe. La información y datos, los que provienen de fuentes públicas, se consideran correctos en la fecha de su publicación. La mención explícita o implícita de marcas comerciales, fabricantes, productos y servicios no implica que ellas hayan aportado apoyos, patrocinios, endosos o recomendación al autor o instituciones mencionadas; sólo se incluyen para facilitar el entendimiento de los temas cubiertos.

Cualquier comentario, sugerencia o aclaración debe dirigirse por escrito a:

Dr. Aarón Sánchez-Juárez; INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES- UNAM

Temixco, Mor., MÉXICO; e-mail: asj@ier.unam.mx



MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Contenido

PREFACIO.....	2
AGRADECIMIENTOS	3
RENUNCIA	3
Monitoreo de Parámetros y Variables en Sistemas Agrovoltáicos.....	4
Generalidades.....	4
INDICADORES de energía asociados a la CUBIERTA FOTOVOLTAICA.....	8
INDICADORES asociados al crecimiento de los cultivos	17
INDICADORES asociados al clima del medio ambiente	21
CASO DE ESTUDIO: Identificación y Descripción de indicadores de impacto para el proyecto pase	24
EQUIPOS NECESARIOS PARA LA CUANTIFICACIÓN de indicadores.....	28
PROTOCOLO DE MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS FENOLÓGICOS	32
INDICADORES COMERCIALES	35
CONCLUSIONES	36
ANEXO	37
SISTEMA DE ADQUIICIÓN DE DATOS EN LA PARCELA AGROVOLTAICA, SOSTENIBLE EDUCACIONAL. SENSORES Y EQUIPOS DE MONITOREO	37
BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA	51

Monitoreo de Parámetros y Variables en Sistemas Agrovoltáicos

GENERALIDADES

El monitoreo es un proceso continuo y sistemático de la observación y cuantificación de variables o parámetros que permiten identificar indicadores a través de los cuales se

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

puede verificar y determinar la eficacia de un proyecto, sus logros y fracasos, y en consecuencia, estar en la posibilidad de establecer medidas correctivas para optimizar los resultados esperados del proyecto.

Las actividades asociadas al monitoreo pueden incluir recolección de datos, observación de características, análisis de causa-efecto, u otro tipo de característica, todo con el fin de hacer un seguimiento al progreso del proyecto y determinar las acciones a seguir en pos de tener una mejora continua en él.

Para eso, es necesario crea metodologías o protocolos de observación y medición que deben seguirse, al pie de la letra, independientemente de quien vaya a realizar la medición u observación, con el objeto de que dicha actividad sea reproducible. Además, la elaboración de formatos de bitácoras y su llenado, ya sean en libretas de bitácora o formatos electrónicos, permite tener el acceso a la información de manera confiable y sin ambigüedades. Lo anterior e imperativo considerarlo e imponerlo para evitar grandes pérdidas de tiempo y esfuerzo.

Para el caso de proyectos Agrovoltáicos (**Agro-FV**), que puede conjugar 2 o más campos de las ciencias e ingenierías, sin contar las partes social, cultural y de salud, es imperativo identificar cuáles son los indicadores asociados a parámetros y variables que se desea medir o cuantificar (indicador cuantitativo) y el papel que juegan dentro del proyecto; y cuáles son los indicadores que no se pueden cuantificar (indicador cualitativo) pero que su seguimiento proporciona información de la manera en que evoluciona el proyecto. En la **Figura 1** se muestra un diagrama de flujo que representa los tópicos y pasos a seguir para contar con un sistema de monitoreo que garantice la veracidad de los datos adquiridos para que sean confiables para sus respectivas interpretaciones.

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

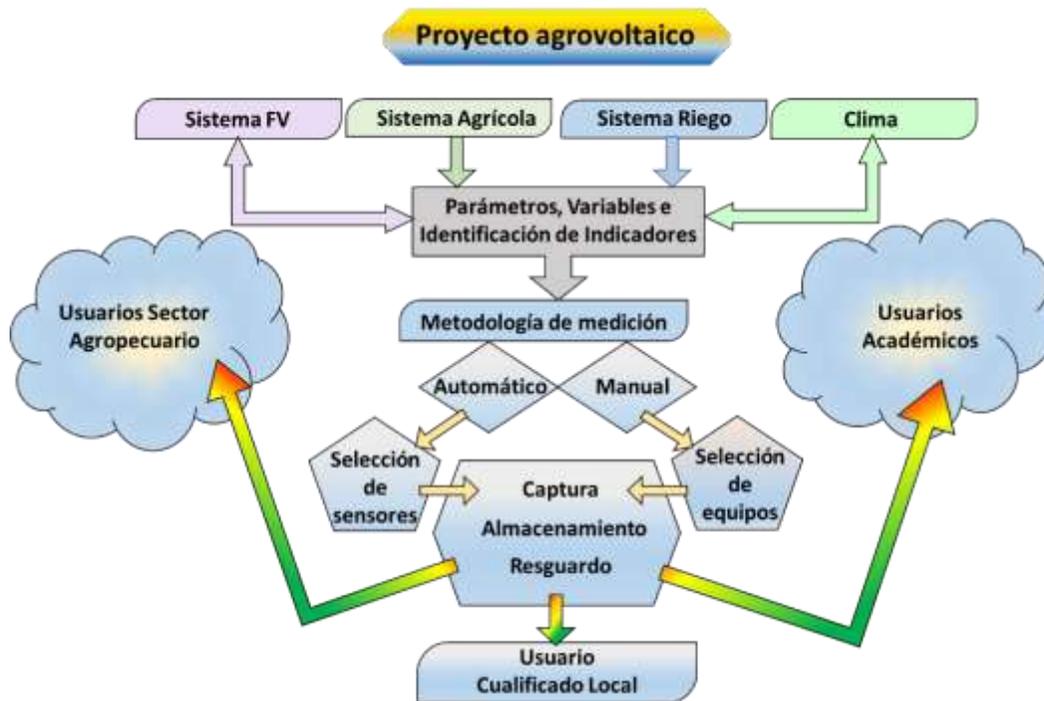


Figura 1: Diagrama de flujo propuesto para un sistema de monitoreo de las variables, parámetros e indicadores de un proyecto agrovoltaico.

A manera de ejemplo, en el Proyecto Parcela Agrovoltaica, Sostenible y Educacional (**PASE**), se conjugan varias áreas diferentes de la ingeniería y biología que son importantes para su investigación, a saber:

- Agrícola.- El tópico se centra en el estudio fenológico de cultivos que crecen debajo de una cubierta fotovoltaica.
- Eléctrica.- Determinación del desempeño eléctrico de una planta eléctrica fotovoltaica de 39.36 kW y su integración a una micro red convencional
- Hidráulica.- Captura y uso de agua de lluvia para los procesos de riego; redes hidráulicas para sistemas de riego automatizado; tratamiento de agua.
- Computación.- Implementación de sistemas de adquisición de datos; manejo de datos BIG-DATA; sistemas de control de riego; comunicación en la red; Programas de Monitoreo para el control, captura, almacenamiento y estudio de datos asociados a los indicadores elegidos

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

En forma general, la identificación de parámetros y variables en cada área respectiva, para la determinación propia de los indicadores de seguimiento, son los que permitirán analizar y estudiar la eficacia del proyecto bajo estudio.

Es claro que las tres áreas tendrán asociadas metas y actividades muy específicas que conlleven al objetivo buscado y para identificarlos, se pueden establecer ciertas preguntas:

- Área Eléctrica:- Dada una Cub-FV, su configuración de instalación eléctrica (número de módulos fotovoltaicos, la manera en que están conectados y la estructura (área cubierta y altura), entonces...
 - ¿Cómo varía la potencia eléctrica generada en función de la irradiancia diaria para un sistema fotovoltaico aplicado en un proyecto Agro-FV?,
 - ¿Cuál es el rendimiento Térmico en los parámetros eléctricos de generación de la Planta Eléctrica Solar Fotovoltaica o Generador Fotovoltaico (GFV)?,
 - ¿Cuál es la energía mensual y Anual producida; y como se compara con el valor estimado de ella para las condiciones climáticas del sitio?;
- Área Agrícola:- Dada la geometría de la Cubierta Fotovoltaica (**Cub-FV**), debajo de ésta, ...
 - ¿Qué especies y cuales o cuantas pueden crecer de manera óptima, sin que se presenten “anomalías”;
 - ¿Cómo afecta la climatología del sitio en la fenología de las especies vegetales cultivadas debajo de una cubierta fotovoltaica?;
- Área Hidráulica:- Dado el perfil de precipitación anual, temperatura ambiente y humedad relativa, entonces...
- ¿Cuál es la variación de la precipitación mensual durante el año?,
 - ¿Cuál es la estimación de la Precipitación anual?,
 - ¿Cuál es el requerimiento de agua suministrado a las plantas y cuál es su periodicidad?,
 - ¿Qué volumen de agua se requiere por ciclo/por planta/por especie?

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

- Área de computación:-Conociendo la infraestructura de computación del sitio de desarrollo del proyecto, entonces..
 - ¿Cuántos indicadores cualitativos y cuantitativos se identificaron?
 - ¿Cuántos y de qué tipo son los sensores para cuantificar indicadores?; ¿Qué es mejor, salida digital o análoga?
 - ¿Cuál es la mejor alternativa de programa para adquirir datos?
 - ¿Cuál es el periodo óptimo entre captura de datos para tener la mejor información?

Con base en la literatura y artículos publicados a nivel mundial se sabe que las tres áreas identificadas, así como los logros de los objetivos implícitos que se propongan en ellas, dependen fuertemente de la climatología del sitio, así que, lo que se determine para una localidad respecto al comportamiento de los valores de los indicadores y las conclusiones respectivas, no es un resultado absoluto; y por consecuencia quizá no reproducible.

Las Buenas Prácticas indican que es importante identificar los indicadores climatológicos que están involucrados con el desarrollo de un proyecto Agrovoltaico ya que juegan un rol muy importante durante el crecimiento de los cultivos, su medición (con que se pueden medir, procedimiento y equipo) y la manera en que afectan a los indicadores de crecimiento de los cultivos.

A continuación, se darán una serie de lineamientos a observar y recomendaciones a seguir para monitorear al conjunto de parámetros que forman las condiciones físicas ambientales y la relación entre éstos y los indicadores asociados al crecimiento de los cultivos.

INDICADORES DE ENERGÍA ASOCIADOS A LA CUBIERTA FOTOVOLTAICA

Es importante el conocimiento del tipo de proyecto Agrovoltaico el cual se pretende monitorear en términos de su infraestructura. Entre otros se puede mencionar los siguientes: Estructura metálica (superficie y altura); Tipo de cubierta fotovoltaica (fija, con seguimiento; cantidad de módulos, su distribución geométrica en el terreno y superficie activa);

Se debe conocer cuál es la topología del Sistema Fotovoltaico (**SFV**): interconectado a la red o sistema aislado; conocimiento sobre los equipos que lo integran como lo son los módulos fotovoltaicos (**MFV**) y su configuración eléctrica, acondicionadores de potencia

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

según sea la topología (inversores, controladores de carga y baterías), algún otro dispositivo que sea parte del balance del sistema (BOS); y la infraestructura eléctrica que forma parte de la red de distribución eléctrica local (REL).

Se sabe que los MFV generan electricidad del tipo *corriente directa* (CD); el circuito de salida está compuesto por dos conductores eléctricos, uno que es la terminal Positiva que suele etiquetarse como (Pos) o con el signo (+) y el otro que es la terminal negativa etiquetado como (Neg) o bien con el signo (-); y en un diagrama eléctrico unifilar, una línea que entra o sale de un objeto, representa al circuito de salida (CS) o circuito de entrada (CE) del objeto, que puede ser: una fuente, carga o aparato eléctrico.

Identificado lo anterior, deben seleccionarse las variables eléctricas asociadas a la generación y los parámetros ambientales que las afecten para estar en posición de cuantificarlas. Dentro de las asociadas a la generación, están la corriente, tensión y potencia eléctrica, siendo éstas dependientes de las condiciones ambientales tales como la irradiancia solar global (irradiancia W/m^2) incidente en el plano del arreglo FV, temperatura ambiente y velocidad de viento, estas tres últimas afectan a la temperatura de operación de los MFV. Dependiendo si la Cub-FV pertenece a un sistema fotovoltaico autónomo (SFV-A) o interconectado a la red (SFV-I), se determina en que sitio deben medirse las variables anteriores.

Por otra parte, es conocido que para medir la corriente eléctrica se usa un aparato llamado *amperímetro*, que se conecta eléctricamente en SERIE con el conductor por donde fluye la electricidad; mientras que, para medir la tensión eléctrica, se usa un *voltímetro*, conectado en paralelo con el circuito. Ambos tienen su símil hidráulico: el amperímetro actúa como un flujómetro, mientras que el voltímetro actúa como un medidor de presión. La tecnología actual de los transductores de corriente se basa en el Efecto Hall y son dispositivos muy prácticos que evitan la conexión en SERIE del amperímetro con el conductor. La **Figura 2** muestra varias fotografías de la oferta comercial de este tipo de sensores de Efecto Hall.



Figura 2: Fotografías que muestran varios sensores de corriente basados en el Efecto Hall

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Sistemas FV-Autónomos SFV-A

En el caso de un SFV-A con cargas que consumen corriente alterna (CA), el inversor CD/CA tipo autónomo está diseñado para entregar la potencia eléctrica que requieren las cargas eléctricas en un instante dado; es decir, si el inversor tiene una potencia nominal de 1,000 W y en un instante dado una carga de 100 W se activa, el inversor sólo entrega esa potencia. En este caso, la máxima potencia que puede entregar un inversor autónomo a las cargas eléctricas es aquella que consumen de manera continua todas ellas operando a un mismo tiempo, así que la selección de la potencia nominal de ellos depende de la potencia demandada de manera continua por las cargas.

En la **Figura 3**, que muestra un diagrama esquemático de la arquitectura de un SFV-A, se indica los sitios en que se recomienda colocar los sensores para medir corriente, tensión y potencia; los cuales son para los propósitos siguientes:

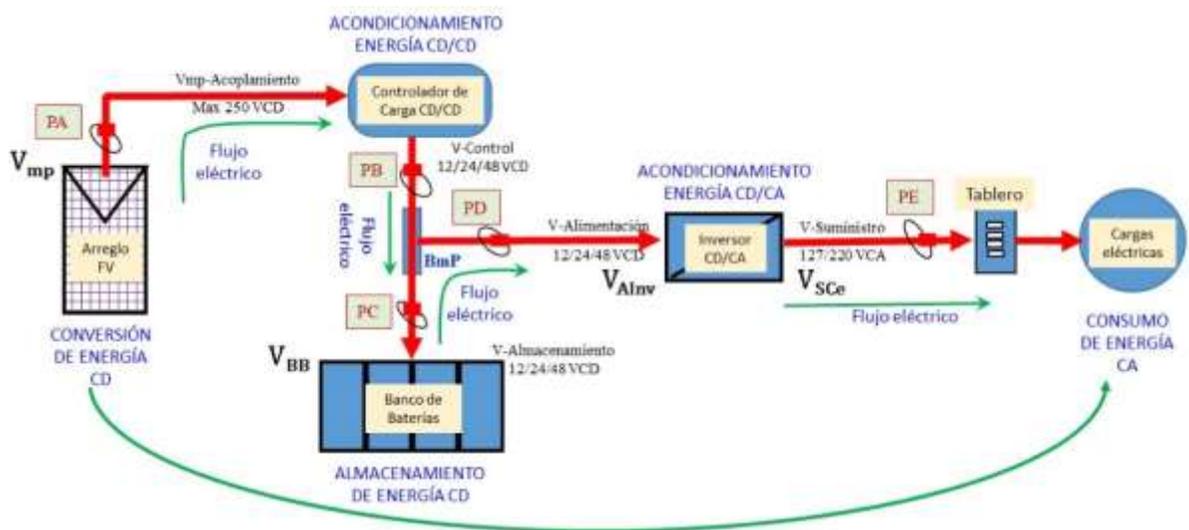


Figura 3: Diagrama esquemático de la arquitectura típica de un Sistema FV-A. Se indican los puntos de medición en el diagrama en donde se recomienda colocar los sensores para el monitoreo energético.

Punto de Medición PA: En ese punto, que se ubica en el circuito de salida del Arreglo Fotovoltaico (**CS-AFV**), se pretende determinar la máxima potencia (P_M) que genera el AFV bajo la condición de operación de ese instante, la que está depende de la irradiancia global incidente (G_G), la temperatura ambiente (T_{amb}), la temperatura del módulo o temperatura de placa o de celda (T_c) y la velocidad de viento (v).

La P_M está definida por el producto de la corriente I_M y la tensión V_{mp} que maximizan dicha operación ($P_M = I_M \times V_{mp}$). Dado que los Controladores de Carga se fabrican con la

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

versatilidad de tener, en su circuito de alimentación o entrada, un seguidor de la máxima potencia que produce el AFV (MPPT por sus siglas en inglés), el cual es dinámico, sensores colocados para corriente y tensión en dicho circuito, siempre medirán los valores para la potencia máxima I_M, V_{mp} del Arreglo FV. Esta es la razón de medir ahí la corriente y la tensión fotogenerada.

Se requiere de un sensor para medir la corriente y otro para medir la tensión; el sensor de corriente se instala en SERIE con el conductor positivo, mientras que el sensor de tensión eléctrica se instala en paralelo entre el conductor positivo y negativo.

Punto de Medición PB: El controlador de carga (CC) es un convertidor CD/CD, al conectarse a un Banco de Baterías (BB), leerá la tensión de éste y se conectará de manera continua a esa tensión, entonces convertirá la $P_M = I_M \times V_{mp}$ a una Potencia de Carga (P_{Cb}) a la Tensión de Carga del Banco de Baterías (V_{CBB}) y extraerá y enviará hacia él una corriente de carga I_{Cb} que, sin considerar la eficiencia del controlador, está dada por:

$$I_{Cb} = \frac{P_M}{V_{CBB}} \quad \text{Ec. (1)}$$

En ese punto de medición se requiere de: un sensor conectado en serie con el circuito de salida del controlador (CS-CC) para medir la corriente I_{Cb} y otro conectado en paralelo con él para medir la tensión V_{CBB} .

Punto de Medición PC y Punto de Medición PD: En el diagrama esquemático se ha integrado un Bus metálico (B_{mP}) para la conexión eléctrica en PARALELO de circuitos. El CS-CC llega al B_{mP} , entra y sale hacia el BB; y por el mismo circuito, pasa la corriente que requiere el inversor para entregar potencia a las cargas eléctricas, llega al B_{mP} y sale hacia el inversor a través del circuito (B_{mP} -Inv).

Dado que los puntos de medición PB, PC, y PD están en paralelo, todos ellos están a la misma tensión eléctrica, se tiene que:

$$V_{CBB} = V_{B_{mP}} = V_{A_{Inv}} \quad \text{Ec.(2)}$$

En consecuencia solo se requiere de un solo sensor de tensión para esos tres puntos.

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Nótese que si el inversor está sin operar, la corriente de carga al BB será la que sale del BmP, cuya magnitud es I_{Cb} ; pero si el inversor está operando y demandando una corriente I_{DInv} , determinada por una demanda de potencia en el inversor, entonces la corriente de carga que sale del Bus metálico hacia el BB, I_{CBmP} , será la diferencia entre ellas dos; es decir,

$$I_{CBmP} = I_{Cb} - I_{DInv} \quad \text{Ec.(3)}$$

En dicha relación hay tres casos a considerar:

- Si $I_{Cb} > I_{DInv}$, entonces I_{CBmP} es positiva y hay inyección al BB. Caso durante el día en que la potencia producida es mayor que la potencia demandada por las cargas eléctricas. El evento anterior determina el Ciclo de Carga del BB (CC_{BB}).
- Si $I_{Cb} = I_{DInv}$, entonces I_{CBmP} es cero, no hay inyección al BB. Caso en que la Potencia generada es igual a la potencia demandada.
- Si $I_{Cb} < I_{DInv}$, entonces I_{CBmP} es negativa, sale del BB, es decir, hay extracción de corriente o descarga del BB, corriente que va hacia el inversor. Caso en que la potencia generada es menor que la potencia demandada. El evento anterior determina el Ciclo de Descarga (CD_{BB}).

Si se desea medir y cuantificar el comportamiento de Carga y Descarga del BB, es necesario colocar dos sensores de corriente en serie, uno en el en el circuito BmP-BB, Punto PC; y el otro en el circuito BmP-Inv, Punto PD.

El sensor de corriente colocado en el Punto PD que está en serie en el circuito BmP-Inv, censará y medirá la corriente que entra al Inversor cuando éste tenga una demanda de Potencia (P_L) requerida por las cargas eléctricas (L: Load) en operación.

Llamemos I_L a la corriente demandada. Si se considera que la eficiencia del inversor es 1, la máxima corriente demandada I_{LM} , está dada por:

$$I_{LM} = \frac{P_N}{V_{NBB}}, \quad \text{Ec.(4)}$$

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

donde P_N es la potencia nominal del Inversor y V_{NBB} es la tensión nominal del BB.

Por lo tanto, para conocer y determinar el comportamiento de descarga del BB a través de la corriente de descarga, la cual está asociada a la corriente demandada, es necesario colocar un sensor de corriente en el punto PD.

Punto de Medición PE:-Es importante el conocimiento del consumo de energía de un sistema eléctrico, por esta razón, es necesario medir la corriente, tensión, y potencia consumida (P_{CL}) en su caso, que consumen las cargas eléctricas (L: Loads) conectadas en la Red Eléctrica Local (REL).

Ya que se tiene un inversor, el sistema eléctrico local consume potencia eléctrica en corriente alterna, entonces la potencia nominal estará dada por

$$P_N = C V_{Im} \cos\phi \quad \text{Ec.(5)}$$

Siendo

P_N : La potencia nominal del Inversor; 127 VCA una fase; 220 VCA dos fases; 220 VCA tres fases;

$\cos\phi$: El factor de potencia en sistemas trifásicos; tiene valor de la unidad ($\cos\phi=1$) para sistemas eléctricos monofásicos y bifásicos

I_m : Es la corriente máxima que proporcionará el inversor a su tensión nominal de diseño

C: una constante cuyo valor está dado por las siguientes condiciones:

C=1 en sistemas monofásicos con $V_N=127$ VCA fase a neutro.

C=2 en sistemas bifásicos con $V_N =127$ VCA fase a neutro.

$C=\sqrt{3}$ en sistemas trifásicos con $V_N=220$ entre fases

Dadas estas alternativas, se tiene que colocar un sensor de corriente en una de las fases, la que podrá transportar una corriente máxima con un valor de:

$$I_m = \frac{P_N}{C V_N \cos\phi} \quad \text{Ec.(6)}$$

En un sistema trifásico, es necesario medir la corriente y la tensión eléctrica entre fases para determinar el balance eléctrico de la REL, requiriéndose 3 sensores de corriente

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

y 3 de tensión; sin embargo, se podría suponer un sistema balanceado y basta con un sensor de corriente y uno de tensión para determinar con su producto, la potencia consumida

El rango de medición de los sensores debe ser tal que no sea inferior a aquellos que determinan los máximos valores de tensión y corriente en los puntos de medición; por ejemplo, en el punto PA, la tensión a circuito abierto V_{OC} y corriente de corto circuito I_{SC} , valores que proporciona el fabricante del MFV obtenidos bajo condiciones de medición estándares de prueba (condiciones STC por sus siglas en inglés).

Sistemas Fotovoltaicos Interconectados SFV-I

Para el caso de un SFV-I que está en paralelo tanto con la REL del usuario como con la red eléctrica convencional, los inversores se diseñan para sincronizarse con la red a su tensión nominal e inyectar corriente cuando el GFV esté generando electricidad. La **Figura 4** muestra un diagrama esquemático típico de un SFV-I en donde se indican los puntos sugeridos para la medición de los parámetros eléctricos.



Figura 4: Diagrama esquemático de la arquitectura típica de un sistema FV-I. Se indican los puntos de medición en el diagrama en donde se recomienda colocar los sensores para el monitoreo energético.

Punto de Medición PA: Es el mismo caso que para un SFV-A; solo que el acondicionador es un Inversor diseñado para su interconexión con la Red General de Distribución de CFE (RGD) que se extiende hacia la Red Eléctrica Local del consumidor, el cual, ya tiene el servicio eléctrico.

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

La P_M está definida por el producto de la corriente I_M y la tensión V_{mp} que maximizan dicha operación ($P_M = I_M \times V_{mp}$). Dado que los Inversores se fabrican con la versatilidad de tener, en su circuito de alimentación o entrada, un seguidor de la máxima potencia que produce el AFV (MPPT por sus siglas en inglés), el cual es dinámico, sensores colocados (para corriente y tensión) en dicho circuito, siempre medirán los valores para la potencia máxima I_M, V_{mp} del Arreglo FV. Esta es la razón de medir ahí la corriente y la tensión fotogenerada.

Se requiere de un sensor para medir la corriente y otro para medir la tensión; el sensor de corriente se instala en SERIE con el conductor positivo, mientras que el sensor de tensión eléctrica se instala en paralelo entre el conductor positivo y negativo.

Punto de Medición PB: -En los SFV-I se cuenta con una REL que tiene servicio eléctrico en corriente alterna contratado con cierta tensión nominal, pudiendo ser monofásico a 127 V; bifásico a 220 V y trifásico a 220 V. Dependiendo de dicha tensión, se elige al inversor que formará parte integral del SFV-I. El circuito de salida del Inversor (CS-Inv) se conecta en paralelo en un punto de la REL del usuario, usualmente en el Tablero de Distribución al que se le llama Punto de Acoplamiento en Común (**PAC**).

Es pertinente decir aquí que en el caso de los sensores de corriente, aunque se ha especificado que deben estar conectados en SERIE en el conductor que transporta la corriente, lo que realmente se usa es un transductor tipo Efecto Hall como los mostrados en la **Figura 2**.

Punto de Medición PC: -Medir la potencia P_{LC} y consumo de energía eléctrica es importante para determinar y estimar demandas de energía a futuro. Para su respectiva medición y determinación es necesario colocar los sensores de corriente en cada fase y un sensor de tensión. El mejor sitio es en el Tablero de Distribución, y su rango de medición, depende de la potencia total de las cargas eléctricas colocadas en cada fase.

Punto de Medición PD: -En este punto puede haber flujo de corriente hacia la RGD o bien de la RGD hacia las Cargas (L: Loads). Medir la corriente que entra a la REL desde la RGD (inyección) o la que sale de la REL hacia la RGD (extracción) permite conocer el balance de consumo día tras día, la potencia y energía. Así que en ese punto se deben colocar sensores de corriente tantos como fases activas se tengan.

Los puntos de medición PB, PC y PD están conectados en paralelo por lo que únicamente se requiere de un medidor de tensión entre fases.

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Parámetros Ambientales que afectan el desempeño eléctrico

Cuando los MFV se exponen al Sol para que generen electricidad, se calientan por estar absorbiendo la luz solar, este calentamiento hace que la potencia máxima P_M y la tensión generada (V_{OC} , V_{mp}) disminuyan linealmente conforme se incrementa la temperatura de operación de la celda T_c (módulo o placa), respecto de sus valores medidos bajo condiciones estándares de prueba (STC: Irradiancia de $1,000 \text{ W/m}^2$ y $T_c=25^\circ\text{C}$). Al factor de disminución lineal se le llama Coeficiente de Pérdida y los fabricantes de los MFV proporcionan como dato los valores correspondientes para estimar las pérdidas en la potencia máxima P_M , en la tensión a circuito abierto V_{OC} y la ligera ganancia en la corriente de corto circuito I_{SC} . Por otra parte, tanto la potencia como la corriente generada I_{SC} , disminuyen proporcionalmente con la magnitud de la Irradiancia (G), que es un hecho físico que presentan todas las TFV.

Dado que es conocido que la temperatura de la placa o celda o módulo (T_c) depende de las magnitudes de la temperatura ambiente (T_{amb}), Irradiancia global incidente (G) y la velocidad del viento (v), es imperativo medir dichos parámetros para estar en posición de correlacionarlos con aquellos medidos asociados a la generación eléctrica.

Por lo anterior, se deben usar los sensores adecuados para medir temperatura ambiente T_{amb} , temperatura de placa o celda T_c , la irradiancia global en el plano del AFV, la irradiancia global en el plano horizontal, y la velocidad de viento.

Se deben seleccionar aquellos sensores con base en la precisión que se busque tener de los datos medidos. Especial cuidado se debe tener al seleccionar dichos sensores ya que hay una gama amplia de ellos.

Para tener una idea clara de los sensores que suelen recomendarse para fines de investigación, en el Anexo a éste documento se integran la relación de los dispositivos para la adquisición de datos que se usan en la Parcela Agrovoltaica Sostenible y Educativa.

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

INDICADORES ASOCIADOS AL CRECIMIENTO DE LOS CULTIVOS

Cultivos

En el cultivo de las especies vegetales, el estudio del desarrollo de éstas desde su siembra hasta la cosecha, llamado fenología de los vegetales, es de vital importancia para conocer sus fases de crecimiento; comprenderlas, permite al agricultor optimizar actividades relacionadas con el proceso de siembra, requerimiento de agua, periodicidad de riego, fertilización y control de plagas y enfermedades, con la meta de incrementar el rendimiento del cultivo y su calidad.

La fenología de un vegetal establece las diferentes etapas de crecimiento; por ejemplo¹, para las coles, se tienen las siguientes etapas:

- a) Semilla en almácigo (hasta llegar a convertirse en una plántula, 2 a 3 hojas): 25 a 30 días.
- b) Trasplante y prendimiento: 15 días
- c) Desarrollo vegetativo: 100 días, que genera el follaje
- d) Maduración y cosecha: 120-150 días, que genera el producto

Follaje

¿Qué debemos medir del follaje?

La **Figura 5** presenta, en la parte inferior, un diagrama de bosquejos de la fenología de la col verde crecida a cielo abierto de acuerdo a lo reportado en la Revista InfoAgro 2021; mientras que en la parte superior, fotografías del crecimiento de los cultivos de Col verde que fueron sembrados el 14 de septiembre 2023, debajo de la cubierta fotovoltaica del Proyecto PASE, durante el ciclo otoño-invierno en la localidad de Topilejo², Tlalpan, CDMX. Ambas son representativas del concepto de follaje.

Considerando que la información proporcionada en InfoAGro es confiable y que representa con cierto grado de exactitud los días de crecimiento a cielo abierto de dicha especie, entonces por simple comparación de periodos, se observa claramente la correlación de crecimiento hasta el día 63, posterior a eso, y con base en las fotografías y morfología del follaje, hasta llegar al crecimiento de la cabeza, 120 días en el bosquejo

¹ Everardo Zamora: El cultivo del repollo Serie Guía-Producción de hortalizas DAG/HORT-011, febrero 20116 UNISON. <https://dagus.unison.mx/Zamora/COL%20O%20REPOLLO-DAG-HORT-011.pdf>

² Proyecto Parcela Agrovoltaica, Sostenible y Educativa, www.parcelaagrovoltica.com.mx

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

y 139 días en el producto real, la diferencia en el periodo de crecimiento es de 19 días más para el cultivo de Col verde debajo de una cubierta fotovoltaica.

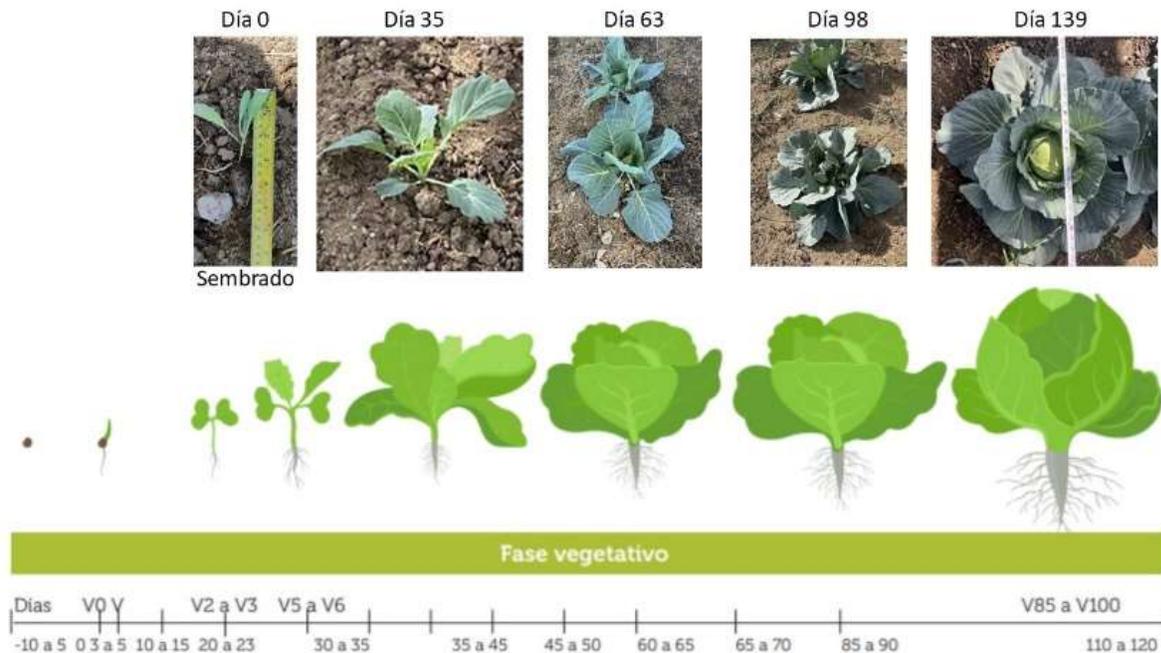


Figura 5: En la parte inferior, se muestra una representación en bosquejos de las etapas de crecimiento de la Col verde (Referencia InfoAgro2021; en la parte superior, fenología de la col verde cultivada en la parcela Agrovoltaica).

Sin embargo, ¿Que parámetro de crecimiento de ese vegetal se debe identificar y seguir durante su crecimiento que nos informe al respecto de su desarrollo?, ¿El tamaño de la cabeza? ¿Se puede identificar el concepto de tallo?, y en su caso ¿Se puede medir el tallo?, ¿Número de hojas?, ¿Altura del follaje?, ¿Superficie que cubre el follaje?

Altura

En el caso de la cebolla, no se puede medir cómo evoluciona el tamaño del producto con respecto al tiempo ya que es un bulbo que crece debajo del suelo; en el aire, solo se ven hojas “afiladas”, entonces ¿Cuáles parámetros se pueden medir para seguir su desarrollo y que nos sirvan de indicadores de crecimiento? Algo equivalente sucede con el puerro.

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Las preguntas se pueden contestar con base en información pública disponible en la red con respecto de la fenología de la cebolla. La **Figura 6** muestra las diferentes etapas del crecimiento de ella³.

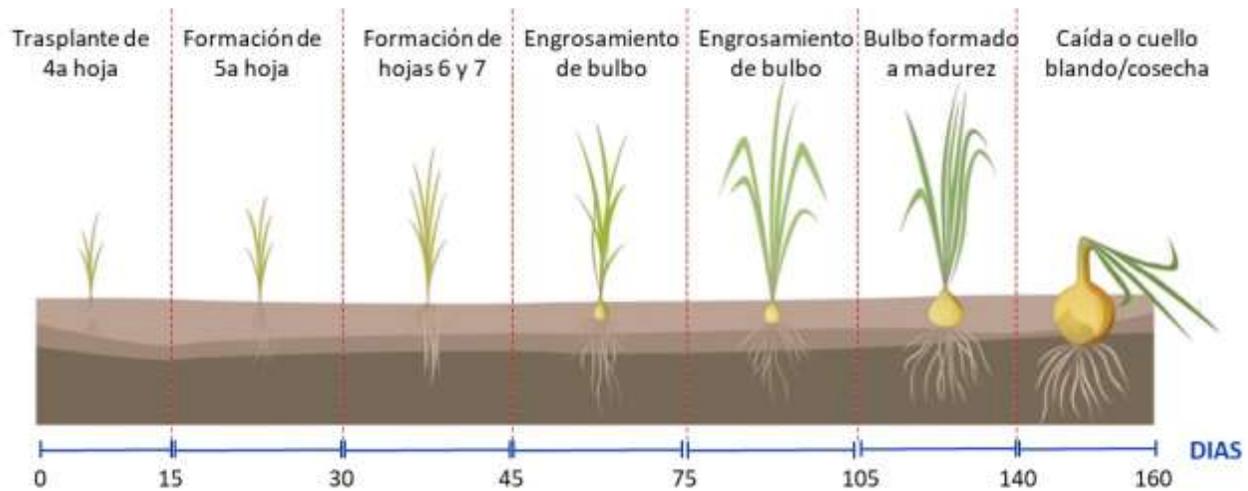


Figura 6: Etapas de crecimiento de la cebolla.

En este caso, con base en dicha ilustración y en información de documentos electrónicos⁴, la cantidad del número de hojas y su tamaño están relacionados con el crecimiento del bulbo; así que el indicador será una contabilización del número de hojas, y la medición del tamaño de las hojas (altura). Así que los indicadores de crecimiento serán:

- Número de hojas en la etapa correspondiente
- Dimensiones geométricas de las hojas: longitud y anchura.
- Altura como el largo de las hojas estiradas

La **Figura 7** muestra fotografías del marco de referencia para cuantificar el concepto de follaje. En nuestro caso, lo definimos como el área que cubren las hojas proyectadas sobre la superficie horizontal. Se define un Largo L y un ancho A como las dimensiones que limitan tal superficie.

³ Esquema tomado de: <https://sqmnutrition.com/downloadpdf/38191>

⁴ <https://blogagricultura.com/etapas-fenologicas-cebolla/>

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

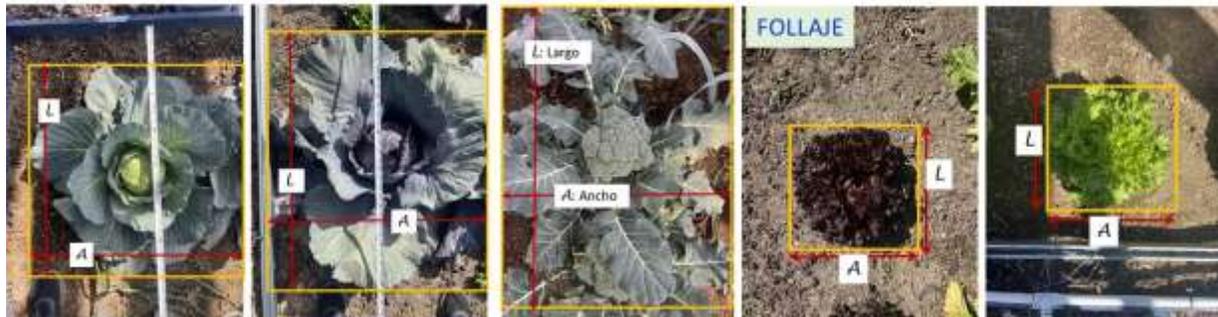


Figura 7: Se muestra con fotografías de las especies col verde, col morada, brócoli, y lechgas sangría e italiana el follaje y la manera de cuantificarlo mediante dos mediciones de longitud: el largo y el ancho.

La **Figura 8** muestra la medición del concepto de altura. En (a), (b), y (c), la altura de la especie se mide a la posición más alta que alcanza el producto en la planta sobre la superficie. En (d), es la parte más alta de las hojas de la especie (caso de la coliflor, col verde, col morada, brócoli, aunque la determinación de ese punto dependerá de cómo se ve el follaje con una vista vertical al crecimiento). En (e) y (f) que son hojas de cebolla o puerro u otra especie similar, la altura del follaje se define como la longitud más grande que alcanzan las hojas (quizá la hoja más grande) cuando se toma todo el conjunto y se levanta.

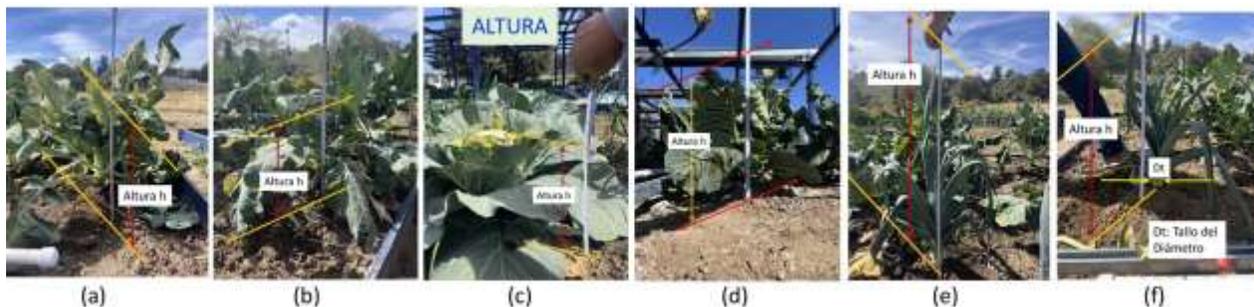


Figura 8: Fotografías que ilustran el concepto de altura de algunas especies que es un indicador del crecimiento de los cultivos.

Para productos que tengan forma “esférica” o que se pueda definir una circunferencia imaginaria superpuesta sobre el producto, el diámetro de dicha figura geométrica será un parámetro adecuado que sirva como indicador del crecimiento. La **Figura 9** muestra tres fotografías para las especies Brócoli, Coliflor y Col verde

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS



Figura 9: Se muestran fotografías del concepto de diámetro de la cabeza del producto como un indicador de crecimiento.

Como conclusión se tiene que hay varias etapas de crecimiento de las especies vegetales, por lo que, para realizar un estudio detallado del desarrollo de un vegetal, es de vital importancia establecer cuáles son las características físicas del vegetal en cuestión, identificar los parámetros que se puedan cuantificar y determinar quiénes de esos serán los indicadores a seguir en la etapa de crecimiento.

INDICADORES ASOCIADOS AL CLIMA DEL MEDIO AMBIENTE

Las condiciones climatológicas juegan un rol muy importante en el crecimiento de los cultivos; parámetros físicos como la temperatura ambiente, la humedad relativa del aire y la velocidad de viento; aunado con la radiación solar y parámetros geográficos tales como latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar, son las componentes que caracterizan el clima de una localidad. Todos ellos están interrelacionados y algunos pueden impactar más que otros sobre la climatología de los lugares; por ejemplo, localidades vecinas con diferente altura sobre el nivel del mar suelen tener climas diferentes (CDMX y Topilejo).

Entre los mencionados, la disponibilidad de luz solar en cualquier sitio es de vital importancia para el desarrollo de los vegetales. Es el factor ambiental más importante para ellos ya que influye directamente en los procesos fotosintéticos, los balances de agua y energía, y en su desarrollo y crecimiento.

En consecuencia, se debe cuantificar aquellos parámetros climatológicos que afectan el crecimiento de los vegetales para establecer una correlación entre los cambios climáticos y el crecimiento de los cultivos.

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Los parámetros ambientales relevantes al crecimiento de los cultivos y que se deben medir son:

- a) Temperatura ambiente T_{amb} ,
- b) Presión atmosférica p_{atm} ,
- c) Velocidad v y dirección de viento v_d ,
- d) Humedad relativa RH,
- e) Precipitación pluvial W_p ; y
- f) Radiación solar global de la localidad G_G (irradiancia global).

Todos esos parámetros se pueden medir con instrumentos manuales como termómetros, barómetros, anemómetros, piranómetros, etc, que implica tener un operario capacitado para realizar la medición y la correspondiente captura del dato del parámetro medido. Eso es un arduo trabajo si se desea conocer el comportamiento diario del clima del sitio en el día de medición; y se vuelve más laborioso si es que se desea tener datos semanales, mensuales y anuales. Los riesgos de una mala técnica para la captura, resguardo y almacenamiento (archivo) de los datos es muy alto; y en ocasiones, los archivos no son confiables. Una medición en campo de forma puntual para corroborar una tendencia es de mucho valor, pero si se desea todo un análisis completo, resulta ser muy laborioso. Por lo cual, no es buena idea realizar medidas puntuales de los parámetros climáticos de forma manual para pronosticar futuros comportamientos.

Por otra parte, se pueden considerar otros parámetros ambientales que estén asociados al crecimiento de los vegetales. Es de noción común que los cultivos se siembran en sustratos de tierra preparada (arada y fertilizada) y que para su desarrollo, requieren de nutrientes y agua que las plantas los absorben a través de sus raíces. En consecuencia, se puede preguntar lo siguiente: ¿Cuáles son los requerimientos de agua de la planta (volumen por planta, litros; volumen por unidad de superficie m^2)? ¿Con qué periodicidad hay que regar (día, semana); ¿Cuál es la concentración de nutrientes con los que hay que abonar a las plantas?

Dichas preguntas ya han sido contestadas para la mayoría de las especies comestibles a lo largo del tiempo, teniéndose recetas que pueden ser resultados de estudios minuciosos o totalmente empíricos en donde la información se pasas de una generación a otra. Lo que no se debe perder de vista es que dichas recetas no se pueden generalizar para todos los climas; por lo que para el estudio de crecimiento de vegetales bajo

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

condiciones especiales, es necesario definir los parámetros adecuados para los requerimientos de agua y fertilización.

Se conoce que el agua vertida sobre la tierra es absorbida, se difunde hacia su interior hasta la saturación y después escurre. El agua absorbida por la tierra proporciona el concepto de humedad. Un terreno húmedo es indicativo de la disponibilidad de agua para el crecimiento de las plantas, las cuales a través de sus raíces, absorben los nutrientes disueltos en ella. Si hay humedad, la planta “bebe” y crece; si no la hay, no se da el crecimiento; entonces una medida de la cantidad de humedad del terreno puede asociarse a la disponibilidad de éste elemento para los vegetales. Además, un suelo húmedo puede tener diferente temperatura que un suelo seco, por lo cual, la temperatura de suelo también es un parámetro que puede dar información del desempeño de crecimiento de las raíces de los vegetales, y en algunos casos, es necesario conocerla.

Por lo anterior se pueden identificar los parámetros siguientes como indicadores del crecimiento de los cultivos:

- Humedad relativa del terreno: RHt.
- Temperatura del sustrato, suelo o terreno: Ts.

Por otra parte, dependiendo de la geometría de la cubierta Fotovoltaica y de su factor geométrico (altura, ancho y largo) los cultivos debajo de una cubierta FV dejan de recibir los rayos de la luz solar; sin embargo, los procesos fotosintéticos que se llevan al cabo en los vegetales, son inducidos por la radiación solar difusa que hay en el entorno, la cual, proporciona el monto de radiación fotosintéticamente activa (**PAR** por sus siglas en inglés: Photosintetic Active Radiation) para tal proceso.

Las longitudes de onda del espectro de la radiación solar que son capaces de producir el fenómeno **PAR** están comprendidos entre las longitudes de onda desde 400 a 700 nm. La intensidad del rango de radiación solar PAR se puede medir directamente con sensores cuánticos que usan un fotodiodo de silicio con respuesta espectral modificada que incluye un filtro que solo deja pasar el rango de longitudes de onda **PAR**. En consecuencia, otro parámetro adicional a los anteriores es la cantidad lumínica en el rango **PAR** definida como la intensidad de la radiación solar difusa debajo de la cubierta fotovoltaica.

- Intensidad lumínica PAR: I_{PAR}

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Afortunadamente todos los parámetros climáticos se pueden cuantificar, de manera automática, con sensores e instrumentos disponibles comercialmente y sistemas de adquisición de datos. Estaciones meteorológicas compactas en un solo instrumento pueden tener la capacidad de medir, capturar, almacenar y transmitir los datos de todos los parámetros antes mencionados para su futuro uso. La precisión de los datos y sus incertidumbres dependen de aquellos asociados a los instrumentos de medida. Se recomienda siempre tener presente, como la mejor alternativa, un sistema de adquisición de datos automatizado.

CASO DE ESTUDIO: IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE INDICADORES DE IMPACTO PARA EL PROYECTO PASE

En el cultivo de las especies, desde su siembra hasta su cosecha, llevando al cabo el proceso bajo las mismas condiciones de cultivo tanto a cielo abierto como bajo la **Cub-FV**, los indicadores identificados asociados a las necesidades y actividades en la operación y producción de la Parcela Agrovoltáica son los siguientes:

Tierra de cultivo

La tierra de cultivo que juega un rol muy importante en el crecimiento de las especies, ya que, proporciona los nutrientes requeridos para su desarrollo, debe ser preparada con base en información existente sobre los requerimientos de minerales que necesitan los cultivos, así que generalmente es una mezcla de tierra nativa con minerales agregados en la proporción requerida; o bien, una mezcla con composta y estiércol; para el caso de las micro-parcelas, además, se debe garantizar que cada cajón tenga la misma mezcla y que ésta sea homogénea en todo el volumen. Por lo cual, se tiene el siguiente requerimiento para la tierra de cultivo:

- a) **Parámetro:** Composición y contenido para la integración de la tierra de cultivo.-
Valor: Constante para todos los cultivos (proyecto PASE)
Característica del Indicador: Cuantificable
Unidad: % de concentración de componentes en la unidad de volumen (litro); %/l
Indicador adicional: Composición excelente, buena, adecuada, mala
- b) **Variable:** Humedad relativa del terreno derivada del riego y su dependencia con la temperatura ambiente, requerimiento de la planta y el periodo de tiempo entre un riego y su subsecuente.

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Variable ambiental a medir: Humedad relativa del terreno; humedad relativa del ambiente debajo de la **Cub-FV**;

Característica del Indicador: Cuantificable

Unidad: % en una masa dada

- c) **Parámetro:** Temperatura de la tierra de cultivo; temperatura del ambiente a la altura de los cajones

Característica del Indicador: Cuantificable

Unidad: Grados centígrados

Riego (Técnica, volumen)

El tipo de riego debe ser tecnificado ya que se pretende ahorrar y optimizar el agua, por lo cual, se tienen los siguientes indicadores

Técnica: Tipo de riego tecnificado (goteo, cinta, aspersión)

Característica del Indicador: Por elección, fijo (sin cambiar). En nuestro caso, riego por goteo.

- a) **Indicador:** Volumen de agua requerido para cada cultivo.

Unidad: litros (*l*) o m³

Indicador: Tasa de riego

- b) **Unidad:** Litros en la unidad de tiempo o múltiplos de la unidad de tiempo; *l/s*; *l/min*; *l/h*

Parámetro a determinar: Volumen óptimo y periodicidad de riego;

Característica del Indicador: Cuantificable

Fertilización

Considerando la información pública y las experiencias de los agricultores se deben tener presente la posibilidad de suministrar fertilizantes durante el desarrollo y crecimiento de las plantas.

Indicador: Tipo de fertilizante, su presentación (sólida o líquida),

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Indicador: Dosis

Unidad: Unidad de masa en la unidad de volumen; g/l

Periodicidad: Se suministra de forma constante con base en información pública o recomendaciones.

Característica del Indicador: Por elección, fijo.

Densidad de Sembrado

Es importante conocer, a partir de la información pública, cual es el tamaño del follaje de la especie para determinar la densidad de sembrado y evitar el sombreado de plantas vecinas.

Indicador: Número de plantas por m².

Parámetro a determinar: Producción por m² (piezas o peso dependiendo de la especie)

Característica del Indicador: Cuantificable

Tiempo de desarrollo

Se debe definir, con base en el desarrollo de la especie, experiencias orales o información pública sobre su madurez, cuando debe realizarse la cosecha.

Indicador: Número de días de desarrollo desde el día de siembra hasta el día de la cosecha

Parámetro a determinar: Número de días de desarrollo

Unidad: día

Característica del Indicador: Cuantificable

Características físicas

Las características físicas de los productos cosechados que representan un impacto para su comercialización tales como tamaño, peso, apariencia deben ser medidas y determinadas.

a) Indicador: Tamaño del producto

Parámetro a determinar: Medidas de la Altura, follaje, tallo, peso, volumen, etc.

Unidad: Unidad de longitud, metro (m)

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Característica del Indicador: Cuantificable

b) Indicador: Apariencia visual al identificar defectos (hojas marchitas, productos manchados, productos descolorados, productos deformes, evidencias del efecto de plagas)

Parámetro a determinar: Defectos

Característica del Indicador: Cualitativo

Características ambientales

Es necesario tener la línea de base de la climatología del sitio, para determinar los efectos posibles sobre los cultivos; por lo cual es necesario medir los parámetros ambientales tales como temperatura ambiente, humedad relativa del aire, radiación solar

Indicador: A cielo abierto se deben medir: La temperatura ambiente, humedad relativa del aire, velocidad y dirección del viento, radiación solar global.

Debajo de la Cub-FV, temperatura ambiente, humedad relativa del aire, humedad del suelo, temperatura del suelo, iluminancia

a) Parámetros a medir: Temperatura ambiente

Unidad: Grados centígrados

b) Parámetros a medir: Humedad relativa del aire

Unidad: Porcentaje (%)

c) Parámetros a medir: Velocidad del viento, V

Unidad: m/s

d) Parámetros a medir: Radiación solar o Irradiancia G (Densidad de potencia de la radiación solar)

Unidad: W/m^2

e) Parámetros a medir: PAR: Radiación Fotosintética Activa: Densidad del flujo de fotones fotosintéticos

Unidad: Densidad de flujo de fotones fotosintético: $\mu mol/m^2s$

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

- f) **Parámetro a determinar.**- Variación de la climatología de lugar con respecto al tiempo

Característica del Indicador: Cualitativo

La Línea Base para comparación de los beneficios de la Parcela Agrovoltaica son aquellos valores que se tendrán para los cultivos a cielo abierto.

EQUIPOS NECESARIOS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE INDICADORES

- a) **Distancias.**- Longitudes tales como ancho, largo, altura, se pueden cuantificar con un flexómetro comercial graduado en mm, siempre garantizando con precisión el punto inicial y el punto final de la propiedad física a medir. Para medir contornos de productos se puede usar una cinta flexible de plástico o tela, no expandible; tomar la longitud y compararla con una cinta métrica graduada.
- b) **Temperatura.**- Es muy común que la temperatura de un cuarto se mida con un termómetro comercial de pared; sin embargo, son de baja precisión. Se recomienda usar un termómetro digital cuyo sensor sea un termopar calibrado tipo cobre-constantan (termopar tipo T), o cromel alumel (termopar tipo K) que tienen una incertidumbre de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Estos termopares deben estar contenidos en una carcasa que evite el enfriamiento por corrientes de aire y que los sombreen de la luz solar.
- c) **Irradiancia solar.**- Lo mejor es usar un piranómetro, pero como son extremadamente caros, se pueden sustituir por una celda solar de referencia, calibrada, y un display. Dichos dispositivos están disponibles comercialmente.
- d) **PAR (photosintetic Active Radiation).**- Sensor Cuántico espectral
- e) **Humedad relativa.**- Un sensor de humedad relativa para el ambiente y uno para la humedad de la tierra de cultivo. Estos dispositivos son muy conocidos para los sistemas de riego comerciales y están disponibles comercialmente.
- f) **Peso.**- Una báscula graduada en gramos es más que suficiente para cuantificar el peso de los productos cosechados.

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Premisas del estudio

- Todos los cajones tienen el mismo volumen de tierra de cultivo
- La mezcla de tierra nativa, composta y estiércol que se preparó en cada cajón es homogénea
- Todas las plantas en los cajones reciben el mismo volumen de agua
- El riego se hace con la periodicidad establecida, por el método de goteo seleccionado.

Procedimiento para recolección de datos

Con el objeto de tener un seguimiento sobre el comportamiento de crecimiento de las especies de vegetales sembradas se debe tener un protocolo de medición que incluya un procedimiento del “qué hacer”, “como hacer”, “para que hacer” y “con que hacer” y la bitácora correspondiente para realizar el proceso de documentación (documentar).

En nuestro caso, el objetivo es determinar la fenología del crecimiento de vegetales que crecen debajo de la Cub-FV, se diseñaron dos formatos de captura de datos físicos de los cultivos sembrados, a saber:

- 1) Uno para aplicarlo, con cierta periodicidad (por ejemplo: cada semana, etc), a la especie plantada (“in situ”) para cuantificar características de crecimiento visual que puedan medirse. Se puede incluir el diámetro del follaje-tallo, la altura de la planta o follaje, y la existencia del fruto producido en su caso, el cual se muestra en la **Figura 10**. El proceso de medición de parámetros para su posterior captura en el formato se realiza de manera convencional: se toma un flexómetro, se define el punto de referencia 0 o el inicio de medición y se extiende el instrumento hasta el punto de referencia que define el extremo del parámetro a medir. La **Figura 8** y **Figura 9** y **Figura 11** ilustra ese proceso.

Se puede usar un flexómetro para medir el parámetro requerido, sin embargo, generalmente el suelo no es plano, existiendo siempre la posibilidad de que el nivel de referencia 0 no sea el mismo de una planta a la otra; es más, no se puede garantizar reproducibilidad si el proceso de medición lo hacen varias personas.

Acciones a considerar.- Si se desea reproducibilidad en los valores del parámetro medido, se recomienda lo siguiente:

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

- Que la medición la realice siempre la misma persona;
- Que el flexómetro a usar sea pegado a una regla "T" que garantice la determinación del punto de referencia inicial; y
- Que el proceso sea repetido por lo menos 6 veces con el objeto de tener una estadística (promedio y desviación estándar) del proceso de medición para el parámetro elegido.

CRECIMIENTO					FECHA:				HORA:					
MICRO PARCELA			POSICIÓN		DIMENSIONES FÍSICAS (cm)					CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES		CONDICIONES AMBIENTALES		
No.	CAJON	PRODUCTO	LÍNEA	SITIO	FOLLAJE					RAD SOLAR (W/m ²)	TEMP AMB (°)	HUM RELAT SUELO	Apariencia del día: Soleado, medio nublado, nublado, lluvioso; Viento: fuerte, sin viento; Temperatura: fría, templada, tibio, caliente	
					ALTURA (cm)	ANCHO (cm)	LARGO (cm)	TALLO (cm)	NO. HOJAS					APARIENCIA DEL FOLLAJE (SALUDABLE, ENFERMO, PLAGAS)
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														

Figura 10: Formato para captura del crecimiento de la especie mediante la medición "in situ" de las características físicas visuales.



Figura 11: Proceso de medición "in situ" de los parámetros establecidos como indicadores

- El otro formato que se muestra en la **Figura 12**, se aplica para el producto cosechado. Se incluye las medidas de las dimensiones físicas (raíz, altura, follaje) y el peso (bruto, producto, raíz y follaje) del producto cosechado.

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Además se agrega el aspecto de apariencia que es la manera en que se ve el producto: saludable, enfermo, hojas machadas, amarillas y dañadas, evidencias de plagas; etc.

COSECHA								FECHA:				APARIENCIA DEL FOLLAJE (SALUDABLE, ENFERMO, PLAGAS)
MICRO PARCELA			POSICIÓN		DIMENSIONES FÍSICAS (cm)			PESO DEL PRODUCTO (kg)				
No.	CAJON	PRODUCTO	LÍNEA	SITIO	RAIZ	ALTURA	FOLLAJE	BRUTO	PRODUCTO	FOLLAJE	RAIZ	
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												

Figura 12: Formato para captura de datos sobre las características físicas del producto cosechado

En el formato se anota, la fecha en que es levantada la información, la especie-vegetal-producto; y para cada especie, el cajón de procedencia, la línea en la que está sembrada, su posición sobre la línea; posterior a eso, se realizan las mediciones pertinentes.

En la **Figura 13** se muestran fotografías de algunas especies cosechadas, en las cuales se trazaron líneas que determinan los extremos para la medición de los parámetros identificados y la manera en que fue realizado el proceso de medir y tomar los datos para los cultivos que se ilustran.

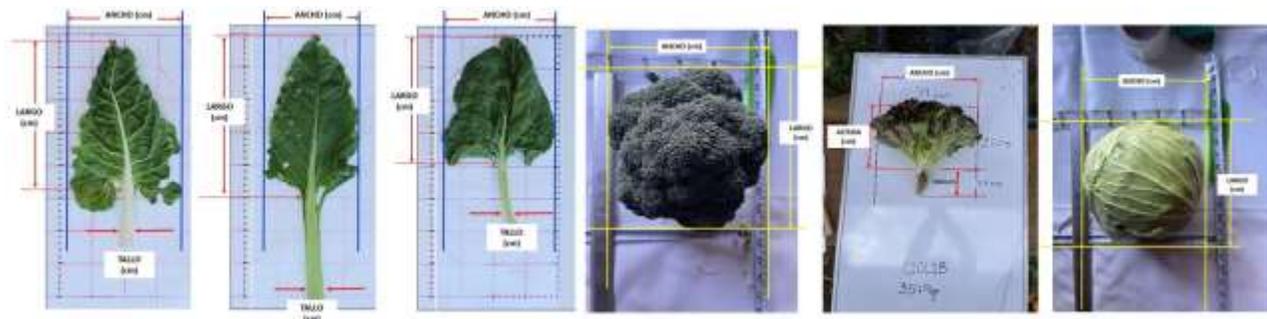


Figura 13: Definición de los parámetros a medir en las especies de vegetales cosechados

El peso de los productos se lleva al cabo de la manera tradicional: se limpia la base de pesado o la charola de la báscula, el producto se coloca encima de ésta, se realiza el

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

pesado y se anota el dato de peso proporcionado por la báscula. El tipo de báscula a usar es de tipo gramero; es decir, que cuantifique por lo menos décimas de gramo.

PROTOCOLO DE MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS FENOLÓGICOS

Para garantizar que los valores medidos sean reproducibles y confiables, se recomienda lo siguiente:

- a) La persona que medirá y capturará los datos debe haber recibido la capacitación correspondiente, saber y tener la habilidad de manejar los instrumentos de medida, comprender de que se trata la actividad, y entender que la no observancia del protocolo de medir y capturar los datos ocasiona malas interpretaciones de los resultados, pérdida de tiempo, pérdida de dinero e información que no sirve para los propósitos requeridos.
- b) El proceso de medición lo debe ser siempre la misma persona.
- c) La persona que medirá y capturará debe comprender y saber llenar el formato de datos correspondiente.
- d) La persona que medirá y capturará debe manejar muy bien el sistema métrico decimal.

Las actividades para el Proceso de medición es el siguiente:

Medidas “Insitu” Especies Sin Cosechar

1. Determinar que Planta de cada especie será sujeta a medición cronológica hasta su cosecha.
2. Definir la periodicidad del proceso de medición.
3. Definir los indicadores de crecimiento para determinar los parámetros físicos a medir.
4. Seleccionar la herramienta de medición adecuada al parámetro a medir.
 - Altura y Follaje.- Se recomienda que para medir tanto la altura de follaje como ancho/diámetro, se utilice un escantillón graduado cada 5.0 mm, de preferencia de madera. Dicha graduación nos da una incertidumbre de ± 2.5

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

mm. No se recomienda usar un flexómetro ya que, al ser flexible, no es fácil garantizar el inicio y fin de los extremos del parámetro a medir (ese es el caso mostrado en la **Figura 8**).

- Diámetro del Tallo.- Para medir el diámetro del tallo se debe usar un vernier.
 - Radiación solar.- Usar de preferencia una celda solar de referencia.
 - Temperatura ambiente.- Usar un termopar tipo “K” o “T” acoplado a un display de medición de temperatura en °C;
 - Humedad relativa del suelo.-Usar el medidor de puntas para humedad relativa.
 - PAR.-Usando un instrumento llamado Quantum Par, mida la iluminancia instantánea
5. Observe el ambiente de su entorno y determine por inspección visual y por sensación térmica la climatología en ese instante;
 6. Anote fecha, hora y documente la condición ambiental existente.
 7. Con los instrumentos de medida, y fuera de la **Cub-FV**, proceda a medir la irradiancia global; con el medidor de temperatura y su display, capture la temperatura ambiente; con el sensor de humedad y su display, capture a 10 cm de profundidad la humedad relativa del suelo. Capture documentando esos datos en el formato correspondiente.
 8. Dentro de la **Cub-FV** y a una altura de 60 cm, mida el PAR
 9. Realizar una inspección visual de la apariencia que presenta la especie a medir y determine, a partir de la manera en que observa el follaje si la planta está sana o presenta algún signo de estrés. Documente en la columna Apariencia de follaje su apreciación. .
 10. Identifique la planta que será sujeta a la medición y proceda a realizar tal acción:
 - i) Medición de altura: Coloque la regla “T” en el suelo de tal manera que la sección larga quede vertical, asentando bien sobre el suelo la sección corta de la regla “T”.

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Exceptuando por las cebollas y puerro, sin estirar las hojas, mueva el escantillón hasta la parte más alta de ellas y proceda a medir. Documente en el formato como medición 1.

- ii) Medición del ancho.- Viendo la planta desde arriba defina los dos extremos de medición, y usando la regla “T”, coloque su parte más corta en uno de los extremos del follaje y moviendo el escantillón hacia el otro extremo, capture la medida de ancho o largo.
 - iii) Tallo.- Usando el vernier, mida de manera convencional el diámetro del tallo.
11. Repita los pasos del numeral 10 y documente las mediciones. Lleve a cabo el proceso de medición 6 veces.
 12. Obtenga el valor promedio y desviación estándar de las 6 mediciones realizadas; y documente dichos valores.
 13. Para la misma especie crecida en otra posición en la parcela u otra especie diferente, realice los pasos del 1 al 12.
 14. Almacene los datos en el sitio asignado para esto, vacíelos a hojas de cálculo Excel u otro software y transfíeralos a un sitio de acceso “in situ” o remoto como puede ser un DRIVE en la “nube” para que se tenga acceso a ellos desde cualquier sitio.

NOTA: Con la tecnología actual de identificación usando código de barras o códigos QR o códigos 2D, a las especies bajo estudio se les puede asignar cualquiera de las etiquetas de identificación y a ellas asignarles las bases de datos que deben almacenarse en una computadora o en a “nube”.

Medidas de Especies Cosechadas

1. Con la asesoría del agricultor, se debe determinar aquellas plantas que han llegado a su madurez de una especie específica, ya no crecerá más y es candidata a que sea cosechada.
2. Documente cuantas plantas serán; para cada una de ellas, de que cajón, Línea y sitio procede el producto.

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

3. Elimine todo residuo de tierra que yace en la raíz del producto y que no debe ser tomada en cuenta para el proceso de pesado.
4. El protocolo de medición es exactamente el mismo que fue descrito para los cultivos; por lo que realice los pasos del 3 al 14 del procedimiento anterior.

Dado que un Procedimiento es una serie de acciones a seguir con un fin específico, los dos protocolos expuestos aquí se están aplicando también a los productos cultivados a cielo abierto, tanto en las micro-parcela como en los surcos tradicionales.

INDICADORES COMERCIALES

Se debe tener presente que el objetivo de un agricultor es la comercialización de sus productos, en consecuencia, los cosechados se deben identificar y clasificar con base en indicadores de venta. Dentro de los más importantes están:

Apariencia del producto.- Un producto que presente follaje maltratado, decoloración, manchas y evidencias de plagas, no se comercializará de la misma manera que aquel que carece de defectos, tendrán un precio más barato y probablemente no se venda.

Tamaño.- El consumidor siempre tiene la idea del tamaño de los productos vegetales que adquiere. Un producto de tamaño pequeño estará indicando que su desarrollo no fue sano, que padeció de estrés durante su crecimiento derivado de muchos factores y tendrá muy poco valor comercial, comparado con un producto del tamaño esperado.

Color.- El color del producto también es un indicador de venta. Por ejemplo, si el consumidor quiere comprar un jitomate, él ya tiene en su mente cual debe ser el color de éste para adquirirlo y etiquetarlo como producto de calidad.

Compacto.- Esta característica física se asocia por ejemplo a la col, coliflor, brócoli, e inclusive al jitomate, tomate, chiles, cebollas, rábanos, etc. Un producto que al apretarlo, los dedos se hunden en él, indica un crecimiento malo, y en consecuencia, tendrá un valor comercial bajo.

Todos estos indicadores son subjetivos, cualitativos en muchos casos, y depende de la persona que emita la opinión respecto de la apariencia del producto.

El proceso para esta selección es visual y en algunos casos, como el tamaño, se seleccionan de acuerdo a dicha característica física usando metodologías simples y baratas; por ejemplo, mallas para filtrar tamaños.. Generalmente, esto es sentido común y es una práctica ancestral que los agricultores realizan cotidianamente.

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

CONCLUSIONES

Se han proporcionado una serie de lineamientos a seguir, desde la identificación de indicadores relacionados a la climatología del sitio en donde está implementado el proyecto agrovoltaico hasta aquellos relacionados con los aspectos de siembra, cultivo y cosecha de las especies bajo estudio.

Se enfatizó sobre la relevancia de identificar a los indicadores en términos cuantitativos como cualitativos; sin embargo, los únicos que nos pueden permitir dar un seguimiento de crecimiento son los cuantitativos por lo que mucho cuidado debe tenerse cuando se está realizando el proceso de medición.

Dado que un Procedimiento o Protocolo proporciona una serie de acciones consecutivas que conllevan a obtener una cuantificación precisa, reproducible y confiable, se recomienda que las personas que realicen tal acción, sean capacitadas en todo el contexto de medición, captura y almacenamiento de datos con el objeto de que estos sean confiables y reproducibles.

Para una labor de investigación y estudio sistemático de un evento dado, no basta con una medida para especificar una fenología causa-efecto, se requiere de un conjunto de mediciones que permitan realizar una estadística descriptiva, corroborar la existencia de la reproducibilidad y con los resultados concluir la validez del comportamiento estudiado.

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

ANEXO

SISTEMA DE ADQUIICIÓN DE DATOS EN LA PARCELA AGROVOLTAICA, SOSTENIBLE EDUCACIONAL. SENSORES Y EQUIPOS DE MONITOREO

OBJETIVO

Diseñar e instalar un Sistema de Adquisición de Datos robusto, vía remota, que permita capturar datos de las variables y parámetros climatológicos del sitio en donde está ubicada la Parcela Agrovoltaica, Sostenible y Educacional y los parámetros energéticos asociados a la generación eléctrica de la Planta de Generación de Electricidad Solar Fotovoltaica que provee la Cubierta de sombreado.

ALCANCES

Contar con un sistema de monitoreo de acuerdo con las especificaciones de la norma internacional IEC 61724-1:2017, en donde se incluyan los parámetros eléctricos del Sistema Fotovoltaico en operación, las variables ambientales tales como temperatura ambiente, humedad relativa, presión barométrica, y las variables de interés para el estudio y crecimiento de productos vegetales bajo la cubierta fotovoltaica.

INTRODUCCIÓN

El Sistema Agrovoltaico diseñado para este proyecto, tiene un Arreglo fotovoltaico (AFV) que está instalado sobre una estructura metálica reticular elevada a 3 metros de altura sobre la superficie. El sembrado de los módulos fotovoltaicos (MFV) se eligió de tal manera que permite la máxima generación de energía anual del sistema fotovoltaico, al mismo tiempo que favorezca el correcto desarrollo de los cultivos sembrados debajo de él. Se cuenta con una superficie de 272.6 m² y se ha instalado una potencia pico total de 39.36 kW, de acuerdo con lo especificado en el proyecto ejecutivo del sistema.

El Sistema Fotovoltaico Interconectado a la Red (SFV-I) está integrado con diferentes tecnologías de MFV e Inversores. Son en total 72 MFV: 24 pzas de 555 W pico; 24 Pzas de 545 W pico cada uno, 12 Pzas de 550 W pico y 12 Pzas bifaciales de 530 W pico; cuyas marcas son Canadian Solar, JA Solar, Solareve y Trina Solar (bifaciales).

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Los MFV están divididos en ocho Sub-Sistemas Fotovoltaicos Interconectados a la Red de Distribución Local del sitio de ubicación (Sub-SFV-I): Los dos primeros Sub-SFV-I, conformados cada uno por 24 MFV, configurados como 12Sx2P, están conectados a un inversores Solis de 15.0 kW de potencia nominal: dos cadenas de 12 MFV en serie acopladas al inversor, una por cada seguidor de máxima potencia. Son dos sistemas FV-I que operan de forma independiente. El circuito de salida de cada inversor se conecta en paralelo en el Tablero de Distribución Fotovoltaica, sitio en el cual, llega el circuito trifásico de la Red Eléctrica Local del sitio de instalación. Los otros 24 MFVs, de los cuales 12 son bifaciales, se agrupan de 4 en 4; formando 6 conjuntos. Cada grupo de 4 MFV se conectan individualmente a un Micro Inversor de 2.0 kW que tiene 4 circuitos FV de entrada. Así, se tiene seis Sub-SFV-CR que están integrados por un inversor de 2.0 kW y cuatro MFV con una potencia FV de 2.16 kW. En la siguiente fotografía se muestra la instalación FV del proyecto PASE.



CONDICIONES NORMATIVAS

El sistema de monitoreo se implementó con el propósito de evaluar el desempeño del sistema fotovoltaico, identificar fallas presentes y potenciales en el sistema, y

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

específicamente en el caso de la Parcela Agrovoltaica Sostenible y Educativa (PASE), comparar el desempeño del sistema bajo la configuración Agrovoltaica, de manera que se analicen los efectos en el crecimiento de plantas y hortalizas, al mismo tiempo en que genera energía eléctrica para diferentes usos mediante la colocación de diferentes sensores y un sistema de adquisición de datos robusto que facilite el análisis de los datos.

La exactitud y complejidad del sistema de monitoreo depende del tamaño del sistema y del propósito que se tenga con él. Las especificaciones internacionales descritas en IEC TS 61724-1:2017 proponen 3 clasificaciones de sistemas de monitoreo, dependiendo del nivel de exactitud buscado: nivel A, B o C, para un sistema con alta exactitud, exactitud media y exactitud básica, respectivamente. Los niveles A y B son recomendables para sistemas fotovoltaicos de gran escala, mientras que el tipo C se recomienda para sistemas pequeños o domésticos, aunque la selección depende de la aplicación.

Dichas especificaciones definen también una muestra como un dato adquirido por un sensor y el intervalo de muestreo es el tiempo entre muestras. Un registro se define como dato capturado por un adquirente de datos, cuyo valor depende de las muestras y del intervalo de muestreo y dependiendo del adquirente de datos, los registros pueden incluir estadística adicional. La **Tabla 1** enlista los intervalos máximos de muestreo y de registro dependiendo la clasificación del sistema de monitoreo y de la variable medida por el sensor.

Tabla 1: Requerimientos de los intervalos de muestreo y de registro de datos

Intervalos máximo de muestreo	Clase A Exactitud Alta	Clase B Exactitud media	Clase C Exactitud básica
Para irradiancia, temperatura, velocidad de viento y variables eléctricas	3s	1 min	1 min
Para ensuciamiento, lluvia, nieve y humedad	1 min	1 min	1 min
Intervalo máximo de registro	1 min	15 min	60 min

Todos los datos medidos deben ser revisados y filtrados, ya sea de manera manual o automáticamente para detectar datos faltantes o inválidos.

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

PARÁMETROS POR MEDIR

Irradiancia

La irradiancia se medirá en el sitio de la instalación con dos variantes, en el plano del arreglo y la irradiancia global en horizontal. La irradiancia en el plano del arreglo se mide con un sensor orientado paralelamente al plano del arreglo con una apertura de al menos 160° que se encuentre instalado en la misma estructura del arreglo, o bien en una alineada paralelamente a la estructura del arreglo.

La irradiancia global se medirá con un sensor orientado horizontalmente y será utilizado como comparación con los datos meteorológicos históricos de alguna base de datos.

En caso de la necesidad de prescindir de alguno de los dos sensores, los datos en horizontal pueden ser estimados a partir de los datos medidos sobre el plano del arreglo usando modelos matemáticos conforme a normativas internacionales.

Los sensores adecuados para el proceso de medición pueden ser un piranómetro de termopila de primera clase, de acuerdo con las condiciones de este proyecto, cuya incertidumbre sea menor al 8%; una celda de referencia de silicio monocristalino con una incertidumbre del 8%, ambos con un rango de medición desde 0 W/m^2 hasta los 1500 W/m^2 y una resolución menor o igual a 1 W/m^2 . El uso de piranómetros de termopila se recomienda para el uso de mediciones en horizontal y para las mediciones en el plano del arreglo se prefiere la instalación de celdas de referencia. Las fotografías siguientes proporcionan imágenes de los diferentes instrumentos recomendados para medir la irradiancia global-



PIRANÓMETRO



FOTODIODO DE SILICIO



CELDA SOLAR DE SILICIO

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Temperatura del módulo

La temperatura del módulo fotovoltaico se tiene que medir con un sensor de temperatura pegado a la superficie trasera de uno o más módulos. La incertidumbre de los sensores deberá ser menor o igual a 2°C. Si se usa un adhesivo para fijar el sensor a la parte trasera del módulo, se deberá corroborar que sea resistente a la exposición al exterior y que sea de un material no corrosivo para el módulo, además debe ser buen conductor térmico.

Es importante contar con al menos un sensor de temperatura por cada unidad básica mecánica donde se encuentren montados los módulos fotovoltaicos, donde puede observarse diferente comportamiento térmico debido a la posición dentro del arreglo.

Si la finalidad es analizar el desempeño total del arreglo, los sensores deben ser colocados en una celda en la misma posición dentro del módulo, y en un módulo en la misma posición dentro de la estructura mecánica. Se podrán colocar sensores en diferentes posiciones si se desea analizar el comportamiento térmico de los módulos del arreglo, o bien para el análisis de diferentes Sub-Sistemas. Se prefiere colocar el sensor de temperatura en la celda más centrada al módulo y en un módulo centrado en la unidad mecánica, para mantener las mediciones lo más equilibradas posibles.

La siguiente fotografía muestra el sensor de temperatura que se instaló en los MFV de la PGESFV. Es un sensor tipo RTD, termómetro de resistencia de platino, de la marca Campbell, modelo CS241 Pt-1000 Clase A.



**Proven
Rugged Design**

Class A accuracy at any cable length

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Temperatura ambiente

La temperatura ambiente se tiene que medir desde una ubicación que sea representativa para el sistema, por medio de sensores colocados dentro de una carcasa para evitar la incidencia de radiación directa y permitir la ventilación. Los sensores deben tener una resolución menor o igual a 0.1°C y una incertidumbre de $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Los sensores deberán estar ubicados al menos a 1 metro alejado del módulo fotovoltaico más cercano o de algún otro equipo que altere la medición de temperatura como inversores o incluso algún cuerpo de concreto. El equipo elegido para el proyecto PASE fue un sensor de la marca Campbell modelo HMP60 que conjuga temperatura ambiente y humedad relativa. El sensor de temperatura es del tipo RTD de platino Pt-1000 y el de humedad relativa es un chip capacitivo ITRCAP.

Humedad relativa

Las mediciones de la humedad relativa son empleados para estimar los cambios en el espectro de la radiación que puede afectar tanto la generación de energía de los módulos fotovoltaicos, como las mediciones de los sensores de radiación. Los valores de humedad pueden ser requeridos, además, junto con la temperatura del módulo, para el análisis de posibles métodos de degradación que se presentan en la tecnología fotovoltaica.

La siguiente fotografía muestra el sensor de humedad relativa y temperatura ambiente seleccionado e instalado en una cubierta protectora de la radiación solar.



MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Precipitación Pluvial

La medición de la precipitación por lluvia puede ser usada como referencia para el diseño del programa de mantenimiento de los módulos fotovoltaicos. Sin embargo, este parámetro será de gran importancia para la evaluación del crecimiento de las plantas y hortalizas que se cultivarán en este proyecto; además, permitirá conocer el monto de agua que puede ser capturado por la cubierta fotovoltaica ya que el proyecto PASE integra un sistema de captación y almacenamiento de agua de lluvia. Se recomienda considerar un sensor bajo la cubierta fotovoltaica y uno fuera de ella para evaluar sus efectos.

El instrumento para cuantificar la precipitación pluvial viene integrado en una estación completa de medición del clima (Estación meteorológica). Se eligió una estación compacta de la marca Campbell modelo ClimaVUE50 que mide varios parámetros ambientales, a saber:

Radiación solar; velocidad y dirección de viento, temperatura ambiente, sensor de humedad relativa, contador de gotas de lluvia, presión barométrica, contador de descargas atmosféricas. La fotografía siguiente muestra dicha estación.



Dirección y velocidad de viento

La velocidad y dirección del viento pueden ser usados para el cálculo de la temperatura de los módulos o bien para efectos de analizar algún tipo de riesgo de

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

daño sobre los módulos fotovoltaicos. Se medirán a una altura que sea representativa para el arreglo. Si se requiere analizar algún comportamiento sobre el arreglo, los sensores deberán estar a la misma altura.

Se recomienda que las muestras sean medidas con intervalos menores a 3 segundos, y que los registros de los datos no sólo incluyan los valores promedio sino los valores máximos para tener un registro de las ráfagas de viento. El sensor para medir la velocidad de viento deberá tener una incertidumbre menor o igual a 0.5 m/s para velocidades de viento menores o iguales que 5 m/s e incertidumbres menores al 10% de la lectura para velocidades de viento mayores a 5 m/s. La dirección, se medirá con un sensor con exactitud menor a 5°.

El anemómetro para medir la velocidad y dirección de viento esta incluido en la estación meteorológica.

Humedad relativa del suelo

Las mediciones de la humedad relativa del suelo son requeridas para determinar la cantidad de agua contenida en la tierra de cultivo que es aprovechable por las plantas, y determinar la cantidad y los ciclos de riego.

Para fines de monitoreo mediante un sistema de adquisición de datos, se seleccionó un sensor de humedad relativa de la marca Campbell modelo CS655 que tiene dos barras de acero de 12 cm de largo. Mide el contenido de humedad mediante la resistividad del suelo.

Para medidas manuales y medición rápida se seleccionó al equipo fabricado por Campbell modelo HS” Hydro Sense II con un display manual. La siguiente fotografía muestra dichos instrumentos



MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Variables eléctricas

Todos los sensores de medición de variables eléctricas deben tener un rango de operación superior al 125% del valor esperado del arreglo fotovoltaico operando bajo condiciones estándares de prueba (STC), de manera que se cubran los efectos de una irradiancia superior a 1000 W/m^2 y una posible temperatura de operación del módulo por debajo de los 25°C .

Se requiere de la medición de variables eléctricas a nivel inversor, incluyendo las mediciones en CD del arreglo fotovoltaico y en CA a la salida del inversor. Opcionalmente, las mediciones en CD pueden ser llevadas a cabo para cada caja de combinación o bien, para cada cadena fotovoltaica. Los parámetros a medir deben ser: tensión de entrada (CD), corriente de entrada (CD) y potencia de entrada (CD), tensión de salida (CA), corriente de salida (CA) y potencia de salida (CA). Todos los sensores de medición de estas variables deben tener una incertidumbre de $\pm 3\%$. De manera adicional se debe contar con un sistema de medición de potencia y energía activa clase 0.5 S y uno de medición del factor de potencia de clase 1 para cada una de las fases del inversor.

A partir de los datos eléctricos medidos es necesario calcular algunos parámetros para contar reportes diarios, mensuales y anuales: irradiación en el plano del arreglo y horizontal, energía de salida del arreglo fotovoltaico (CD) y del sistema fotovoltaico (CA), rendimientos de generación (reference yield, array yield, final yield y performance ratio), cálculos de las pérdidas, etc.

El número de sensores para cada uno de los parámetros a medir dependerá de la potencia del sistema fotovoltaico en cuestión. Por tratarse de un sistema con una potencia de alrededor de 42.0 kW en AC, en la **Tabla 2** se enlistan los parámetros medidos y los requerimientos mínimos en cuanto al número de sensores seleccionados para cada uno. El sistema cae dentro de las características de una clase B, al tratarse de uno de pequeña escala, sin embargo, con los propósitos de un proyecto de investigación.

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Tabla 2: Parámetros medidos y requerimientos mínimos para un sistema de monitoreo clase B.

Parámetro	Unidades	Propósito de monitoreo	Número de sensores
Irradiancia en el plano del arreglo	W/m ²	Recurso solar	1
Irradiancia global horizontal	W/m ²	Recurso solar/ comparación con datos satelitales	1
Irradiancia directa normal	W/m ²	Recurso solar	1
Irradiancia difusa	W/m ²	Recurso solar	1
Temperatura del módulo	°C	Determinación de las pérdidas por temperatura	6
Temperatura ambiente	°C	Estimación de la temperatura del módulo	1
Velocidad del viento	m/s	Estimación de la temperatura del módulo	1
Dirección del viento	°	Estimación de la temperatura del módulo	1
Precipitaciones	mm	Diseño del programa de mantenimiento	1
Humedad relativa	%	Estimación de variaciones espectrales	1
Tensión del arreglo (DC)	V	Estimación energética/diagnóstico y localización de fallas	Uno por cada inversor/opcional a uno por caja de combinación o por cada cadena
Corriente del arreglo (DC)	A		
Potencia del arreglo (DC)	W		
Tensión de salida (AC)	V	Estimación energética	Uno por cada inversor y a nivel sistema
Corriente de salida (AC)	A		
Potencia de salida (AC)	W		
Energía de salida	kWh		
Factor de potencia de salida		Cumplimiento de los requisitos de la red	

Sensores y transductores para medir los parámetros eléctricos

Para los circuitos en corriente directa se usarán transductores de voltaje y de corriente de la marca CR Magnetics con la cual se medirán las variables eléctricas a la entrada de los inversores. A la salida de los inversores se medirán el voltaje de acoplamiento con la red, y la corriente en una configuración trifásica. La cantidad de sensores que se requiere es la considerada en la Tabla 3.

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Tabla 3: Sensores para la medición de variables eléctricas del arreglo fotovoltaico del proyecto PASE.

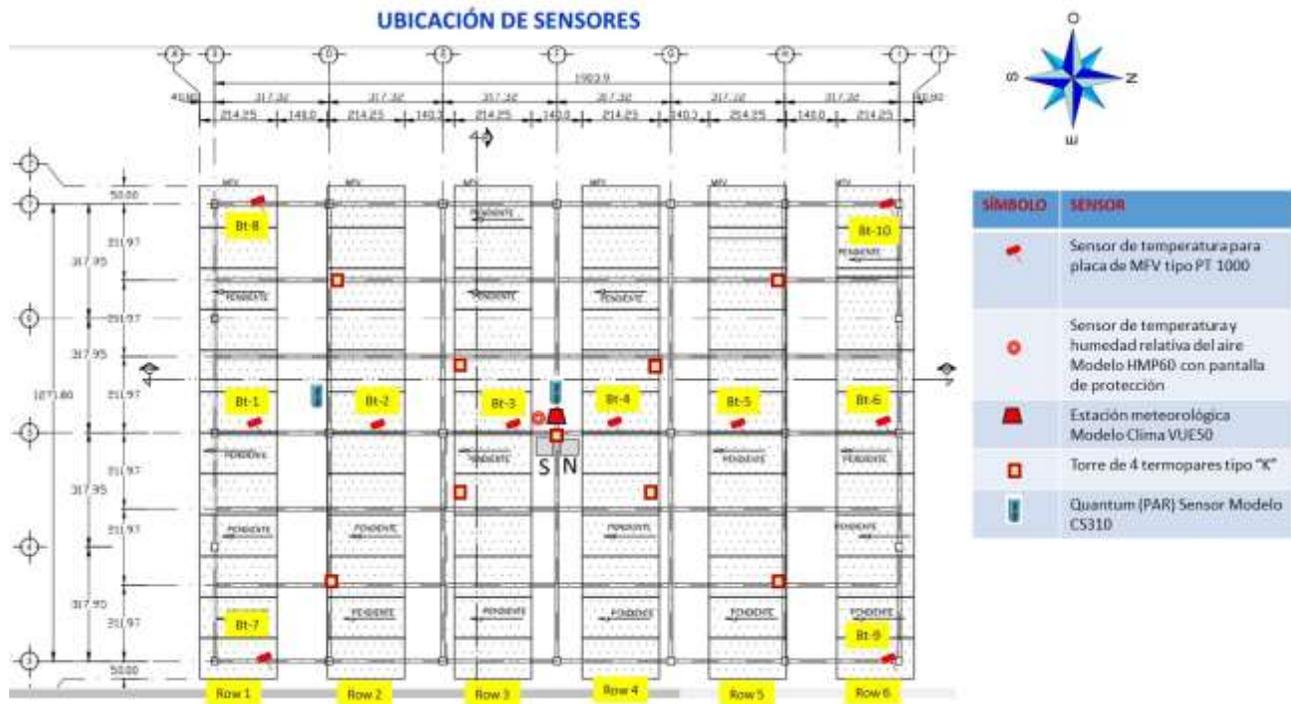
	Marca	Modelo	Pzas	Aplicación
	CR Magnetics	CR5220	4	Medición de corriente directa a la salida de cada cadena fotovoltaica en un rango de 0 a 20 Amperes, con alimentación a 24 VCD.
	CR Magnetics	R5320	4	Medición de la tensión eléctrica CD de cada cadena fotovoltaica con un rango de 0 a 800 V en corriente directa y una alimentación a 24 VCD.
	CR Magnetics	CR4220	6	Medición de la corriente alterna a la salida de cada fase del inversor trifásico, con un rango de 0 a 50 Amperes, con una alimentación a 24 VCD.
	CR Magnetics	CR4850	6	Medición de la tensión eléctrica CA a la salida del inversor con un rango de 0 a 250 VAC, con una alimentación a 24 VCD.

Ubicación de los sensores de energía y ambientales

En las siguientes figuras se muestra la ubicación de cada uno de los sensores descritos anteriormente. En la primera, se tiene la proyección horizontal del sembrado del arreglo fotovoltaico. Se identifica las 6 hileras de 12 módulos cada una. Los símbolos del sembrado de sensores se corresponden con la tabla adjunta. Los dos cuadros al centro

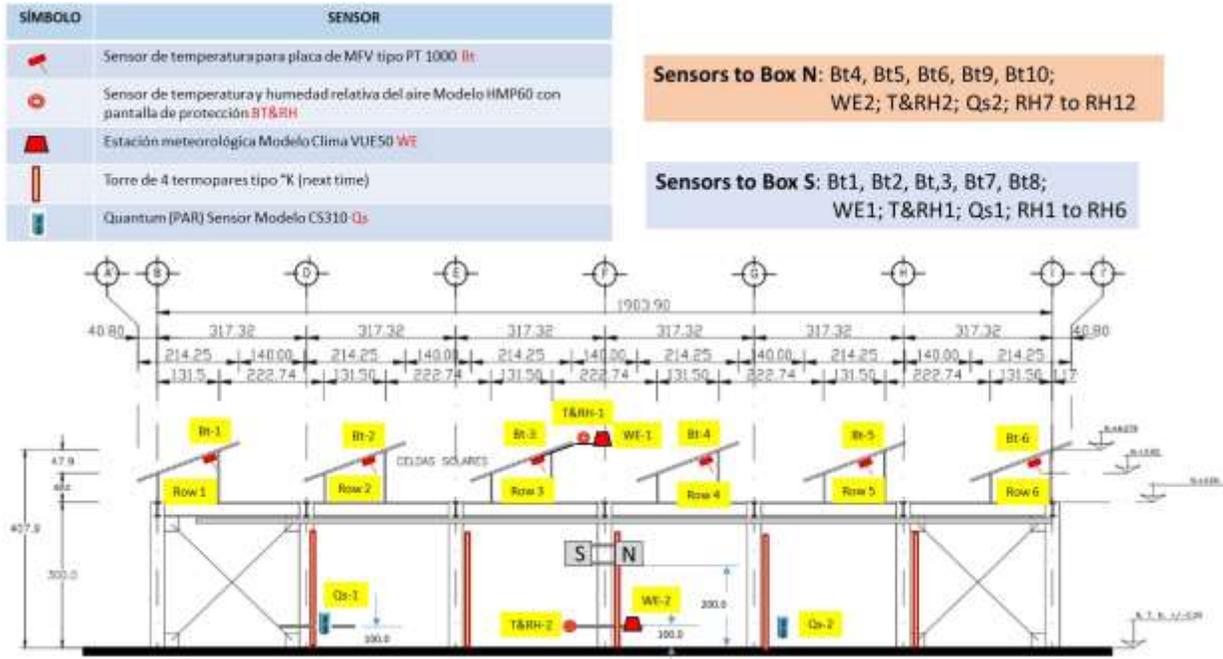
MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

simbolizados con S y N indican las Cajas de Concentración de cables que llegan a los Data Logger y multiplexores que están dentro de ellas. S es caja Sur, y N es Caja Norte.

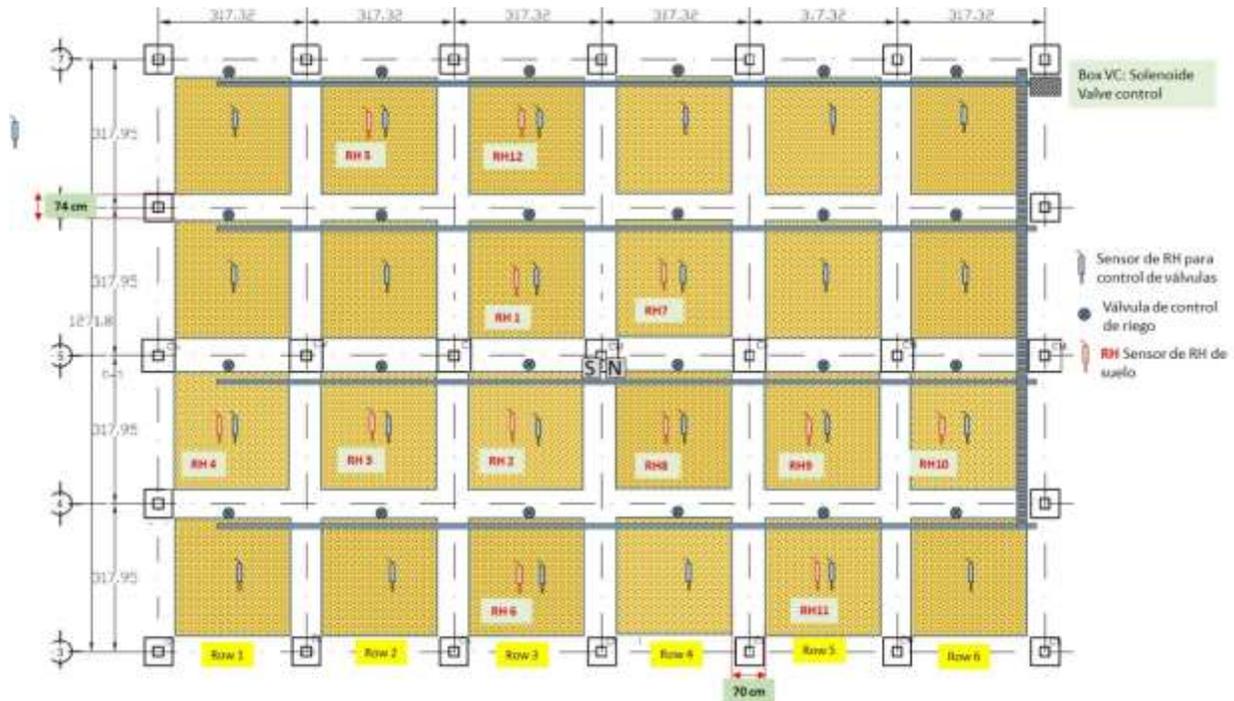


La siguiente figura muestra una proyección vertical de los sensores. Aquí se indican que sensores van a la Caja Norte y cuáles van a la Caja Sur

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS



La siguiente figura muestra la ubicación de los cajones que contienen a las micro parcelas y en cuáles de ellos están ubicados los sensores de humedad relativa del suelo.



MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Sistema de adquisición de datos

Dado el banco de sensores eléctricos y ambientales propuesto, se recomienda el uso de un adquirente de datos robusto y confiable para el almacenamiento de los datos medidos, así como de un buen protocolo de comunicación para el envío de la información a los servidores para el análisis y visualización.

El número de entradas analógicas y digitales es soportado de manera adecuada por el adquirente de la marca Campbell modelo CR6. El CR6 proporciona una comunicación rápida, bajos requisitos de energía, USB incorporado, tamaño compacto y alta precisión y resolución de entrada analógica. Utiliza terminales universales para permitir una conexión a prácticamente cualquier sensor: analógico, digital o inteligente.

Puede operar en ambientes extremos con un rango de operación desde -40° a $+70^{\circ}$ °C, se conecta directamente al puerto USB de una computadora, es capaz de detectar pequeños cambios en los valores de los datos con mediciones de alta resolución, tiene la capacidad de conectarse directamente a Ethernet por el protocolo RJ-45 o a través de USB (Ethernet virtual). Incluye una unidad de tarjeta microSD para requisitos de memoria extendida, y se puede adquirir una página web integrada para conexión directa a través del navegador web.

Aunado a esto, dado que la cantidad de parámetro a medir son más 32, se usará un multiplexor de la marca Campbell modelo AM16/32B. La figura siguiente muestra una fotografía del equipo.



**Greatly
Increases
Sensor
Capacity**

Connects many sensors to single datalogger

MONITOREO DE PARÁMETROS Y VARIABLES EN SISTEMAS AGROVOLTAICOS

BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

Madhumathi, R., Arumuganathan, T., Shruthi, R. (2022). A Survey on Wireless Sensor Networks and Instrumentation Techniques for Smart Agriculture. In: Shakya, S., Bestak, R., Palanisamy, R., Kamel, K.A. (eds) Mobile Computing and Sustainable Informatics. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 68. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1866-6_33

A.Z. Aqueel-ur-Rehman, N.I. Abbasi, Z.A. Shaikh, A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Comput. Stand. Interf.* **36**, 263–270 (2014)

R.K. Kodali, N. Rawat, L. Boppana, *WSN sensors for precision agriculture*, in *IEEE Region 10 Symposium*, 2014, pp. 651–656

Everardo Zamora: El cultivo del repollo Serie Guía-Producción de hortalizas DAG/HORT-011, febrero 2016 UNISON. <https://dagus.unison.mx/Zamora/COL%20O%20REPOLLO-DAG-HORT-011.pdf>

Everardo Zamora: El cultivo de la cebolla Serie Guía-Producción de hortalizas DAG/HORT-015, julio 2016 UNISON: <https://dagus.unison.mx/Zamora/CEBOLLA-DAG-HORT-015.pdf>

Everardo Zamora: El cultivo del Brócoli Serie Guía-Producción de hortalizas DAG/HORT-011, enero 2012 UNISON: <https://dagus.unison.mx/Zamora/BROCOLI-DAG-HORT-010.pdf>

Everardo Zamora: El cultivo de la Coliflor Serie Guía-Producción de hortalizas DAG/HORT-011, enero 2012 UNISON: <https://dagus.unison.mx/Zamora/COLIFLOR-DAG-HORT-013.pdf>

Norma de referencia: IEC 61724-1:2017. Photovoltaic system performance – part 1: Monitoring