



GOBIERNO DEL
ESTADO DE MÉXICO



TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE CHICOLOAPAN

Ingeniería en Energías Renovables

Análisis del consumo energético del robot agrícola Voltan
para propuesta de integración de un sistema fotovoltaico
como respaldo energético

Tesis profesional

Que para obtener el Grado de

Ingeniera en Energías Renovables

P R E S E N T A

Maricela Araujo Rosas

Director: Dr. Daniel Hernández Rivera

Co-director: Dr. Noé Velázquez López



Chicoloapan de Juárez, Estado de México a junio 2024

Presentación y directorio de los asesores

El presente trabajo realizado bajo de la modalidad de Tesis profesional, titulado “Análisis del consumo energético del robot agrícola Voltan para propuesta de integración de un sistema fotovoltaico como respaldo energético” y que ha sido realizado por la alumna **Maricela Araujo Rosas** con matrícula 19020021 ha sido aprobado al igual que aceptado como requisito para obtener el grado de **Licenciatura** en:

Ingeniería en Energías Renovables

Director:

Dr. Daniel Hernández Rivera

Co-director:

Dr. Noé Velázquez López

Revisor:

Mtro. Marco Antonio Lozano Vinalay

Revisor:

Ing. Christopher Iván Lorenzo Alfaro

Contenido

I.	Agradecimientos.....	5
II.	Resumen	6
III.	Abstract.....	7
1.	Introducción.....	9
2.	Antecedentes.....	11
2.1	Robots agrícolas.....	13
3.	Marco teórico.....	17
3.1	Evolución del robot (Voltan).....	17
3.2	Elementos electrónicos del robot agrícola	18
3.3	Automatización	19
3.4	Clasificación de componentes electrónicos.....	20
3.5	Dispositivos de control del robot Voltan.....	20
3.5.1	Arduino® mega.....	20
3.5.2	Sabertooth 2X60	22
3.5.3	IBT2	24
3.5.4	Controlador TB6600	26
3.6	Actuadores.....	28
3.6.1	Motor de CC	28
3.6.2	Relevador	30
3.6.3	Receptor (Flysky Receive).....	32
3.6.4	Motor a pasos NEMA 17	33
3.7	Sensores.....	35
3.7.1	Encoder rotativo incremental.....	35
3.7.2	Unidad de Medición Inercial (IMU).....	37
3.8	Consumo energético.....	39
3.9	Baterías.....	39
3.9.1	Baterías de ácido-plomo	39
3.9.2	Batería de litio.....	41
3.10	Autosuficiencia energética y recolección de energía	43
3.11	Sistema fotovoltaico autónomo	46

3.12	Celdas de perovskita.....	49
4.	Planteamiento del problema	56
4.1	Justificación.....	58
5.	Hipótesis	60
6.	Objetivos.....	61
6.1	Objetivo general.....	61
6.2	Objetivos específicos.....	61
7.	Metodología.....	62
7.1	Procedimiento de la metodología.....	66
7.2	Análisis energético del sitio de pruebas	68
7.2.1	Análisis cuantitativo de los módulos fotovoltaicos ya disponibles en el mercado	76
7.2.2	Análisis del módulo propuesto.....	83
7.2.3	Diseño de propuesta.....	89
7.2.4	Análisis del sistema autónomo propuesto II	91
7.2.5	Módulos propuestos	91
7.2.6	Análisis numérico del sistema fotovoltaico autónomo propuesto II.....	97
7.2.7	Diseño de propuesta II para el robot agrícola Voltan	103
8.	Resultados y discusión.....	106
8.1	Consumo energético del robot.....	106
8.1.1	Promedio de los consumos.....	106
8.1.2	Consumo energético de los surcos recorridos en sus tres velocidades	110
8.1.3	Consumo energético del viraje recorridos en sus tres velocidades.....	115
8.2	Consumo energético de Voltan en campo.....	121
8.2.1	Análisis del consumo energético	123
8.2.2	Análisis de consumo energético cuando el robot opera con batería de ácido-plomo. 124	
8.2.3	Análisis del consumo energético de la batería de litio-fosfato	139
9.	Conclusiones.....	147
10.	Referencias	152
11.	Anexos	157

I. Agradecimientos

Primeramente, agradezco a Dios por haberme brindado de vida, salud de habilidades, cualidades y de todo lo que poseo, pues sin estos no habría podido terminar mi ingeniería.

Agradezco sinceramente a mi padre Marcelino Araujo por ser mi motor en la vida mi impulso para seguir estudiando pues sus consejos y sabiduría me permitieron trazarme esta meta que hoy día veo realizar y de la cual me enorgullezco, todo gracias al apoyo constante de mi querido padre.

Así mismo agradezco a mi madre Estela Rosas por brindarme todo su apoyo, su tiempo, ánimo, fuerza, calidez, y amor, porque en aquellos momentos en las que sentí que ya no podía más estuvo ahí para mí dándome estímulo para poder continuar.

Agradezco a mi hermano Samuel Araujo por ser mi ejemplo a seguir, por su dedicación y tiempo en enseñarme llevándolo a convertirse en un maestro para mí, así como por sus buenos consejos y apoyo en todo momento.

También agradezco enormemente a mi hermana, Liliana Araujo, por estar siempre a mi lado, apoyándome en todo lo que necesitaba y brindándome ánimo y determinación

También agradezco a cada uno de mis profesores del tecnológico de estudios superiores de Chicoloapan que participaron en mi formación académica y profesional.

Considero importante agradecer a los estudiantes de maestría y doctorado de ingeniería Agrícola Y Uso Integral del agua (IAUIA) por su tiempo y enseñanzas brindadas para la elaboración de esta tesis.

Finalmente, expreso mi sincero agradecimiento a mis asesores el Dr. Daniel Hernández Rivera y el Dr. Noé Velázquez López por su dedicación, tiempo y apoyo constante en el desarrollo de esta tesis para poder obtener el título de ingeniería en energías renovables.

II. Resumen

La presente tesis tiene como objetivo principal llevar a cabo un análisis energético del robot agrícola Voltan, un proyecto dirigido por el Dr. Noe Velázquez López y el cual actualmente se encuentra en desarrollo en la Universidad Autónoma Chapingo. El propósito de este análisis es evaluar la viabilidad de la implementación de un sistema fotovoltaico autónomo.

En el contexto de una transición energética global, la promoción y adopción de energías renovables adquiere una importancia crucial. Tanto en grandes como en pequeños proyectos, estas energías son fundamentales para contribuir al bienestar humano y la preservación del medio ambiente.

Si bien la demanda de productos agrícolas está en aumento, la tecnología también avanza, como evidencia el robot analizado, sin embargo, cualquier proyecto enfrenta desafíos que deben ser abordados para su óptimo funcionamiento. En este sentido, se analizarán los inconvenientes presentes en el proyecto con el fin de identificar posibles soluciones.

En resumen, comprender el consumo energético del robot proporciona información valiosa sobre las causas que pueden provocar un aumento en dicho consumo, su impacto en el funcionamiento y las estrategias para gestionarlo de manera sostenible.

III. Abstract

The main objective of this thesis is to carry out an energy analysis of the Voltan agricultural robot, a project directed by Dr. Noe Velázquez López and which is currently in development at the Chapingo Autonomous University. The purpose of this analysis is to evaluate the feasibility of implementing an autonomous photovoltaic system.

In the context of a global energy transition, the promotion and adoption of renewable energy acquires crucial importance. In both large and small projects, these energies are essential to contribute to human well-being and the preservation of the environment.

Although the demand for agricultural products is increasing, technology is also advancing, as evidenced by the robot analyzed, however, any project faces challenges that must be addressed for its optimal functioning. In this sense, the drawbacks present in the project will be analyzed in order to identify possible solutions.

In summary, understanding the robot's energy consumption provides valuable information about the causes that may cause an increase in said consumption, its impact on operation and strategies to manage it in a sustainable way.

Nomenclatura

Tabla 1. Nomenclatura de los términos más utilizados

Abreviatura	Descripción
CC	Corriente Continua
CA	Corriente Alterna
SF	Sistema Fotovoltaico
SFA	Sistema Fotovoltaico Autónomo
PV	Panel fotovoltaico
HSP	Hora Solar Pico
PWM	Modulación de ancho de pulso (Pulse Width Modulate)
GPS	Sistema de Posición Global
DIP	Paquete Dual en Línea

1. Introducción

Las energías renovables están definidas por la Real Academia Española (REA) como aquellas que “proceden de un recurso presente en la naturaleza de manera prácticamente inagotable”. Y definidas con el NEOMA como el “tipo de energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables o capaces de regenerarse por medios naturales”. Entre las más conocidas están la fotovoltaica, eólica, hidráulica, biomasa y geotérmica. Hoy en día la aplicación de estas se presenta para satisfacer numerosas necesidades dentro del sector industrial, doméstico, eléctrico y agrario. Siendo el último dividido en cuatro subsectores: agricultura, ganadería, pesca/acuicultura y silvicultura. En donde se resalta la agricultura ya que esta desempeña un papel crucial en la economía al proveer de productos como cultivos alimentarios, fibras o la conversión de recursos de biomasa en bioenergía, siempre que el proceso de producción sea respetuoso con el medio ambiente.[1]

La agricultura es la principal fuente de alimentación por lo que el hombre a través de la historia ha fabricado diversidad de utensilios y herramientas manuales de las cuales se ha valido para facilitar las labores agrícolas, buscando economía energética, eficiencia y productividad. Las que, a su vez, con el desarrollo de la tecnología van siendo desplazadas por máquinas y equipos de mayor potencia y capacidad de operación, surgiendo la necesidad del desarrollo de nuevas tecnologías basadas en energías renovables es vital para promover la eficiencia de los cultivos.[2]

Actualmente el impulso de las energías renovables ha crecido considerablemente a tal punto que son consideradas para casi todo tipo de proyectos, así se ha denotado en los avances tecnológicos en los que suelen fomentarlas como suministro de energía primaria o auxiliar, un ejemplo son los robots agrícolas que en los últimos años han ido evolucionando con la implementación de sensores avanzados, cámaras especializadas, algoritmos de inteligencia artificial y la utilización de las energías renovables principalmente la fotovoltaica les han permitido un mejor rendimiento permitiéndoles facilitar y mejorar cualquier proceso de automatización para la agricultura.

La automatización de tareas agrícolas es de suma importancia para la industria alimentaria y el sector financiero ya que permite aumentar significativamente la producción, reduce costos, trabajo pesado, tiempo de producción y gestiona tareas repetitivas, por ello la automatización es clave para su competitividad.

Algunos diseños de robots agrícolas han ido haciendo uso de la energía fotovoltaica para su energización y automatización esto con el propósito de traer beneficios tanto a productores como a consumidores, y para contribuir al cuidado del planeta. Por lo tanto, la evolución de estos robots sigue siendo un tema de interés a nivel internacional.

En México, en la universidad autónoma Chapingo un grupo de investigación a cargo de Dr. Noé Velázquez López se encuentra desarrollando un robot nombrado Voltan con patente MX 4369 B [3] algunos de los implementos con los que cuenta para realizar sus labores agrícolas son, una sembradora y una fertilizadora además de poseer la capacidad de navegación, así como la detección de malezas mediante la utilización inteligencia artificial, entre más labores que están en proceso de análisis como eliminación de malezas a partir de láser.

La presente tesis busca realizar un análisis energético del robot agrícola Voltan, para ello se estudiará el consumo energético de cada uno de los componentes del robot y del implemento de la sembradora

Se realizará un dimensionamiento de un módulo fotovoltaico o un sistema fotovoltaico autónomo de módulos tándem para determinar si es viable o son viables su colocación sobre el robot como fuente auxiliar de suministro de energía.

2. Antecedentes

Márquez Javier (2023). Con su artículo titulado “Los tractores tienen competencia en el campo: el Solix, un robot solar que esparce herbicidas, es la prueba” tuvo como objetivo dar a conocer el desarrollo del primer robot autónomo para la producción a gran escala nombrado Solix el cual tiene como misión delegar parte de la productividad en una máquina capaz de trabajar sin pausa según menciona el startup brasileño Solinftec. La metodología que utilizó se enfocó en las características y labores agrícolas de Solix por ejemplo destaca que funciona con paneles solares que le permiten recargar suficiente energía en sus baterías como para funcionar tres días sin luz solar. Y que, además, es capaz esparcir herbicidas de manera precisa en los sectores que realmente lo necesitan, y en las cantidades adecuadas para evitar el desperdicio, así como de detectar de forma temprana la aparición de malas hierbas y de trabajar por largos períodos sin intervención humana. Concluyendo lo siguiente “lejos de ser un proyecto, como muchos otros, que podría quedarse sobre el papel, Solinftec asegura con total confianza que su robot para la agricultura de precisión que espera alcanzar una producción de más de 1,500 unidades anuales” (Figura 1).

Cinco Noticias Redacción (2021). Con el artículo titulado “EcoRobotix, el robot agrícola autónomo y ecológico”, tuvo como objetivo informar del desarrollo de este robot alimentado con energía solar y utilizado para desplazarse de forma autónoma por los cultivos, identificar las malas hierbas y aplicar con precisión la dosis justa de herbicida para eliminarlas. Usó una metodología descriptiva de las características y el funcionamiento del robot en donde menciona algunos de los componentes con los que cuenta destacando una cámara, GPS, sensores, dos brazos robóticos que sirven para aplicar con exactitud micro dosis de herbicida, cuatro ruedas que están diseñadas para avanzar sobre todos los terrenos, dos motores eléctricos, un tanque de 30 litros de herbicida suficiente para un día de trabajo así mismo aludo que puede estar activo durante 12 horas al día incluso cuando está nublado, sin ser necesario recargarlo durante la noche además de que se puede configurar y controlar a través de un smartphone, en el que hay que instalar una aplicación muy sencilla de utilizar. Concluyendo que las oportunidades que ofrece la robótica ponen de manifiesto que su

enfoque puede ser benéfico ya que ayuda a reducir los problemas ambientales y, a la vez, produce un ahorro del 30% en comparación con los métodos que aplican herbicidas indiscriminadamente, además, de que es más barato y liviano (Figura 2).

Bellini Emiliano (2022). En su artículo titulado “Segadora robotizada con energía solar para viñedos” con el objetivo de dar a conocer el desarrollado de una segadora robotizada accionada por energía fotovoltaica para aplicaciones en viñedos y otros campos agrícolas por la empresa francesa Vitirover. Utilizo una metodología descriptiva de sus características y funciones mencionando que es un dispositivo de 20 W basado en células solares policristalinas, una batería y la optimización del MPPT, mide 750 x 390 x 290 mm y pesa 20 kg, cuenta con cuatro ruedas cada una con motor, una segadora capaz de utilizarse en un rebaño de 50 unidades en una propiedad de unas 50 hectáreas y un radio de 20 km. Puede funcionar con una pendiente máxima del 15% y alcanzar una velocidad de 300 m/h. concluye que este robot puede trabajar en cualquier condición meteorológica, cortar cualquier tipo de césped de entre 4 y 10 cm de altura además de que cada uno está conectado mediante redes celulares a un operador llamado pastor pues de ser necesario el pastor puede tomar el control del robot a distancia para realizar el mantenimiento como para desbloquear un robot (Figura 3).

Reimondo Gustavo (2020). En su artículo titulado “robot desmalezador con rayo láser y vapor de agua sin agrotóxicos” con el objetivo de informar sobre el proyecto Gbot que es un robot que gracias a la inteligencia artificial elimina malezas por medio de vapor y un rayo láser alimentado por energía solar que mediante la inteligencia artificial. Utilizó una metodología de descripción de la evolución de Gbot donde menciona las diferentes pruebas que a lo largo de aproximadamente tres años la primera se realizó aplicando microondas a una maleza hasta que se implementó el rayo láser. Concluyó que el uso de agrotóxicos es nocivo para la humanidad y el suelo por que hacer uso de esta tecnología trae beneficios como logrando una reducción de los costos pues aproximadamente un agricultor paga una cantidad de 90 a 135 dólares americanos por hectárea en el uso de herbicidas además de cuenta con la capacidad de tomar información de los suelos y del medio ambiente que recorre para almacenarla

y pueda utilizarla en el futuro por el productor para mejorar su rendimiento y conocer mejor su campo (Figura 4).

Martín Olmos Leandro (2022). Con su artículo titulado “FARMDROID FD20, el robot autónomo para siembra y deshierbe mecánico” con el objetivo de informar del desarrollo de este robot construido alimentado por módulos solares por la empresa francesa STECOMAT sarl siendo el primer robot totalmente autónomo del mundo capaz de manejar tanto la siembra como el control mecánico de malezas. Ocupó una metodología enfocada en las características y funciones del robot entre las cuales se encuentra una unidad neutra en CO2 totalmente autónoma, siembra, deshierbe precisos que garantizan un mayor rendimiento con un proceso temprano, precisión y fiabilidad de la tecnología GPS. Concluye mencionando que este es tan eficaz ya que funciona mediante señales GPS RTK, lo que le permite registrar la ubicación de cada semilla para después realizar el control mecánico de las malezas entre hileras esta precisión única le permite limpiar el cultivo de una manera muy eficiente, minimizando la necesidad de quitar hierbas de manera manual (Figura 5).

2.1 Robots agrícolas

La real academia española (REA) define a la palabra robot como una “maquina o ingenio electrónico programable que es capaz de manipular objetos y realizar diversas operaciones”.

De acuerdo a Bechar Avital and Vigneault Clément (2017) los robots agrícolas “son máquinas versátiles y programables diseñadas para llevar a cabo diversas tareas en la agricultura, tales como labores de cultivo, trasplante, fumigación y cosecha selectiva. Sin embargo, su desempeño en entornos dinámicos y no estructurados a menudo resulta deficiente debido a las incertidumbres inherentes, la falta de conocimiento sobre los entornos operativos y la imprevisibilidad de los eventos y condiciones ambientales. Además, las limitaciones de las tecnologías de sensores también afectan negativamente las capacidades de los sistemas de robots autónomos (ARS)”.

Sin embargo, a pesar de las limitaciones, su ingreso al mercado es actualmente de gran interés ya que las actividades que realizan prometen traer grandes beneficios a la agricultura.

A continuación, se muestran algunas figuras de robots agrícolas mencionados en antecedentes:



Función: esparcir herbicidas y detección de maleza

Figura 1. Imagen del robot agrícola SOLINFTEC



Función: aplicar dosis precisa de herbicidas y detección de maleza

Figura 2. Imagen del robot agrícola EcoRobotix



Función: para aplicaciones en viñedos y otros campos agrícolas

Figura 3. Imagen del robot agrícola Segadora robotizada



Función: elimina malezas por medio de vapor y un rayo láser

Figura 4. Imagen del robot agrícola Gbot



Función: siembra y deshierbe mecánico

Figura 5. Imagen del robot agrícola FARMDROID

3. Marco teórico

3.1 Evolución del robot (Voltan)

El robot Voltan es un proyecto en desarrollo, originado para labores agrícolas entre las que destaca la siembra de maíz, la fertilización, la detección de malezas, etc. Resultando relevante por su capacidad de poder operar en entornos agrícolas difíciles, es decir, en aquellos en donde los surcos son más estrechos y que aun tractor le resultaría complicado acceder.

El primer prototipo fue desarrollado en el año 2014 nace como una solución a la problemática de la creciente demanda de recursos agrícolas y al desabasto de mano de obra, así como a la necesidad de sembrar en espacios más reducidos. Este primer prototipo cuenta con un sistema de suspensión con patente MX 4369 para transitar en terrenos irregulares, con visión artificial capaz de detectar la cosecha para aplicación de agroquímicos, así como un implemento sembrador con patente MX 4560.

Sin embargo, surgió la necesidad de un segundo prototipo que soportara más implementos que solamente la sembradora, por lo que fue desarrollo con características más rentables para la incorporación de nuevos implementos y dispositivos electrónicos para contribuir a la ampliación de nuevas tareas agrícolas como la fertilizadora y la detección de maleza atreves de inteligencia artificial (IA) son ejemplo de ello [10] (Figura 6).

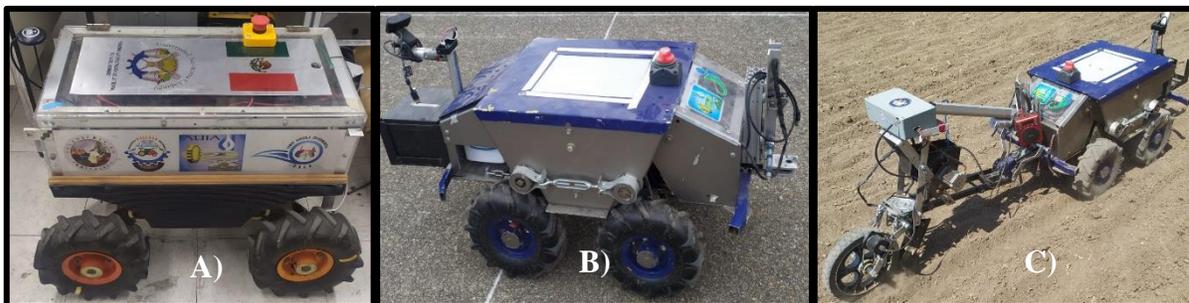


Figura 6. A) Primer prototipo, B) segundo prototipo, C) robot con sembradora

3.2 Elementos electrónicos del robot agrícola

Voltan junto con su implemento sembrador consta de diferentes elementos electrónicos en la Figura 7 se observa su clasificación.

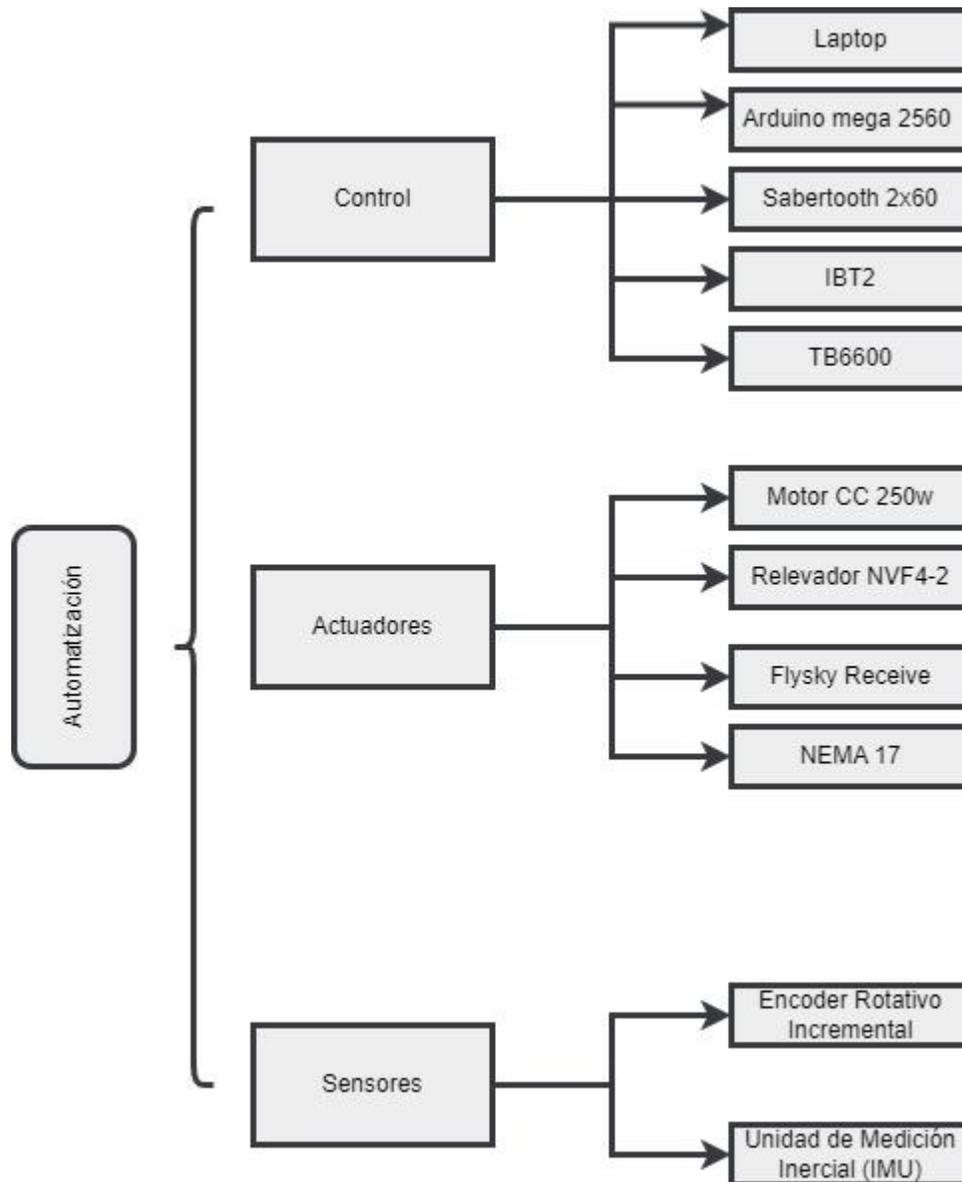


Figura 7. Diagrama de clasificación de los componentes electrónicos del robot

3.3 Automatización

“Es liberar al hombre de procesos repetitivos que requieran poco o ningún esfuerzo mental. Sobre todo, en el desarrollo de trabajos en los cuales hay que observar forzosamente un determinado orden de procesos individuales; algunos dispositivos adecuados pueden suplir esta actividad humana de forma más rápida, con una calidad constante y una adecuada planeación de la producción” [11].

En general es un término que describe a un sistema con la capacidad de incorporar diferentes elementos o procesos tecnológicos, informáticos, mecánicos y electromecánicos con el fin de minimizar la intervención humana.

La automatización asegura tener el control de procesos y comportamientos a los que es aplicables por ende abarca diferentes procesos industriales como los de control, sistemas digitales supervisión, gestión de datos, accionamientos, instrumentación, comunicaciones, producción, interacciones y muchos otros.

La automatización es imprescindible para la robótica ya que esta disciplina consta de dispositivos de control, sensores y actuadores que ejecutan diferentes procesos, ya sean mecánicos, industriales, informáticos y de máquinas mediante una programación establecida.

Debe ser capaz de poder controlar efectivamente todo el conjunto de posibles eventos previstos frente a posibles ocurrencias; buscando siempre lograr la situación más favorable según la determinación de recursos asignados.

Uno de los beneficios de la automatización es la simplificación de las actividades, que puedan implicar que un trabajador no necesite o requiera grandes cantidades de conocimientos y capacitación para la manipulación del proceso productivo, tenemos como ejemplo a los robots agrícolas, los cuales constan de diversos elementos electrónicos que les permiten cumplir con sus diversas funciones para lo que son desarrollados [12].

3.4 Clasificación de componentes electrónicos



3.5 Dispositivos de control del robot Voltan

3.5.1 Arduino® mega

Arduino® Mega 2560 es una placa de desarrollo ejemplar dedicada a crear aplicaciones extensas en comparación con otras placas de fabricante de Arduino. La placa aloja el microcontrolador ATmega2560, que opera a una frecuencia de 16 MHz. La placa contiene 54 pines de entrada/salidas digitales, 16 entradas analógicas, 4 UART (puertos serie de hardware), una conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP y un botón de reinicio.

Esta placa es sucesora de Arduino Mega, está dedicada a aplicaciones y proyectos que requieren gran cantidad de pines de entrada y salida y los casos de uso que necesitan una alta potencia de procesamiento. El Arduino® Mega 2560 viene con un conjunto mucho más grande de IO en comparación con la placa Uno tradicional considerando el factor de forma de ambos tableros.

- Elementos de Arduino® Mega 2560

En la Figura 8 se aprecian algunos de los elementos que componen a Arduino® Mega

[2D Wireframe]

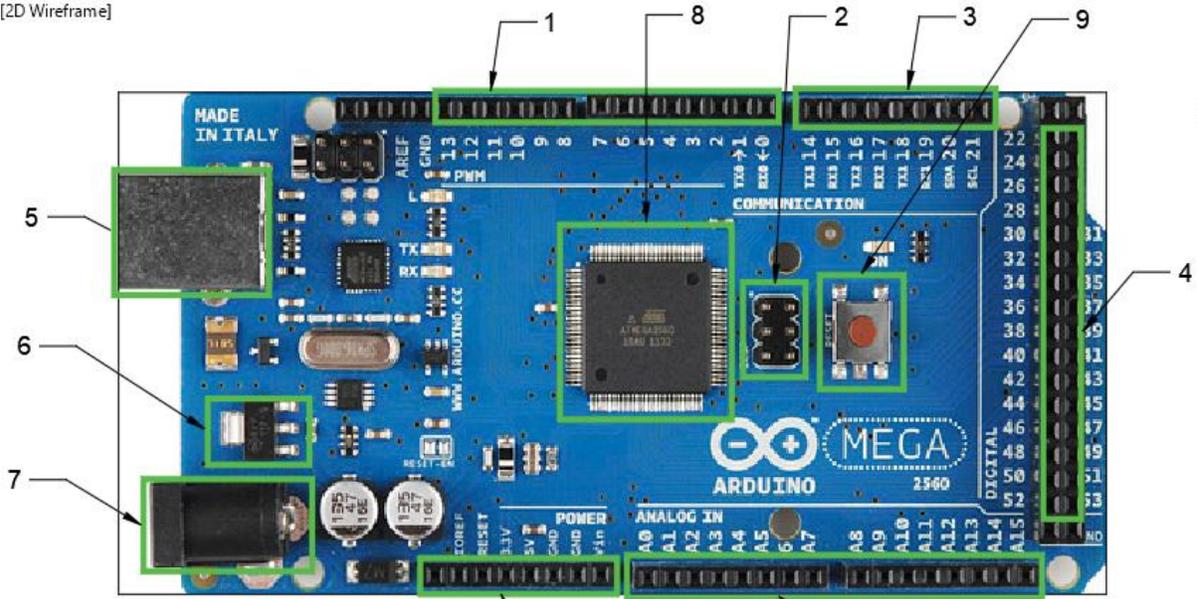


Figura 8. 1) Pines digitales 2) ICSP 3) Pines de comunicación 4) entradas/salidas digitales de uso general 5) Conector USB tipo B 6) Regulador de voltaje 7) Conector Jack 8) Microcontrolador (ATmega 2560) 9) Botón de reinicio 10) Pines de alimentación 11) Entradas analógicas.

- Condiciones de operación recomendables

De acuerdo al manual de arduino® mega existen valores de voltaje y temperatura recomendables a los que este puede operar, como se muestra a continuación:

Tabla 2. Voltaje y temperatura recomendables para la placa arduino® mega

Símbolo	Descripción	Mínimo	Ideal	Máximo	Unidad
VIN	Voltaje de entrada desde VIN pad/DC jack	7	7.0	12	V
VUSB	Voltaje de entrada desde el conector USB	4.8	5.0	5.5	V
TOP	Temperatura del funcionamiento	-40.0	25	85	°C
	Consumo de corriente	50	100	200	mA

Como dato importante la Tabla 2 indica que si desea energizar la placa a través del Jack lo ideal sería proporcionarle una alimentación de 7 V, a razón de que el regulador lineal de tensión (regulador de voltaje) tiene la función de tomar la tensión (de 6 V a 12 V) suministrada para ajustarla y precisarla a 5v necesarios para el funcionamiento de la placa.

3.5.2 Sabertooth 2X60

Sabertooth es un controlador que cuenta con modos mixtos diseñados especialmente para robots de tracción diferencial, en los que dos motores proporcionan tanto la dirección como la propulsión. También dispone de opciones independientes en todos sus modos de funcionamiento. Esto es útil si se tienen dos motores para controlar, pero no necesariamente servirá para accionar un robot de accionamiento diferencial. No es necesario que los motores sean iguales o incluso similares, ya que siempre y cuando ambos estén dentro de los límites operativos de Sabertooth no presentara inconvenientes.

Yendo un paso más allá del simple frenado regenerativo, un controlador de motor Sabertooth devolverá energía a la batería cada vez que se ordene una deceleración o una inversión del motor. Esto puede llevar a mejoras dramáticas en el tiempo de ejecución para sistemas que se detienen o retroceden con frecuencia, como un robot de colocación o un vehículo que circula por terreno montañoso. Este esquema de conducción también ahorra energía al devolver la energía inductiva almacenada en los devanados del motor a la batería en cada ciclo de conmutación, en lugar de quemándolo en forma de calor en los devanados del motor. Esto hace que el funcionamiento con aceleración parcial sea muy eficiente.

Además de que permite manipular los motores con: voltaje analógico, control de radio, serie y serie en paquetes. Tiene modos de operación independiente y de velocidad + dirección, lo que lo convierte en el controlador ideal para robots de accionamiento diferencial. El modo de funcionamiento se configura con los interruptores DIP integrados.

- Elementos del Sabertooth

En la Figura 9 se muestran los elementos que componen al controlador sabertooth

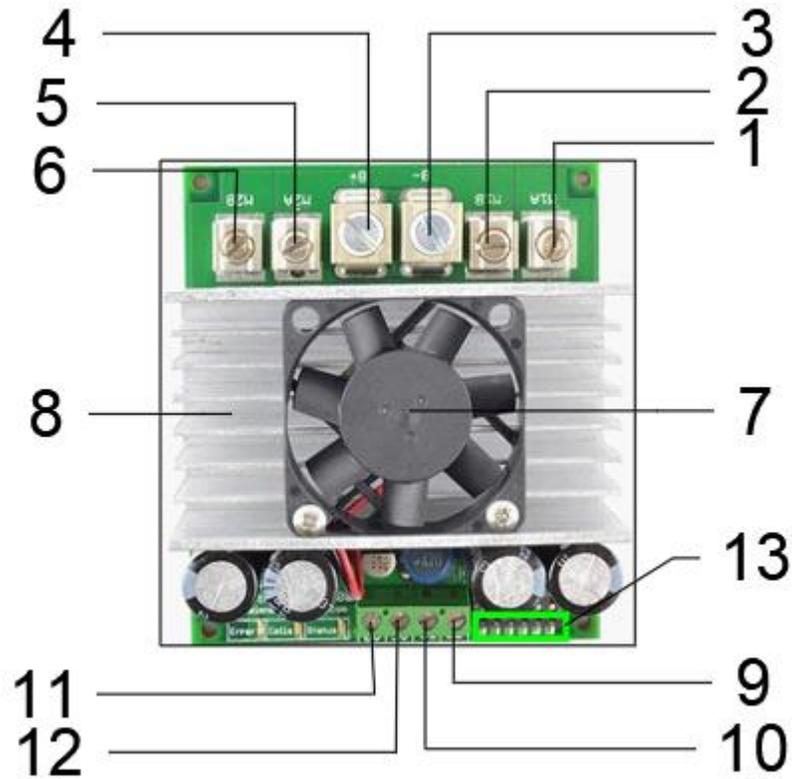


Figura 9. 1y 2) M1A Y M1B conectores a los dos cables del primer motor con escobillas de CC 3) B- conexión al terminal negativo de la batería, tierra de señal 4) B+ conexión al terminal positivo de la batería, voltaje máximo absoluto es de 33.8v 5y 6) M2A Y M2B conectores para los dos cables de un segundo motor con escobillas 10) S1 entrada de señal principal 9) S2 entrada de señal secundaria 11) 0V conexión a tierra 12) 5v salida regulada de 1A en modo conmutado proporcionado por el controlador 13) Interruptores DIP para configurar el funcionamiento del controlador

- Especificaciones

Tabla 3. Especificaciones de operación del controlador Sabertooth 2x60

DESCRIPCIÓN	MEDICIÓN	UNIDAD
Voltaje	6-33.6	v
Corriente de salida por canal	60	A
Corriente de salida máxima por canal	120	A
Modos de funcionamiento	Analógico, R/C, serial	

La Tabla 3 muestra las condiciones de operación recomendables para evitar cualquier inconveniente al trabajar con el controlador, por ejemplo describe que solo se le puede suministrar un voltaje mínimo de 6 y un máximo de 33.6 además indica la corriente y sus modos de funcionamiento adecuados, estos datos son importantes de considerar si se desea obtener un buen rendimiento de los motores ya que tipo de controlador de motor dual es de los más versátiles, eficientes y fáciles de usar adecuado para robots de alta potencia.

3.5.3 IBT2

El BTS7960 es un módulo de puente H de alta corriente totalmente integrado para aplicaciones de accionamiento de motores. La interconexión a un microcontrolador es fácil gracias al controlador IC integrado, que dispone de entradas de nivel lógico, diagnóstico con sensor de corriente, ajuste de la velocidad de giro, generación de tiempo muerto y protección contra sobretensión, subtensión, sobrecorriente y cortocircuito. El BTS7960 proporciona una solución optimizada en costos para variadores de motor PWM de alta corriente protegidos con muy bajo consumo de espacio en la placa.

Este módulo está basado en chips BTN7960B / BTS7960B. El módulo está diseñado para motores de CC de alta potencia y unidades de solenoides. La interconexión de este controlador de alta corriente con Arduino, PIC y AVR es extremadamente fácil. Este módulo de controlador le permite controlar un motor de CC con una corriente tan alta como 43 A. La frecuencia máxima de operación es de hasta 25 kHz. utiliza el medio puente Infineon BTS7960 de corriente alta. el BTS7960 es parte de la familia NovalithICTM que contiene un MOSFET de lado alto de canal p y un MOSFET de lado n de canal bajo con un CI de controlador integrado en un solo paquete.

- Elementos del controlador IBT_2 (BTS7960)

En la siguiente Figura 10 se muestran algunos de los elementos que integran al IBT_2

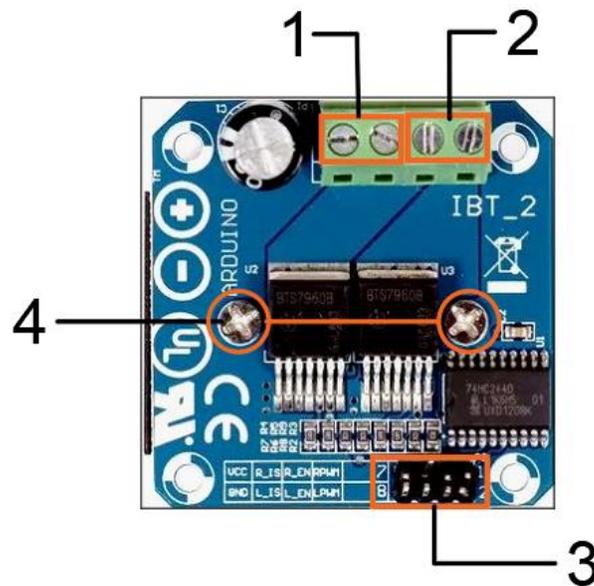


Figura 10.1) Pines de entrada de fuente de alimentación 2) Pines de salida del motor 3) Pines de entrada de control 4) reguladores de voltaje

- Especificaciones

Tabla 4. Especificaciones del módulo driver para motor de alta potencia IBT2

DESCRIPCIÓN	MAGNITUD	UNIDAD
Voltaje de entrada	6~27	Vcc
Corriente máxima	43	A
Nivel de entrada de control	3.3~5	V
Capacidad PWM	25	KHz
Peso	66	g

Como se aprecia en la Tabla 4 este módulo solo acepta un voltaje de 6 a máximo de 27 v si existe sobretensión se bloqueará o bien si el voltaje es bajo se apagará. Así mismo es importante considerar que para alcanzar la alta corriente, la temperatura de unión debe permanecer baja. El módulo BTN7960 tiene un pequeño disipador de calor que no es suficiente para alcanzar un rango de 10A a 43A de manera consistente. Si necesita capacidad de corriente continua alta, se debe emplear una mejor técnica de enfriamiento (por ejemplo, flujo de aire forzado, enfriamiento de agua, etc.).

3.5.4 Controlador TB6600

Este es un controlador de motor paso a paso bifásico profesional. Soporta velocidad y control de dirección. Puede configurar su micropasos y corriente de salida con 6 interruptores DIP. Hay 7 tipos de micropasos (1, 2/A, 2/B, 4, 8, 16, 32) y 8 tipos de control de corriente (0.5A, 1A, 1.5A, 2A, 2,5 A, 2,8 A, 3,0 A, 3,5 A) en total. Y todos los terminales de señal adoptan un optoacoplador de alta velocidad, aislamiento, mejorando su capacidad anti interferencias de alta frecuencia.

- Elementos del controlador TB6600

En la siguiente Figura 11 se observan algunos de los elementos más importantes del controlador

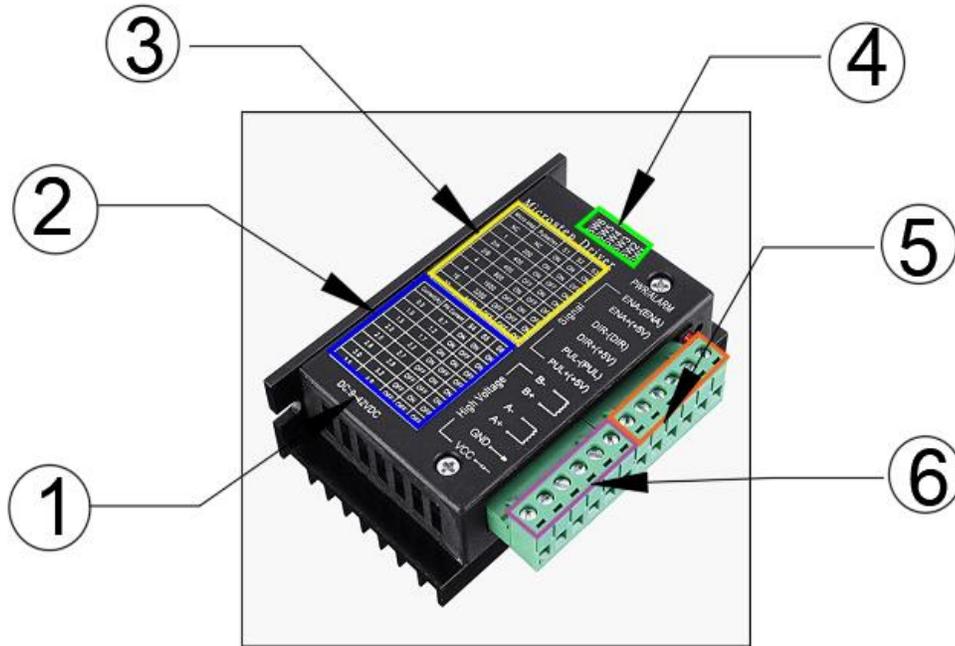


Figura 11. 1) Voltaje DC 9-42 VDC 2) Tabla de referencia de configuración 3) Tabla de referencia de subdivisión 4) Subdivisión/tabla de referencia 5) Zona de potencia 6) Conexiones de señales de control.

- Especificaciones

Tabla 5. Especificaciones de operación del controlador TB6600

DESCRIPCIÓN	MAGNITUD	UNIDAD
Corriente de entrada	0-0.5	A
Corriente de salida	0.5-4	A
Voltaje	9 a 42	V
Potencia máxima	160	W
Micropasos	1,2/A,2/B,4,8,16,32	
Temperatura	(-)10~45	°C
Humedad	Sin condensación	
Peso	0.2	Kg
Dimensiones	96*56*33	mm

En la Tabla 5 se observan algunas de las especificaciones que necesita el TB6600 para que pueda funcionar sin ningún inconveniente, así mismo, es recomendable cortar la alimentación cuando se conecte el sistema y asegurarse de que la potencia polar es correcta o se dañará el controlador.

El TB6600 cuenta con tablas de referencias para la configuración de micropasos los cuales permiten ajustar el micropaso del motor a través de los primeros tres interruptores DIP.

3.6 Actuadores

3.6.1 Motor de CC

Un motor de corriente continua es aquel que tiene la capacidad de convertir energía eléctrica en movimiento o trabajo mecánico a través de fuerzas electromagnéticas. Es un dispositivo de inducción que hace uso de los materiales conductores capaces de permitir el paso a la corriente eléctrica para generar movimiento mecánico, puede utilizarse en todas aquellas máquinas que necesiten movimiento mecánico y que sean capaces de producirlo con facilidad a través de alguna fuente de energía electromagnética.

- Elementos del motor CC

Los elementos internos fundamentales del motor de corriente continua son los siguientes:

- ❖ estator.
- ❖ Entrehierro.
- ❖ Rotor.
- ❖ Escobillas.

Pero también se componen de elementos exteriores los cuales se pueden apreciar en la Figura 12.



Figura 12. 1) Fuente de alimentación 2) Caja de engranajes reductora 3) Base 4) Carcasa 5) Tapa posterior 6) Piñón de nueve dientes

- Especificaciones

Tabla 6. Especificaciones de operación del motor cc cepillado MY1016

DESCRIPCIÓN	MAGNITUD	UNIDAD
Tensión nominal	12	V
Potencia nominal	250	w
Corriente nominal	13.4	A
Velocidad	2750	rpm
Material	Aluminio	

El motor MY1016Z de la marca Ling Ying cuenta con varias características que le permitir ser adecuado por ejemplo para scooters eléctricos, autos eléctricos pequeños, equipos mecánicos, etc., que pueden satisfacer diferentes necesidades. La Tabla 6 muestra algunas de las especificaciones para poder operar este motor.

3.6.2 Relevador

Es un dispositivo electromagnético inventado por Joseph Henry en 1834 actúa como un interruptor para abrir y cerrar el paso de la corriente funciona gracias a que utiliza un electroimán para mover un mecanismo de conmutación para alimentar a uno o más contactos. Es utilizado donde uno o más circuitos de carga tienen que estar encendidos o apagados por medio de una señal de control.

El relevador está conformado por una bobina y unos contactores que generan un campo electromagnético y de esa manera manejan altos consumos de corrientes con bajas.

- Elementos del relevador

El relevador consta de dos áreas estas se denominan área de control y área de carga. En el área de control se encuentran las terminales 85 y 86 que corresponden al embobinado del relevador que al aplicarles un voltaje positivo y negativo respectivamente generan un campo magnético así como el interruptor se mueva a una dirección, el área de carga maneja la terminal 30 también conocida como terminal común la cual puede ser utilizada como una entrada o una salida y la 87 conocida como la terminal normalmente abierta que al ser energizado el relevador esta hace contacto con la 30. El circuito del área de control maneja siempre un bajo consumo de corriente a diferencia del área de carga la cual maneja siempre altos volúmenes de energía, gracia a esto el relevador se puede conectar a un controlador logrando el control de dispositivos que requieran de un mayor consumo de corriente (véase Figura 13).

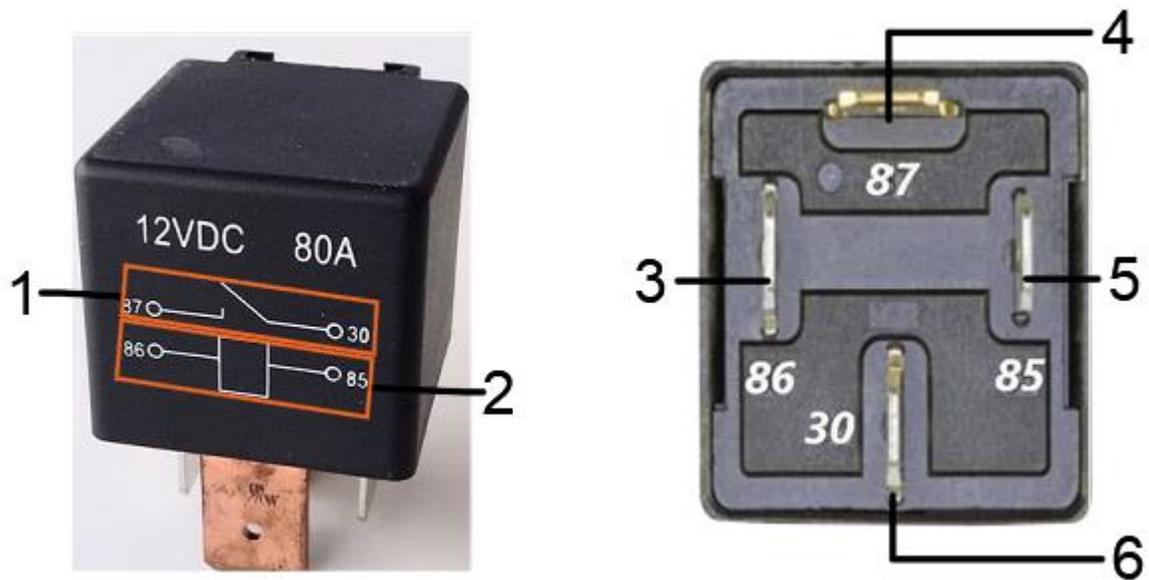


Figura 13.1) 1) Área de carga 2) Área de control 3) Señal interruptor 4) Salida de accesorio 5) Negativo batería 6) Positivo batería

- Especificaciones

Tabla 7. Especificaciones de operación del mini relevador Hella 4 terminales 2-045

DESCRIPCIÓN	MAGNITUD	UNIDAD
Voltaje	12	V
Corriente	80	A
Terminales	4	pins
Temperatura	-40 a 80	°C

En la Tabla 7 se muestra algunas de las especificaciones recomendadas para la operación de este relevador de marca Hella como ejemplo tenemos la tensión nominal suministrada requerida de 12 V que de acuerdo su manual es el ideal para automóviles, maquinaria agrícola y de construcción, etc. Además, este relevador garantiza en su uso en circuitos eléctricos que no existan caídas de voltajes significativas, optimizando el funcionamiento del accesorio o consumidor eléctrico así mismo está equipado con resistencias o diodos en paralelo a la bobina para evitar picos de tensión provocados

3.6.3 Receptor (Flysky Receive)

FS-SRM basado en protocolo ANT es un receptor con dos antenas externas y transmisión bidireccional. Él Emite señal PWM o PPM/i-BUS/S.BUS y tiene un diseño compacto. El diseño del receptor es fácil de Instalar y adaptar multicópteros. es el soporte ideal cuando se utiliza un control remoto Flysky. Este receptor está especialmente diseñado para la instalación y salida de señales PWM.

- Elementos del receptor FS-IA6B

En la Figura 14 se observan algunos de los elementos con los que cuenta el receptor FS-IA6B destacado por tener la capacitado de ampliar su alcance a aproximadamente 1500m apto tanto para un robot como para un dron cabe destacar que para usar el protocolo PWM la interconexión es usando todos los pines a excepción de los pines de IBUS.



Figura 14. 1) puente para brindar o sincronizar a un control remoto 2) Puerto serial RX IBUS 3) VCC de RX IBUS 4) GND de IBUS 5) Conexión del puente Bin 6) Pines VCC 7) Pines GND 8) Puerto PPM con los pines de inferiores se energiza 9) Puerto serial TX IBUS 10) VCC TX IBUS 11) GND TX IBUS 12) Diagrama para ubicar los canales 13) Antena 14) Led indicador de estado

- Especificaciones

Tabla 8. Especificaciones y características del receptor FS-IA6B

DESCRIPCIÓN	MAGNITUD	UNIDAD
Voltaje de alimentación	4-9	v
corriente	2	A
No. De canales	6	
Longitud de antena	26	mm
Alcance	500-1500	m

Como se aprecia en la Tabla 8 este receptor puede soportar como mínimo un voltaje de 4v y máximo de 9 v y cuenta con 6 canales indicando que tiene tres tipos de protocolos de comunicación PWM por canal y dos conexiones seriales la PPM y la IBUS.

3.6.4 Motor a pasos NEMA 17

Un motor a pasos se define como un dispositivo electromecánico cuya función es convertir pulsos electrónicos en movimiento mecánico a través de un eje se distinguen por que tienen una rotación angular discreta lo que significa que cada vez que se mueve el eje lo hace en una cantidad de grados para controlar cualquier movimiento paso a paso con una rotación

Los motores permiten un posicionamiento rentable y de alta precisión sin tener que depender de un sistema codificador.

Los motores paso a paso de B&R se pueden entregar con un sistema codificador opcional. Los codificadores magnéticos que se utilizan son altamente robustos, lo que los convierte en una solución ideal para su uso en entornos hostiles.

- Elementos del motor paso a paso NEMA 17

Es un motor DC sin escobillas que puede ser de imán permanente o reluctancia variable que tiene como desempeño rotar en ambas direcciones moverse sin incrementos regulares precisos, sostener un torque de retención o velocidad cero y controlarse con circuitos digitales es muy útil porque se puede posicionar con precisión sin ningún sensor de retroalimentación por lo que se puede presentar como un controlador de circuito abierto, en la Figura 15 se pueden apreciar algunos de los elementos del motor nema corresponde a la Asociación Nacional de Fabricantes Electrónicos o National Electrical Manufacturers Association. Esta asociación se encarga de realizar estándares industriales aplicados al campo de la electricidad, principalmente encapsulados. En el caso particular, el NEMA 17, hace referencia a un motor a pasos con un encapsulado de 1.7 x 1.7 pulgadas de área transversal. El numero 17 viene de esa área del motor, en donde se requiere que sea estandarizada ya que es de donde se suelen atornillar los motores. La longitud de estos puede variar dependiendo de varios factores como la corriente o el torque

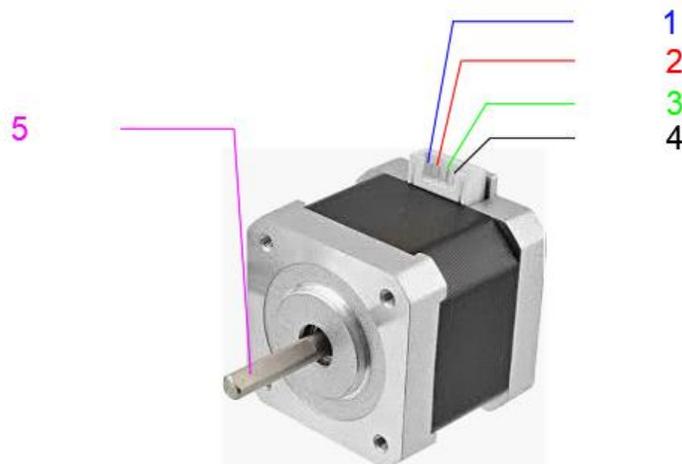


Figura 15. 1) B-, 2) B+, 3) A-, 4) A+, 5) Rotor

- Especificaciones

Tabla 9. Especificaciones y características del motor paso a paso NEMA 17

DESCRIPCIÓN	MAGNITUD	UNIDAD
Voltaje de operación	12	v
Corriente	1.7	A
Resistencia por fase	1.5	Ohms
Inductancia por fase	2.8	Mh
Diámetro del eje	5	mm
Largo del eje	20	mm
pasos por vuelta	200	
montaje	estándar NEMA17	

En Tabla 9 se muestran algunas especificaciones para la operación de este tipo de motor a pasos el cual tiene un desplazamiento de 1.8° por paso lo que significa que para dar una vuelta completa una revolución necesita dar 200 pasos , esta característica permite que estos motores den una precisión y repetividad en cuanto a la posicionamiento se refiere por lo que si sumamos estas dos características y además de que estos motores tiene un alto torque a bajas rpm demuestra la razón por lo que son altamente utilizados en diversas industrias y proyectos.

3.7 Sensores

3.7.1 Encoder rotativo incremental

Es un transductor rotativo que transforma un movimiento angular en una serie de impulsos digitales, consiste en un disco rotativo con un patrón de marcas y espacios que permiten o impiden el paso de la luz, y una ranura fija entre los elementos emisores de luz y los elementos receptores de luz. Por la rotación del eje del encoder, la luz procedente de los elementos emisores de luz pasa a través de estas ranuras, o bien es bloqueada. La luz que pasa se convierte en una señal de corriente por el elemento receptor de luz. Esta señal de corriente envía pulsos de onda cuadrada a través de un circuito conformador de ondas y un circuito de salida.

- Elementos del encoder rotativo incremental

En la siguiente Figura 16 se aprecian algunos de los elementos del encoder rotativo incremental modelo E50S8-5000-3-T-5



Figura 16. 1) Negro: out A 2) Anaranjado: out Z 3) Blanco: out B 4) Café: +V 5) Shield: F.G 6) Azul: 0V 7) Eje 8) Carcasa

- Especificaciones

Tabla 10. Características y especificaciones de encoder rotativo incremental E50S8-5000-3-T-5 por sincronización de flecha

DESCRIPCIÓN	MAGNITUD	UNIDAD
Diámetro exterior del eje	8	mm
Máx. frecuencia de respuesta	300	kHz
Máx. revolución disponible	5000	rpm
Resolución	5000	P/R
Salida de control	Totem pole	
Fuente de alimentación	5	Vcc
± 5% (rizado P-P: máximo 5%)		
Tipo conexión	Tipo de cable axial	
Protección	IP50 (Estándar IEC)	

En la Tabla 10 se muestra algunas de las características con las que cuenta el encoder, cabe mencionar que una salida en "Tótem Pole" es un tipo de circuito electrónico que consiste en dos transistores entre +V y 0V a. Las fases de salida incrementales son la fase A y la fase B, las cuales tienen una diferencia de 90° entre fases, y la fase Z: la fase de referencia cero de acuerdo al manual de usuario.

Los encoders se utilizan ampliamente en controladores numéricos industriales, robots, servomotores y equipos de posicionamiento óptico para detectar con precisión la localización, velocidad de operación y para ofrecer retroalimentación. Los encoders rotativos son aparatos que convierten el ángulo de rotación de un eje en señales (pulsos) eléctricos que se proveen a través de su salida.

3.7.2 Unidad de Medición Inercial (IMU)

Una Unidad de Medida Inercial (IMU) es un sensor de movimiento cuyo objetivo es determinar la orientación de un objeto en relación con un marco de referencia inercial u otro cuerpo. El sensor de movimiento utiliza 3 acelerómetros y 3 Giroscopios que están integrados con un DSP, procesador de señal digital, para producir cabeceo, balanceo, precisión y cargar información en un formato estándar de la industria. Estas medidas son adecuadas para cualquier Operación marítima que requiere determinación de actitud, compensación de movimiento o dinámica. posicionamiento. Los sensores de movimiento SMC proporcionan mediciones de movimiento de alta precisión en todos los ámbitos dinámicos. ambientes.

- Elementos de IMU

Una IMU cuenta con diferentes elementos que la componen como pines, leds, chips, etc. tal como se puede observar en la Figura 17.

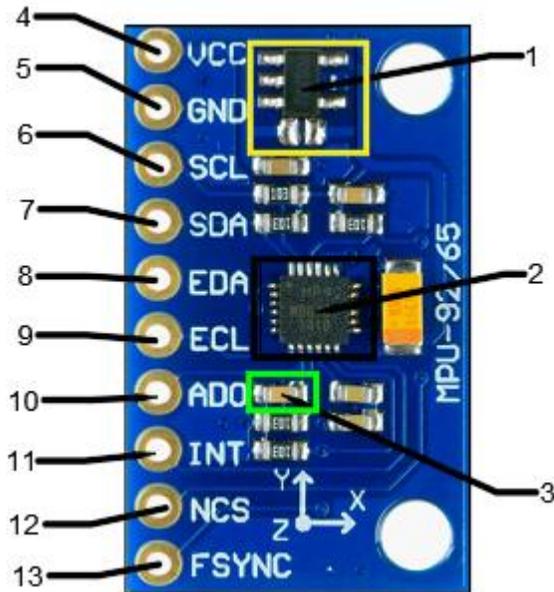


Figura 17. IMU, Sensor MPU-6050: 1) 3.3V Regulator, 2) MPU6050, 3) Power led, 4) VCC, 5) GND, 6 Y 7) I2C Pins, 8) EDA auxiliary, 9) ECL auxiliary, 10) Address select pin, 11) Interrupt Output, 12) NCS, 13) FSYNC

Tabla 11. Especificaciones de la Unidad de Medición Inercial (IMU)

DESCRIPCIÓN	MAGNITUD	UNIDAD
Voltaje de alimentación	2.4 a 3.6	Vdc
Consumo de corriente nominal (giroscopio)	3.2	mA
Consumo de corriente nominal (acelerómetro)	450	μ A
Consumo de corriente nominal (magnetómetro)	280	μ A

En la Tabla 11 se puede observar el voltaje y consumo de corriente de los giroscopios, acelerómetros y magnetómetro. Los sensores de movimiento SMC tienen tres grupos de componentes de medición axial separados que convierten señales de movimientos

reales a través de tres acelerómetros y tres giroscopios en datos de salida de ángulos y actitud. La señal de los giroscopios se combina con la señal de los acelerómetros y se procesado en un filtro Kalman dentro del sensor de movimiento para proporcionar valores de salida para aceleraciones, actitudes y ángulos con influencia limitada del ruido y otras imprecisiones.

3.8 Consumo energético

El consumo energético se entiende como el gasto total de un proceso determinado el cual se mide kWh, en general, es la cantidad de energía utilizada. el concepto de consumo energético está directamente relacionado con la eficiencia energética, ya que, a mayor consumo, menor eficiencia energética.

La mayoría de los robots dedicados a la siembra actualmente laboran a base de baterías, por ejemplo, Voltan actualmente utiliza baterías de ácido plomo con baterías de 13v aproximadamente, a continuación, se realizará la descripción de algunas baterías que se encuentran actualmente en el mercado.

3.9 Baterías

3.9.1 Baterías de ácido-plomo

Una batería básica de 12 V consta de seis celdas individuales conectadas en serie en una carcasa de polipropileno. Cada batería tiene un bloque de batería, que consta de una celda positiva y una celda negativa. Por su parte, el bloque consta de una placa principal (el grupo principal es el material activo) y material aislante microporoso (espaciadores) entre placas de diferentes polaridades. El electrolito es ácido sulfúrico diluido, que penetra en los poros de las placas y separa y llena los espacios abiertos de la celda. Los extremos, las unidades y las superficies a las que están conectados están hechos de superficies. Los nervios conectan las células en una distribución sellada. Se utiliza un proceso de alta temperatura para sellar la cubierta ordinaria de la batería para proporcionar un mejor sellado a la batería. En las baterías tradicionales, cada batería tiene su propia botella de carga. Se utiliza para precargar la batería y

durante la carga se libera gas hidrógeno. La mayoría de las veces, las baterías sin protección están completamente selladas, excepto las rejillas de ventilación y, a veces, las tapas roscadas, pero no están disponibles [13].

Estructura

En la Figura 18 [14] se muestra algunos de los elementos que forman a una batería de ácido plomo.

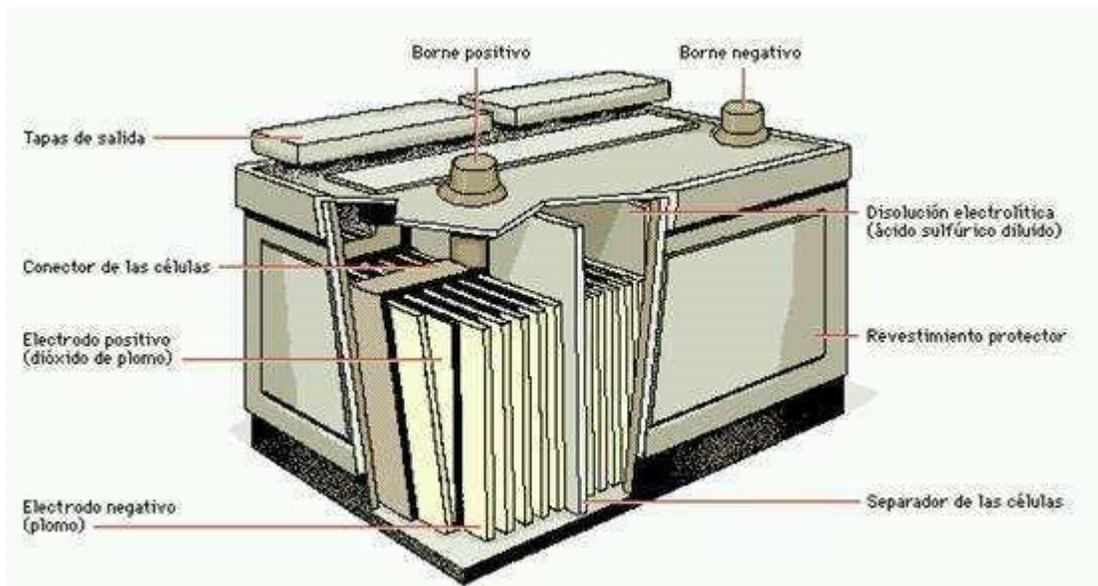


Figura 18. Esquema de una batería de ácido plomo

3.9.2 Batería de litio

La batería de iones de litio es un dispositivo que se utiliza para almacenar energía eléctrica. Los iones de litio se mueven desde el ánodo al cátodo de la batería durante el proceso de flujo y pasan a través del electrolito interno, que también contiene iones de litio. Pertenecen a una familia de baterías recargables muy utilizada que han llamado la atención en los últimos años por su larga vida útil y su alta capacidad [15].

Las baterías de iones de litio son uno de los tipos más avanzados de baterías recargables y se han convertido en la principal fuente de energía móvil para pequeños dispositivos electrónicos como teléfonos móviles y portátiles. Sin embargo, la demanda de baterías de iones de litio con mayor capacidad de descarga y densidad de energía está aumentando rápidamente, especialmente debido a la demanda de vehículos eléctricos. También se espera que estas baterías se utilicen para almacenar energía procedente de fuentes de energía renovables en constante cambio, especialmente la fotovoltaica [16].

Estructura

En la Figura 19 [17] se visualizan los elementos que conforman a una batería de litio.

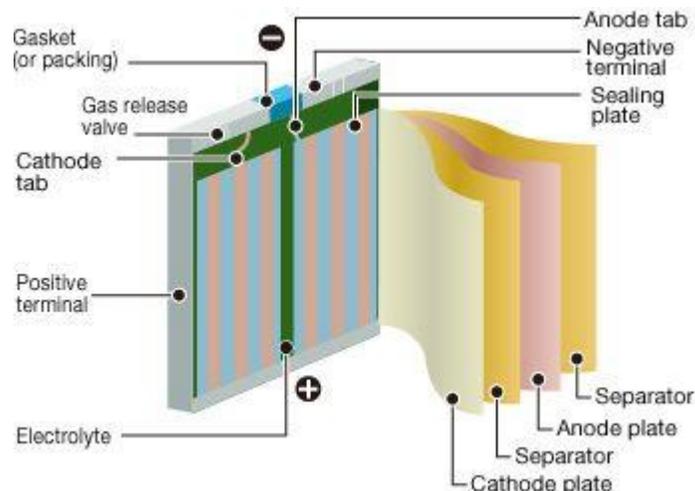


Figura 19. Esquema de una batería de litio

A continuación, en la Figura 20 se muestra una comparación entre las baterías de ion-litio y las de ácido-plomo el cual nos permite observar que existe una gran diferencia de beneficios que aportan las baterías de litio contrario a las de ácido-plomo pero que sin embargo siguen estando entre las más comercializadas gracias sus bajos costos y a su antigüedad no obstante en esta tesis se busca impulsar el uso de la batería de litio para Voltan ya que estás de acuerdo a sus características le permitirían laborar durante un periodo de tiempo más prolongado.

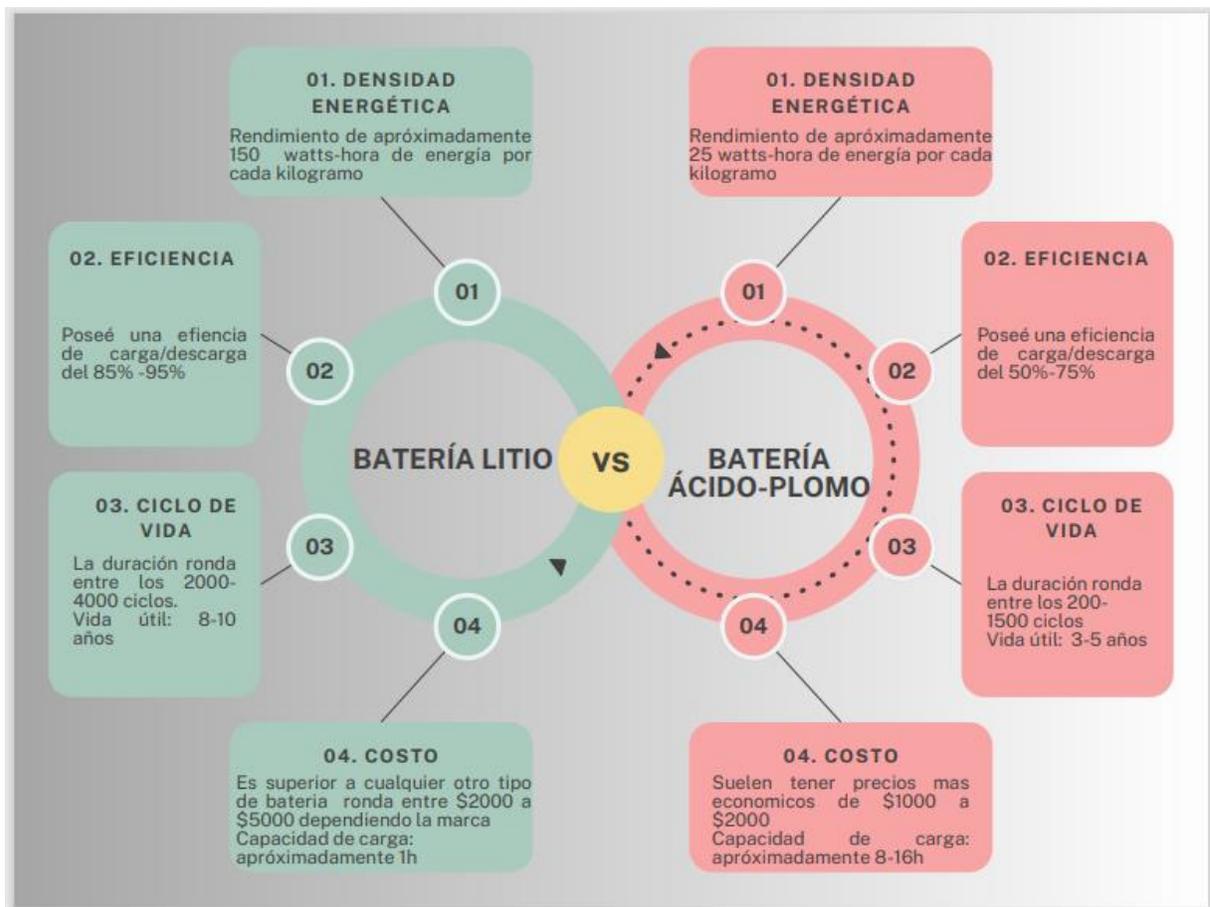


Figura 20. Cuadro comparativo entre las baterías de litio y las de ácido-plomo

Si bien las baterías de litio son una gran opción para eficientar el robot también existe otras maneras de suministrarle energía y prolongar su rendimiento que, aunque no puedan generar grandes cantidades de energía si pueden ser almacenadas y ocupadas como fuentes de energía auxiliar, estas actualmente son conocidas como energy harvesting o recolección de energía.

3.10 Autosuficiencia energética y recolección de energía

De acuerdo a Cruz Acero y Esteve, (2012) “el término energy harvesting se refiere al proceso por el cual se aprovecha la energía residual presente en el ambiente para producir energía eléctrica que puede ser almacenada o utilizada para alimentar pequeños dispositivos eléctricos o electrónicos de bajo consumo o de baja potencia, como los utilizados en ordenadores, aparatos electrónicos portátiles (teléfonos móviles, reproductores mp3, etc.) y en redes de sensores inalámbricos. Por tanto, se aprovechan los distintos tipos de energía del entorno para alimentar sistemas que pueden ser autónomos e inalámbricos”. En general alude a la importancia de aprovechar la energía ambiental es decir aquella que se encuentra disipada en el entorno la cual pueda ser transformada en energía aprovechable.

El impacto del desarrollo de tecnologías inalámbricas en el uso de pilas o baterías para alimentar dispositivos electrónicos ha logrado que surjan las tecnologías de recolección de energía (energy harvesting) como alternativa, a continuación, se menciona el por qué son necesarias, como consiguen ayudar, sus ventajas y en donde pueden ser aplicadas.

Aumento del uso de pilas o baterías: El avance de las tecnologías inalámbricas ha llevado a un mayor uso de pilas o baterías para alimentar dispositivos electrónicos que funcionan de manera inalámbrica, como dispositivos IoT (Internet de las cosas), sensores, etc.

Limitaciones de las baterías: Las baterías tienen limitaciones importantes. Son costosas, contaminantes y tienen una vida útil limitada, lo que significa que necesitan ser reemplazadas regularmente.

Energy harvesting como alternativa: Las tecnologías de energy harvesting ofrecen una alternativa a las baterías. Estas tecnologías permiten recolectar energía del entorno (por ejemplo, energía solar, vibraciones mecánicas, energía térmica, etc.) y almacenarla en condensadores.

Recarga de baterías: La energía recolectada mediante energy harvesting puede ser utilizada para recargar las baterías de los dispositivos, lo que aumenta su vida útil y su autonomía energética.

Autonomía prácticamente ilimitada: La ventaja principal de estas tecnologías es que ofrecen la posibilidad de que los sistemas que las incorporan tengan una autonomía prácticamente ilimitada siempre y cuando puedan seguir recolectando energía del ambiente. Esto elimina la necesidad de conectar los dispositivos a la red eléctrica o de reemplazar las baterías.

Aplicaciones en lugares de difícil acceso: Energy harvesting también se presenta como una solución válida para alimentar sensores u otros dispositivos ubicados en lugares de difícil acceso donde la conexión a la red eléctrica o el reemplazo de baterías sería complicado o costoso [18].

La energy harvesting actualmente está generando gran interés en diferentes campos de investigación sobre todo en el estudio de las energías renovables, por su versatilidad para la obtención de energía limpia a través de fenómenos cotidianos, este proceso tiene dos maneras de ser aprovechado tal como se muestra en la Figura 21 [19].

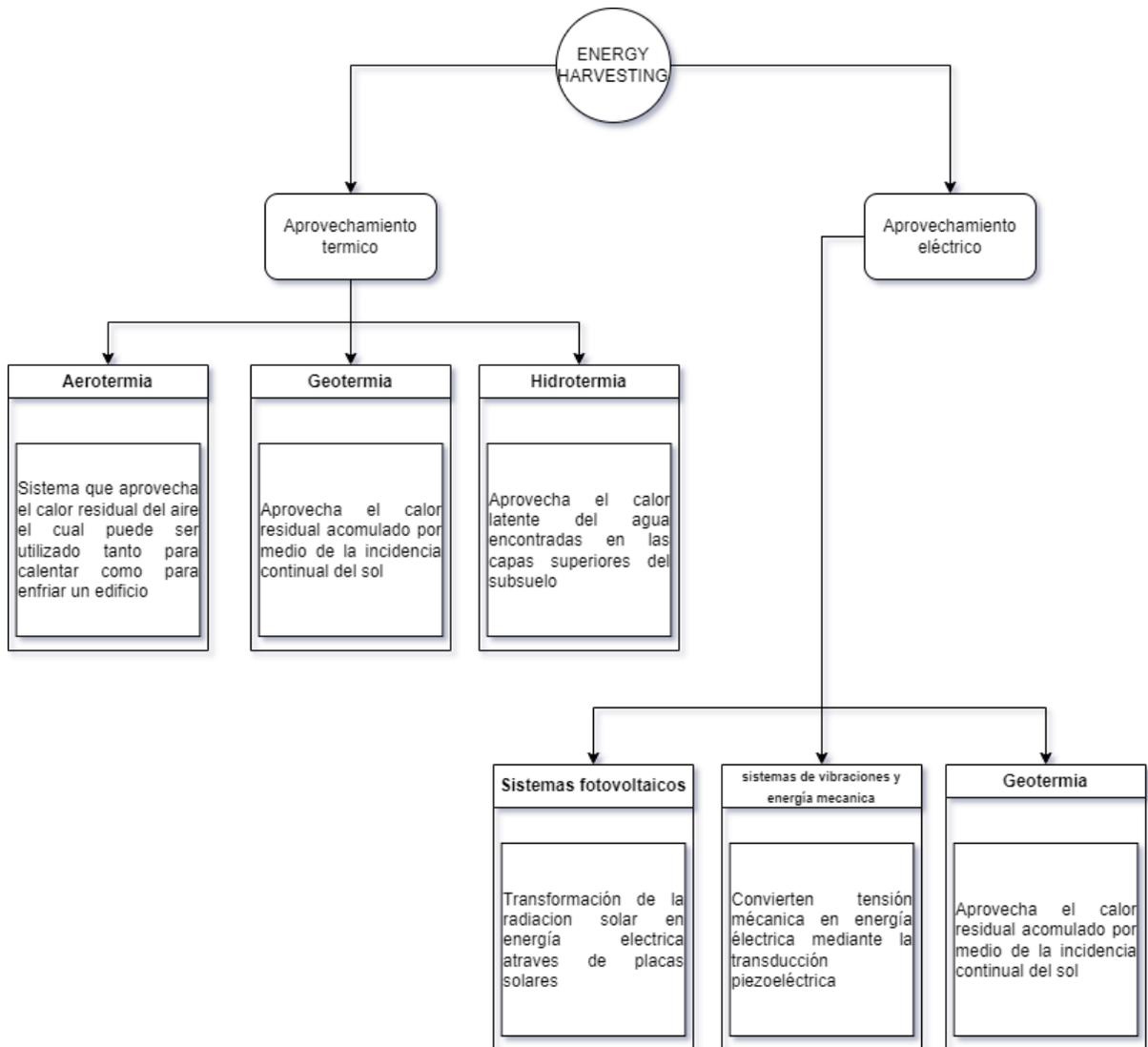


Figura 21. Diagrama de las áreas en donde puede ser recolectada esta energía

De los campos en donde es aplicada este tipo de energía, la obtenida por los dispositivos piezoeléctricos y la fotovoltaica son los más viables para su inserción en el robot ya que figuran entre los que más pueden recolectar energía del entorno de este, por ejemplo aprovechar las vibraciones que presenta cuando realiza sus labores de siembra o el movimiento de sus ruedas en donde podrían ser acoplados los dispositivos piezoeléctricos y en cuanto a la solar, está el uso de módulos solares para suministrar de energía a una batería auxiliar mientras este en campo.

Dado que se busca que el robot sea autónomo es necesario implementarle un sistema fotovoltaico de igual forma autónomo, por lo que su estudio resulta imprescindible.

3.11 Sistema fotovoltaico autónomo

Un Sistema Fotovoltaico Autónomo (SFA) es aquel que no dispone de conexión alguna con la red general de distribución eléctrica. Es decir, un sistema de generación de energía eléctrica que utiliza módulos solares para convertir la energía solar en electricidad, y que opera de forma independiente de la red eléctrica convencional. Este tipo de sistema se caracteriza por no depender de una conexión externa a la red eléctrica y, en su lugar, utiliza baterías u otros dispositivos de almacenamiento de energía para almacenar la electricidad generada durante el día para su uso durante la noche o en momentos de baja radiación solar [20].

En resumen, un sistema fotovoltaico autónomo es capaz de generar, almacenar y suministrar energía eléctrica de manera independiente, lo que lo hace especialmente útil en áreas remotas donde no hay acceso a la red eléctrica o en aplicaciones donde se requiere una fuente de energía independiente y sostenible.

Interconexión de un sistema fotovoltaico autónomo

Paneles Solares (Módulos Solares): Los paneles solares son la parte fundamental del sistema. Estos paneles están compuestos por células fotovoltaicas que convierten la luz solar en electricidad [21].

Soporte e Instalación: Los paneles solares se instalan típicamente en techos o en estructuras de montaje en tierra, orientados hacia el sur (en el hemisferio norte) para maximizar la exposición solar [22].

Cableado Solar: Se conectan cables desde los paneles solares a un dispositivo llamado controlador de carga. Este controlador regula el flujo de energía solar hacia las baterías para evitar sobrecargas o descargas excesivas. El regulador de carga supervisa constantemente el estado de carga de las baterías y ajusta la corriente que

fluye hacia ellas según sea necesario, lo que prolonga su vida útil y asegura un rendimiento óptimo del sistema solar [23].

Baterías: La energía solar generada durante el día se almacena en baterías para su uso durante la noche o en días nublados. Las baterías son esenciales para los sistemas fotovoltaicos autónomos, ya que proporcionan energía cuando no hay luz solar disponible [13].

Inversor: Prados García Federico and Vico Romero David (2002) mencionan que algunos sistemas también pueden incluir un inversor, que convierte la corriente continua (CC) de las baterías en corriente alterna (CA) utilizada en la mayoría de los hogares y dispositivos eléctricos.

Carga: Los dispositivos eléctricos se conectan al sistema para consumir la energía almacenada en las baterías cuando sea necesario. Es importante dimensionar correctamente el sistema para satisfacer las demandas de energía de los dispositivos conectados.

Seguridad y Protección: Asimismo Federico y David agregan que se deben incluir dispositivos de protección contra sobrecargas, cortocircuitos y otros problemas eléctricos para garantizar un funcionamiento seguro y confiable del sistema.

Monitorización y Mantenimiento: Se pueden agregar dispositivos de monitorización para supervisar el rendimiento del sistema y asegurar su mantenimiento adecuado. Esto puede incluir la medición de la producción de energía, el estado de carga de las baterías y la detección de posibles problemas [24].

Las Figura 22Figura 23 muestran los diagramas de interconexión de corriente directa y alterna.

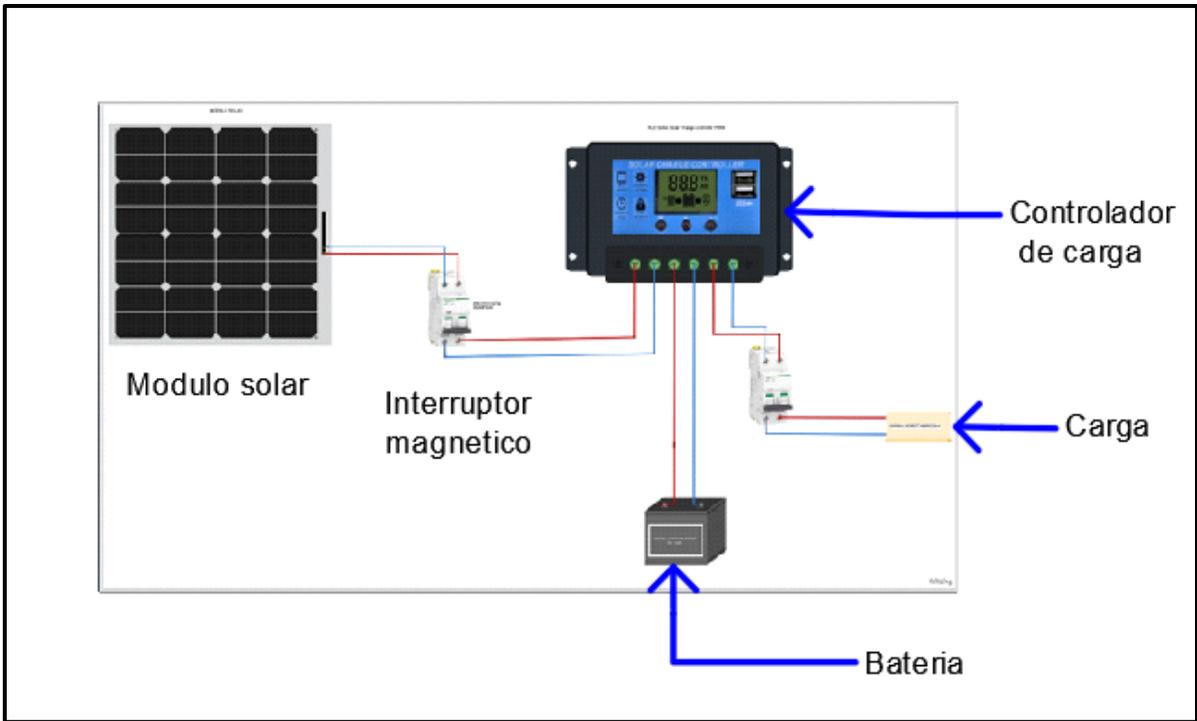


Figura 22. Diagrama de la interconexión de un sistema autónomo a DC

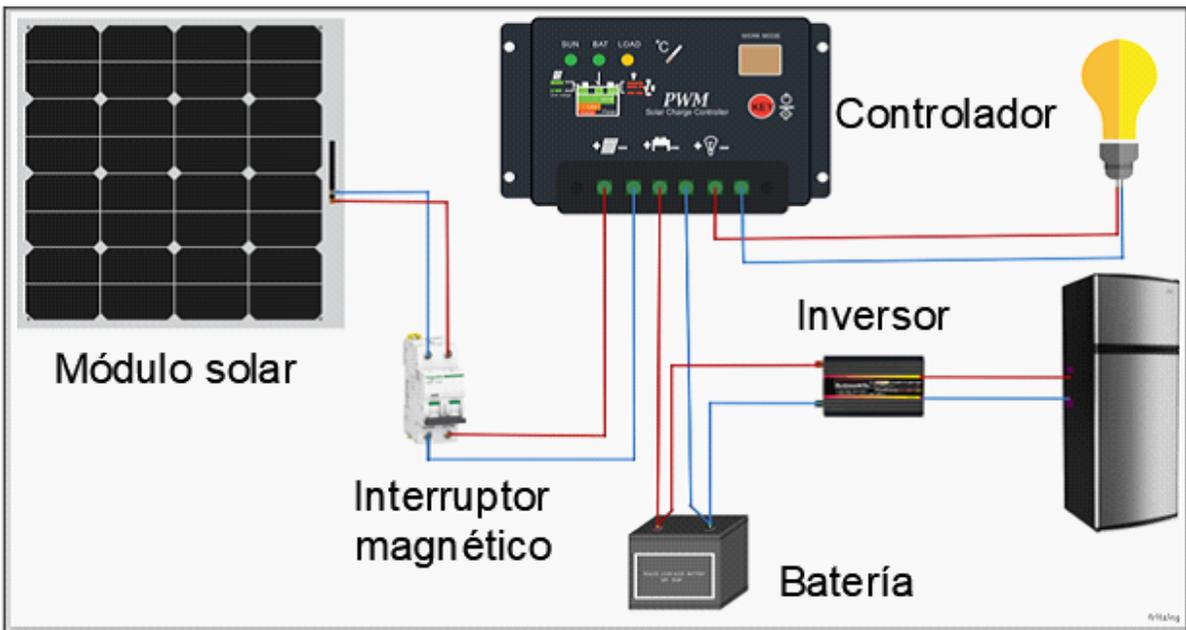


Figura 23. Diagrama de la interconexión de un sistema autónomo a CA

3.12 Celdas de perovskita

El perovskita es un tipo de material compuesto inorgánico con una estructura cristalina específica que sigue el patrón del perovskita natural, un mineral descubierto por primera vez en los Urales en 1839 y nombrado en honor al mineralogista ruso Lev Perovski.[25]

Los perovskitas han ganado mucha atención en los últimos años debido a su prometedor potencial en diversas aplicaciones, especialmente en tecnología fotovoltaica para la generación de energía solar. Los dispositivos fotovoltaicos basados en perovskitas han mostrado eficiencias de conversión de energía muy altas y se consideran una alternativa prometedora a los materiales semiconductores tradicionales utilizados en las células solares [26].

Además de su uso en células solares, los perovskitas también tienen aplicaciones en campos como la catálisis, la electrónica, los sensores, las celdas de combustible y más, gracias a sus propiedades únicas y versátiles. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la investigación sobre perovskitas está en curso y aún hay desafíos técnicos que deben abordarse para su implementación a gran escala en diversas tecnologías [27].

Estructura

El rendimiento fotovoltaico de las placas solares de perovskita se debe a propiedades como alta absorción de luz, banda prohibida ajustable y movilidad de portadores. Las perovskitas híbridas orgánico-inorgánicas (OHIP) son prometedoras para celdas solares eficientes. En la década de 1990, Mitzi y sus colegas demostraron su uso en dispositivos electrónicos. Las perovskitas OHIP tienen una fórmula química específica (ABX_3), con A siendo un catión orgánico, B un catión inorgánico y X un ion haluro, y poseen propiedades ópticas y eléctricas únicas. En una celda solar de perovskita típica, la capa absorbente (por ejemplo, $CH_3NH_3PbX_3$) genera portadores de carga libres en los materiales de transporte de electrones y huecos. Los electrones viajan al cátodo a través de la película mesoporosa y el circuito externo. La restauración de los materiales oxidados en la sección del transportador de huecos (HTM) ayuda a alcanzar

el estado fundamental. La corriente se genera cuando el agujero en el HTM se difunde hacia los electrodos y se recombina con el electrón. La generación de corriente depende del espesor del material de perovskita [28]. Los niveles de energía y el proceso de transferencia de carga de las células solares de perovskita se muestran en la Figura 24.

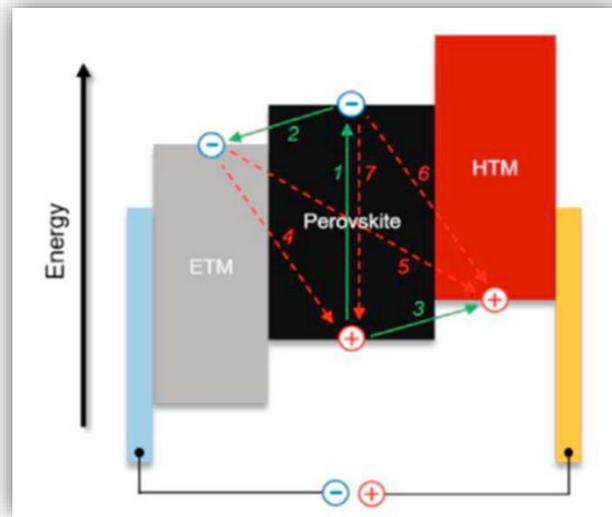


Figura 24. Los niveles de energía y el proceso de transferencia de carga de las celdas solares de perovskita [29].

En 2009, Miyasaka y sus colegas presentaron las primeras células solares utilizando materiales de perovskita, logrando un rendimiento del 3,81%. Desde entonces, se han realizado investigaciones que destacan a los materiales orgánico-inorgánicos perovskita (OHIP) como prometedores para la energía solar debido a su disponibilidad y métodos de preparación simples [28].

Suresh y Chandra mencionan que se han registrado avances significativos, alcanzando mejoras en la eficiencia de conversión de energía (PCE) hasta el 23,3%. En estos avances, la capa de transporte de electrones (ETL) es esencial, y se han propuesto varios materiales, incluyendo nanhojas de metales de transición como el MoS₂, que ofrecen rápida transportación y capacidad de transporte de carga. Para la capa de transporte de electrones, se consideran prometedores el ZnO y ZnSnO (MZO)

debido a su estabilidad y movilidad de electrones, mostrando una excelente estabilidad y rendimiento mejorado en comparación con el TiO_2 tradicionalmente utilizado. El dopaje con litio también ha mejorado la conductividad y el rendimiento de películas de TiO_2 como ETL [30].

En resumen, diversas investigaciones han demostrado el potencial de varios materiales dopados y modificados para mejorar el rendimiento y la estabilidad de las celdas solares de perovskita. La Figura 25 muestra la representación esquemática de la perovskita basada en c-TiO_2 celdas solares.

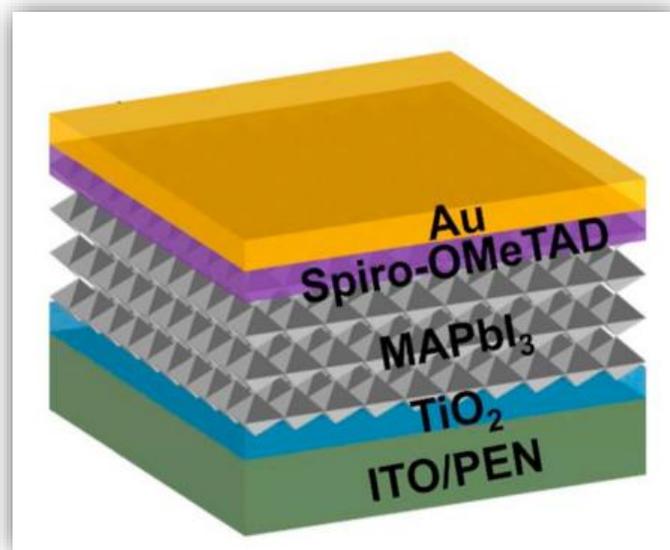


Figura 25. Representación esquemática de celdas solares de perovskita basadas en c-TiO_2 [31]

El método de capa de interfaz multifuncional (MFIL), introducido por Hu et al., es una nueva estrategia para mejorar las celdas solares de perovskita invertida. En el enfoque MFIL, diferentes partes de la celda desempeñan múltiples funciones, como transporte de electrones, mejora de la fotocorriente infrarroja, barrera contra la humedad, supresión de la migración de iones y pasivación de trampas. Estas funciones combinadas contribuyen a una mayor eficiencia del dispositivo y a una estabilidad a largo plazo. En resumen, el MFIL es una técnica innovadora que optimiza múltiples aspectos de la celda solar de perovskita invertida para lograr un rendimiento mejorado

y una mayor durabilidad. La Figura 26 representa el dispositivo basado en MFIL con todos los roles integrados de todas las capas.

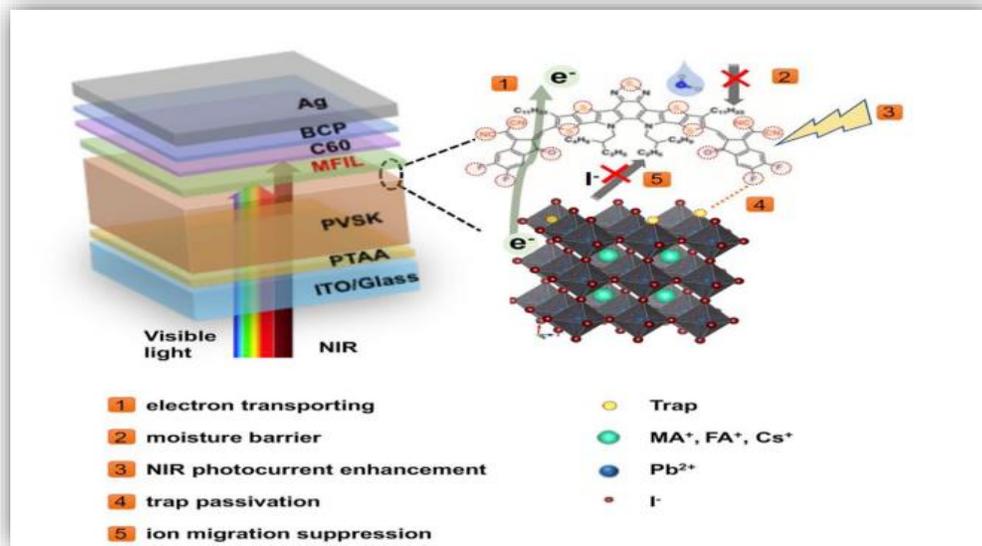


Figura 26. Capa de interfaz multifuncional con roles integrados de todas las capas [32].

Los investigadores están explorando celdas solares en tándem (sobre celdas solares basadas en perovskita/perovskita, perovskita/silicio cristalino) para mejorar la eficiencia de las celdas solares de perovskita [33]. Las celdas en tándem, especialmente las de dos terminales, han recibido mayor atención debido a su alto potencial de eficiencia y ventajas como compatibilidad con tecnologías existentes y bajos costos de fabricación [34].

Para abordar los defectos en los materiales de perovskita, se utilizan técnicas como la espectroscopia de nivel profundo transitorio (DLTS) para investigar el movimiento de iones y caracterizar los defectos. Además, se han desarrollado perovskitas bidimensionales (2D) para mejorar la estabilidad, y las celdas solares de perovskita 2D/3D muestran eficiencias del 20% o más. En conjunto, estas investigaciones abren nuevas vías para mejorar la eficiencia y la estabilidad de las celdas solares de

perovskita en tándem [35]. La Figura 27 ilustra la representación esquemática del dispositivo de perovskita 2D/3D preparado.

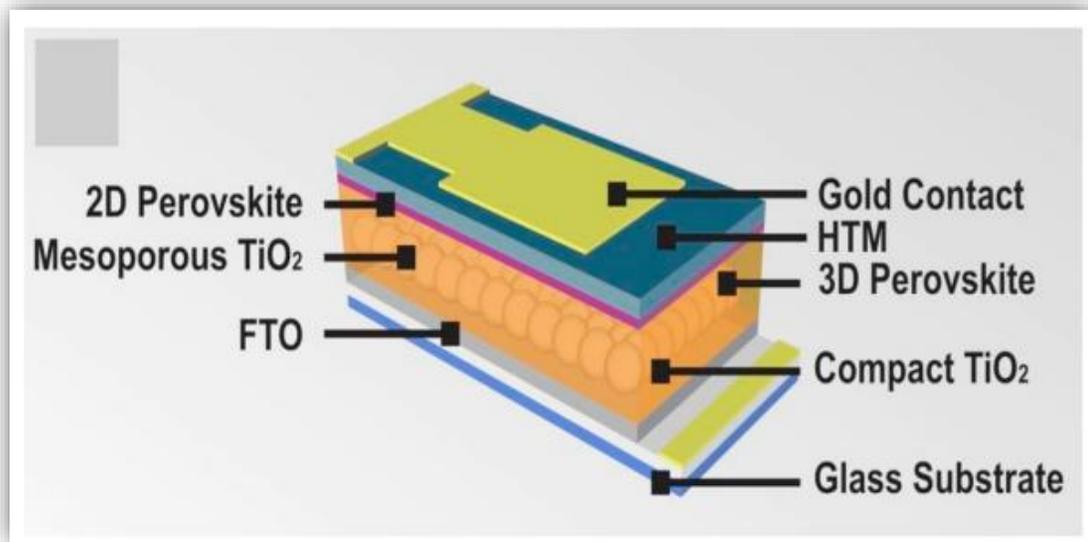


Figura 27. Representación esquemática del dispositivo de perovskita 2D/3D [36]

En la Figura 28 se representa una comparativa entre los módulos a base de perovskita en comparación a los módulos de silicio monocristalino.

Entre algunos de los aspectos que se resaltan se encuentra su eficiencia de perovskita [37] y del monocristalino [38], costo de producción [39] así como su peso y vida útil.

Es importante destacar que los datos mencionados sobre los módulos de perovskita son estimaciones, ya que aún se encuentran en proceso de investigación debido a su inestabilidad ante el aumento de las temperaturas y su vulnerabilidad a la humedad. La combinación de ambos factores puede ocasionar la descomposición de las celdas solares. Este problema resulta crítico para un producto que debe tener una vida útil de dos o tres décadas en exteriores, un requisito necesario para la venta de paneles solares en Estados Unidos y Europa, donde se exige una garantía de 25 años. En otras palabras, esto implica que la celda solar debe mantener al menos el 80% de su rendimiento original después de transcurridos 25 años [40].

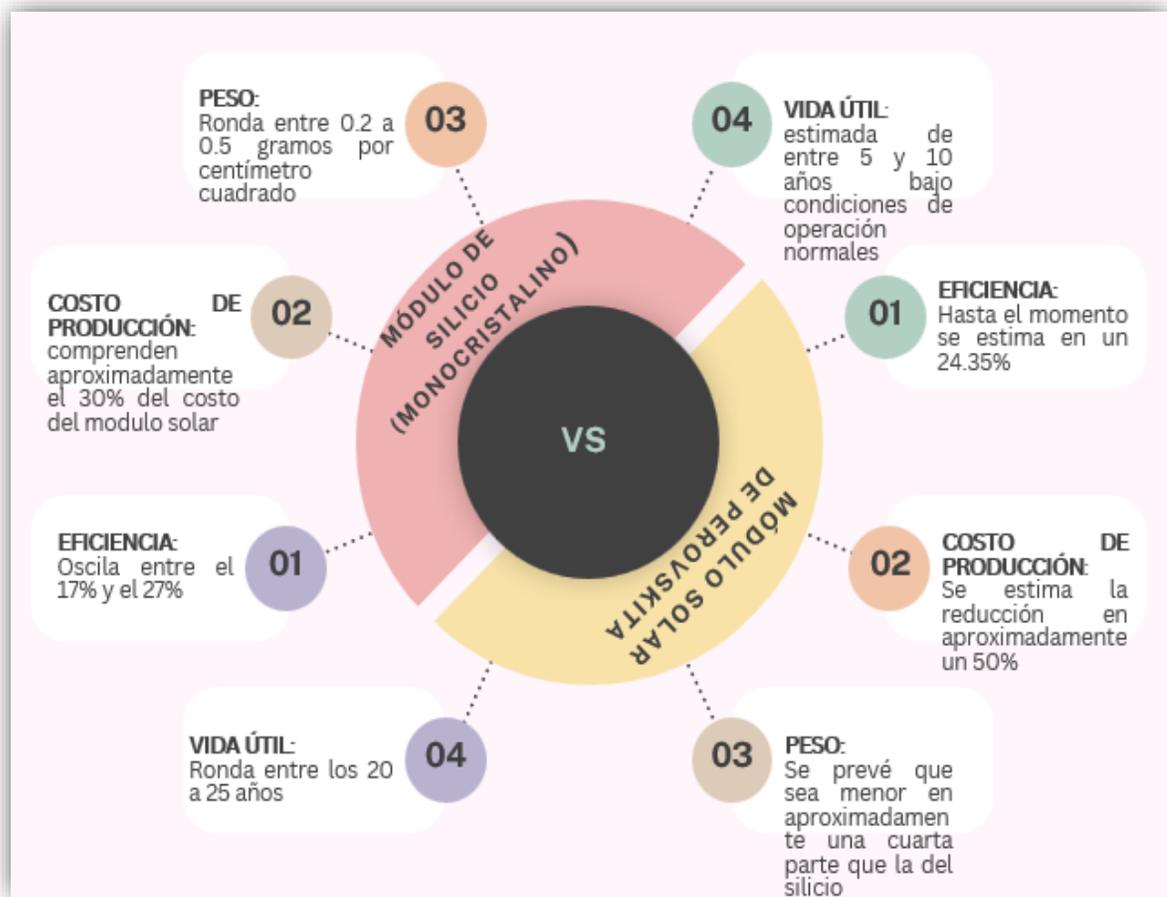


Figura 28. Cuadro comparativo entre los módulos solares de perovskita y los monocristalino de silicio

En la actualidad, los módulos solares en tándem de perovskita y silicio han despertado un gran interés debido a un notable aumento en su eficiencia. Estos módulos combinados tienen la capacidad de absorber un espectro solar más amplio en comparación con los materiales utilizados de manera independiente. Esta sinergia entre el perovskita y el silicio ha generado un considerable entusiasmo en la comunidad científica y en la industria solar [41].

Además, la empresa china LONGi ha alcanzado un nuevo récord del 33,9%. Este hito es especialmente significativo para las celdas solares de silicio y perovskita, ya que supera el límite teórico de eficiencia de las celdas solares de unión única, las cuales son las más comúnmente utilizadas [42].

La Figura 29 muestra algunas proyecciones que tienen algunas empresas para poder producir y comercializar los módulos solares tándem [43].

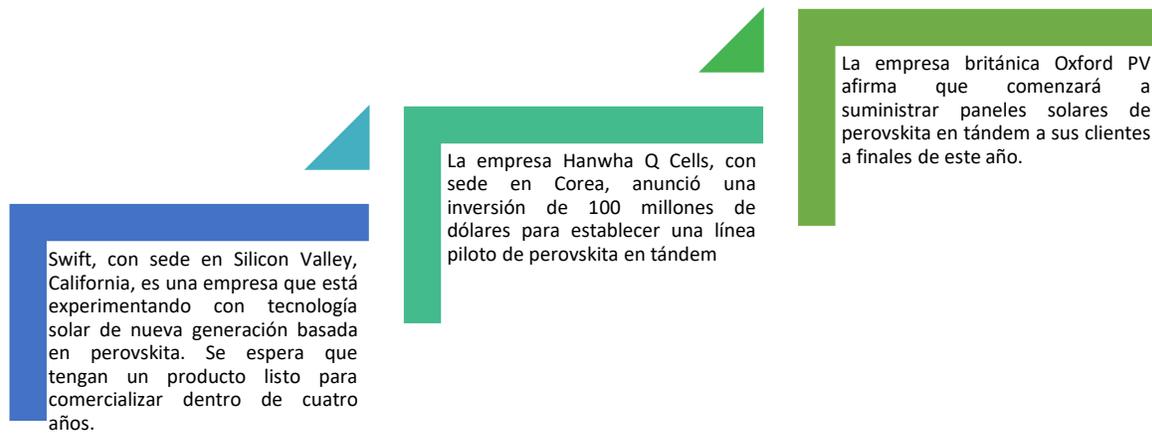


Figura 29. Proyecciones que tienen algunas empresas para la comercialización de los módulos solares tándem.

4. Planteamiento del problema

La creciente demanda que tiene el subsector agrícola ha generado la preocupación de los gobiernos y agricultores de diversos países entre los cuales se encuentra el nuestro (México), por lo que la han visto la necesidad de introducir e implementar nuevas tecnologías (principalmente en la siembra) que tengan la capacidad de brindar la obtención de estos recursos de manera rápida, efectiva y sin provocar daños a la tierra.

Sin embargo, aunque el avance tecnológico en la agricultura ha traído muchos beneficios a nivel mundial su sostenibilidad energética se ha visto limitada, sobre todo en países menos desarrollados debido a la escasez de recursos económicos y tecnológicos.

En México la escasez de alimento agrícola va en aumento debido a que su contribución en el Producto Interno Bruto (PIB) ha disminuido, algunas de las razones son la migración de jóvenes a las ciudades, un mercado más globalizado y una demanda de producción más intensiva y competitiva por el crecimiento de la población generando presiones ambientales, problemas de sustentabilidad a largo plazo y que la agricultura ha dejado de ser la fuente principal de ingresos para la mayoría de los hogares rurales, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria del país a futuro [44]. Por lo que es necesario la inserción de nuevas tecnologías en la agricultura mexicana, actualmente como ya se hizo mención anteriormente en la UACH se está desarrollo el robot agrícola Voltan el cual busca contribuir a reducir esta problemática, sin embargo, se ha visto condicionado en sus labores por la falta de abastecimiento energético que presentan las baterías (acido-plomo) utilizadas por su bajo costo a diferencia de otras, no obstante tienen una vida útil más corta, menor densidad de energía y tiempo de carga más lentos además de ser pesadas y voluminosas lo que las hace menos ideales para aplicaciones portátiles [45].

Además, está el acuerdo aprobado en París sobre Cambio Climático del cual México es participe [46] en donde se comprometió junto a 193 países más la Unión Europea a reducir sustancialmente las emisiones de gases de efecto invernadero para limitar el

aumento de la temperatura global en este siglo a 2 °C o incluso a tan solo el 1.5, revisar los compromisos de los países cada cinco años entre otros objetivos [47].

Por lo que se estima que el año 2023 se realice la primera evaluación de los avances del cumplimiento de lo acordado, por lo que la inclusión de las nuevas tecnologías con innovación sostenible y amigable con el medio ambiente es de suma importancia.

4.1 Justificación

La agricultura es una actividad esencial para la supervivencia de la humanidad entre sus labores fundamentales se encuentra la siembra, la fertilización y la eliminación de plagas y malezas, sin embargo, llevarlas a cabo ha sido un verdadero reto para los agricultores una de las razones principales la menciona el secretario de Agricultura y Desarrollo Rural, Víctor Villalobos Arámbula “El sector primario, al igual que otros, tiene que reconocer que se deben hacer cambios, no podemos resolver problemas nuevos con herramientas viejas, puesto que es necesario alcanzar un campo más productivo con lo que se tiene disponible” [48] dando a entender así lo importante que la incursión de nuevas tecnologías autónomas que permitan alcanzar una agricultura más sustentable.

Dado que nos encontramos en una transición energética la implementación de las energías renovables en las nuevas tecnologías marcan un ímpetu en su desarrollo sobre todo en su autonomía, ya que en una gran mayoría de zonas rurales sobre todo en campos destinados para la agricultura es difícil tener acceso al suministro de la energía eléctrica siendo un impedimento la carga de las baterías que son lo que la mayoría de tecnologías como los robots agrícolas ocupan, además, de que este tipo de energía no es amigable con el medio ambiente como lo son las energías renovables que además de ser respetuosas con el planeta son viables y prácticas para su implementación en este tipo de tecnologías que requieren estar energizándose para poder laborar en terrenos de difícil acceso y sin la necesidad de ser operadas por el hombre.

Debido a la limitación de la sostenibilidad energética del robot Voltan la presente tesis pretende por medio de una investigación teórica y práctica determinar su consumo energético de control y potencia para determinar la viabilidad de la integración de energía fotovoltaica como fuente de alimentación auxiliar.

Para lograr los objetivos se pretende llevar una bitácora de las pruebas realizadas en donde se muestre los consumos que tiene cada controlador, los motores y el

implemento de la sembradora todo a su máxima capacidad y con un peso propuesto para la simulación de un módulo fotovoltaico.

Por lo que se considera necesario que además de las pruebas realizar diferentes cálculos teóricos y simulaciones para el análisis de consumo energético del robot ya que uno de los principales propósitos que tiene el robot es trabajar autónomamente sin embargo esto ha resultado ser un verdadero reto ya que la durabilidad de las baterías en campo es muy reducida haciendo que tenga que ser operado manualmente y ser energizado por un tiempo prolongado, de manera que con la presente tesis se busca reducir el consumo mediante proponer el cambio de algunos componentes, la implementación de (un módulo solar tándem o un sistema fotovoltaico autónomo con más módulos que sean capaz de cargar a una batería auxiliar en un periodo de tiempo determinado).

5. Hipótesis

Considerando el contexto actual de una transición energética hacia fuentes renovables y el continuo aumento en la demanda de productos agrícolas, se plantea la hipótesis de que la implementación de un sistema fotovoltaico autónomo en el robot agrícola Voltan podría representar una fuente de energía auxiliar para incrementar su eficiencia. Se espera que la implementación de esta tecnología permita una gestión más eficiente y sostenible de la energía utilizada por el robot durante sus operaciones agrícolas.

La hipótesis se basa en la premisa de que la energía solar, como recurso renovable y disponible en abundancia, podría satisfacer las demandas energéticas del robot de manera efectiva. Se espera que la integración de un sistema fotovoltaico autónomo no solo reduzca la dependencia de fuentes de energía convencionales, sino que también contribuya a la reducción de costos operativos y emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con el uso de combustibles fósiles.

Además, se espera que el análisis detallado del consumo energético del robot, junto con la evaluación de los factores que influyen en dicho consumo, proporcione información valiosa para comprender las causas subyacentes de cualquier aumento en el consumo energético. Esto, a su vez, podría conducir a la identificación de estrategias efectivas para mitigar estos incrementos y optimizar el rendimiento general del robot.

En resumen, se anticipa que la integración de un sistema fotovoltaico autónomo con un módulo o más módulos tándem en el robot agrícola Voltan no solo representaría un avance significativo hacia la sostenibilidad energética en la agricultura, sino que también podría servir como modelo para futuros desarrollos tecnológicos en este campo, contribuyendo así al progreso hacia una agricultura más eficiente, sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

6. Objetivos

6.1 Objetivo general

Analizar el consumo energético del robot agrícola Voltan con implemento de sembradora para la determinación del uso de energía fotovoltaica como fuente auxiliar de alimentación.

6.2 Objetivos específicos

- ✚ Definir cada característica de los dispositivos eléctricos con los que cuenta el robot.
- ✚ Calcular consumo energético de robot con su implante sembrador.
- ✚ Examinar el rendimiento de las baterías utilizadas, ácido -plomo y litio.
- ✚ Evaluar el consumo energético con el suministrado por una fuente de energía fotovoltaica.
- ✚ Determinar si es viable la implementación de celdas solares sobre el robot para el suministro de energía auxiliar.

7. Metodología

En la Figura 30 muestra un diagrama detallado que ilustra el funcionamiento de los elementos de control y potencia que conforman el robot. El propósito principal de este diagrama es ofrecer una comprensión clara de cómo opera el robot. Por ejemplo, revela que el robot cuenta con cuatro Arduinos Megas, cada uno desempeñando un papel específico:

- El Arduino Uno controla el receptor FS-IA6B y el driver Sabertooth, que a su vez dirige el interruptor. Además, gestiona dos relevadores que activan los motores y se alimenta de la batería de 12V.
- Los Arduinos Dos y Tres se encargan del funcionamiento de los encoders del robot.
- Finalmente, el Arduino Cuatro se dedica al manejo de la IMU (Unidad de Medición Inercial).

Esta desglosada distribución de funciones entre los Arduinos Megas es esencial para el correcto funcionamiento y coordinación de las diversas capacidades del robot.

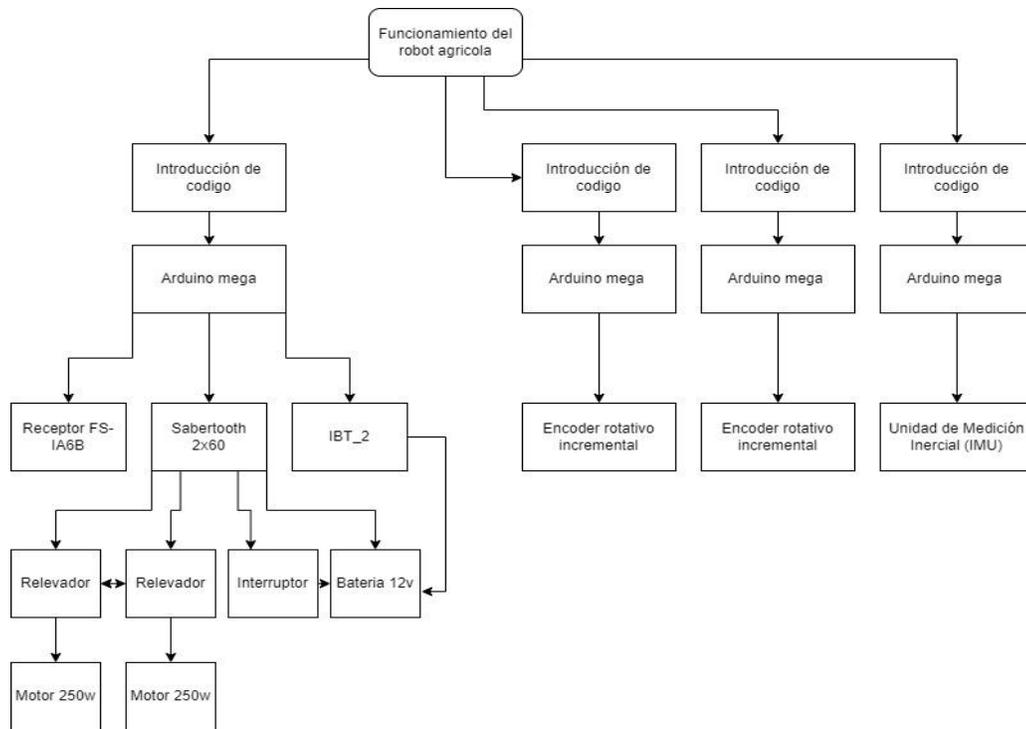


Figura 30. Diagrama descriptivo del funcionamiento del robot agrícola Voltan

La Figura 31 ilustra la interconexión de los elementos del robot en donde se visualiza los cables de alimentación y de señal para los diferentes componentes.

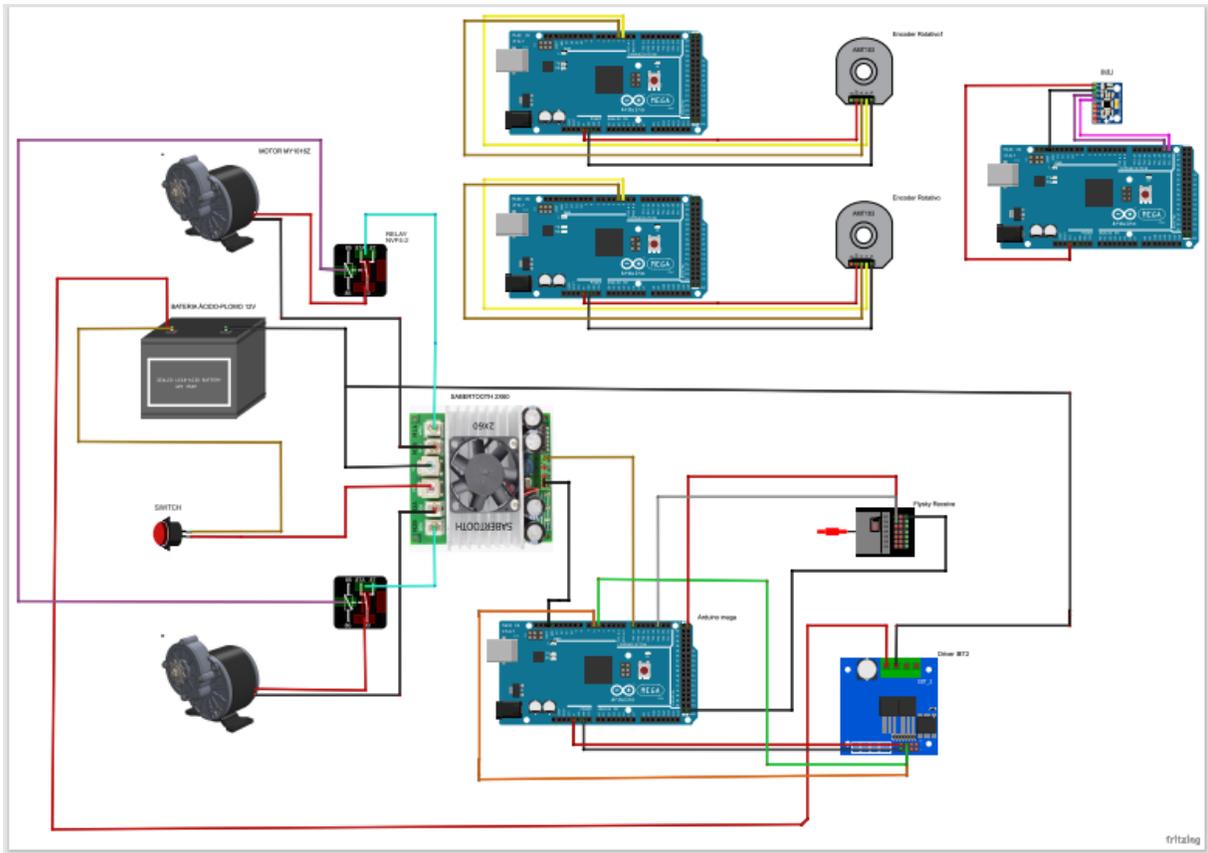


Figura 31. Diagrama visual de la interconexión del robot agrícola Voltan

Además, considerando que el propósito principal de esta tesis es analizar el consumo energético del robot junto con su implemento, la sembradora, la Figura 32 ilustra el funcionamiento de esta última. Para lograrlo, se implementará un código específico que se adapte a las necesidades del agricultor. Es importante destacar que este código permitirá al agricultor seleccionar la cantidad de semillas que desea sembrar. Este proceso se lleva a cabo utilizando un único Arduino Mega, que controla tanto el encoder incremental como el controlador TB6600. Este último es responsable de activar el motor NEMA 17, y para su funcionamiento, se alimenta con una batería de 12V

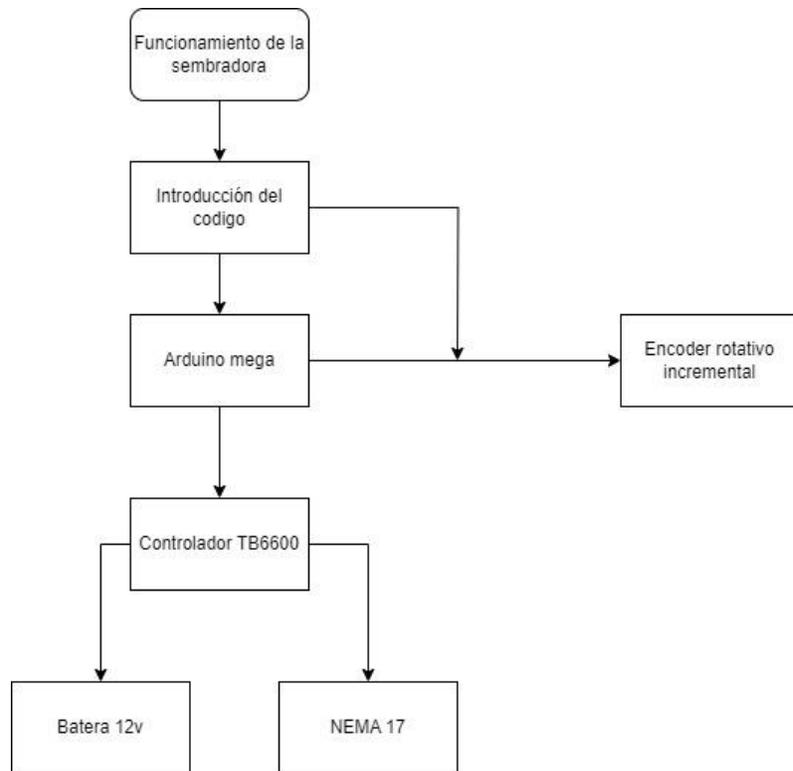


Figura 32. Diagrama del funcionamiento de la sembradora del robot agrícola

En la Figura 33 muestra la interconexión de los elementos electrónicos que constituyen la sembradora. Es importante destacar que anteriormente se utilizaba una tarjeta shield en lugar del controlador TB6600. Esta sustitución se debió a un problema recurrente de sobrecalentamiento y daño de la tarjeta shield cuando el robot era utilizado intensivamente. Esta dificultad fue resuelta satisfactoriamente mediante el reemplazo del componente mencionado.

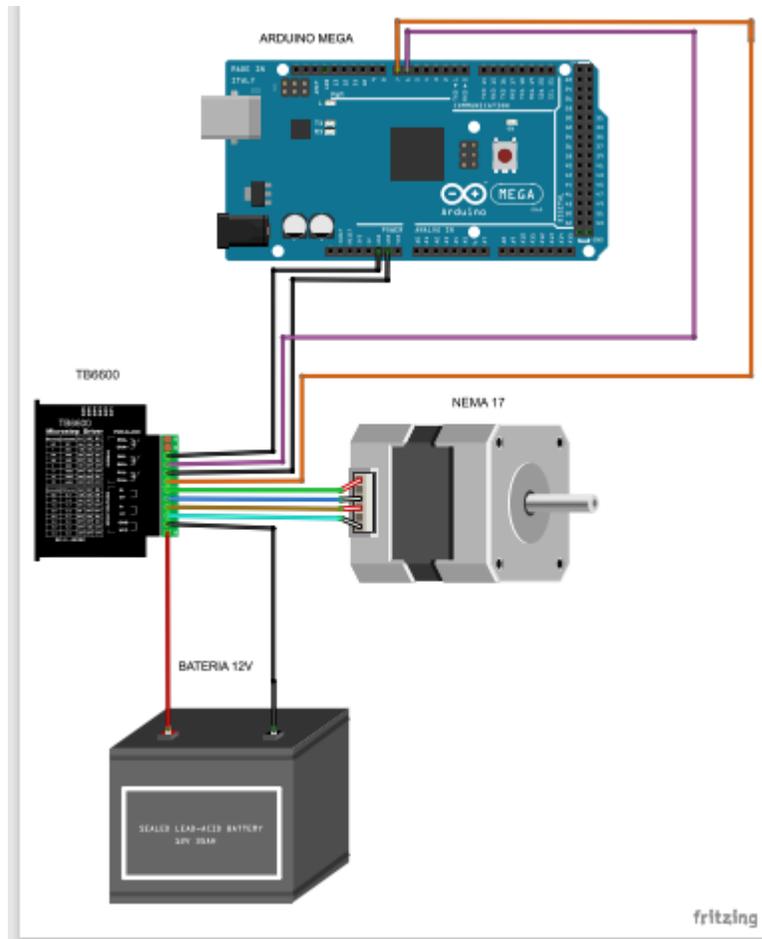


Figura 33. Diagrama visual de la sembradora del robot agrícola

7.1 Procedimiento de la metodología

Se propone que la batería del robot, comúnmente ubicada en la parte delantera y en ocasiones utilizada para agregar peso adicional, sea recargada mediante un módulo solar. Para ello se emplean como ejemplo las fichas técnicas de dos módulos solares disponibles en el mercado para realizar cálculos matemáticos que permitan determinar la viabilidad de colocar un módulo o no en el robot. Además, se propone un módulo tándem que aún está en fase de estudio y no se encuentra disponible en el mercado. Para este último, se considera la eficiencia máxima actualmente alcanzada y un voltaje de 12V.

Para cumplir con los objetivos, se optó por una metodología cualitativa, evaluativa y cuantitativa para examinar el consumo energético. Para ello, se llevaron a cabo varias pruebas durante las cuales se midieron los consumos utilizando un amperímetro de gancho marca Steren con tecnología Bluetooth. Estas mediciones se realizaron en intervalos de tiempo específicos dentro de surcos de 50 metros, y se registraron por separado los datos de cada viraje en dichos surcos.

El robot opera a tres velocidades o niveles de potencia de arranque. Se realizaron mediciones del consumo en cada velocidad con la sembradora acoplada. Para asegurar la integridad de las mediciones, se garantizó que la batería estuviera completamente cargada. Debido a esto, fue necesario dividir las pruebas en diferentes días, cada uno dedicado a una velocidad específica. Se consideró la segunda velocidad como la ideal para observar el aumento en el amperaje al agregar 5 kilos adicionales y una batería extra, correspondientes al peso propuesto del sistema fotovoltaico autónomo. En esta prueba, se realizaron mediciones con la batería completamente cargada y se evaluaron 10 surcos con y sin el peso adicional en el robot (Figura 34).



Figura 34. Robot Voltan en segunda velocidad con implemento sin peso

Los materiales que se ocuparon fueron:

- Amperímetro con tecnología bluetooth
 - Un celular en donde se descargó la aplicación para el amperímetro
- Cronometro
- Powerbank

7.2 Análisis energético del sitio de pruebas

Se estima que, durante un solo año, el sol emite aproximadamente 20 veces más energía que todas las reservas de petróleo del mundo combinadas. A nivel global, México se encuentra en el tercer lugar en cuanto a la radiación solar recibida, lo que sugiere que hay una gran oportunidad para aprovechar este recurso de manera más efectiva.

La Tabla 12 muestra los datos de irradiación (energía por unidad de área Wh/m²) disponibles para Texcoco, específicamente de la Universidad de Chapingo.

Tabla 12. Datos de la irradiación solar de la Universidad Autónoma Chapingo (PVGIS)

mes/año	Irradiación en un plano siempre normal a los rayos solares (kWh/m ² /mes)							HSP
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	promedio	
Enero	195.58	174.98	254.94	204.24	222.14	220.17	212.01	7.07
Febrero	186.86	213.98	226.63	173.78	214.53	215.43	205.20	6.84
Marzo	189.07	197.21	219.97	237.53	252.99	256.69	225.58	7.52
Abril	204.36	220.88	220.92	195.08	238.13	214.83	215.70	7.19
Mayo	161.30	185.85	187.80	208.58	238.91	224.67	201.19	6.71
Junio	142.09	145.31	162.99	143.76	155.08	187.73	156.16	5.21
Julio	166.23	158.74	141.82	188.67	156.40	169.28	163.52	5.45
Agosto	166.23	151.73	157.14	136.73	184.46	142.83	156.52	5.22
Septiembre	126.27	138.16	119.78	145.84	141.14	121.37	132.09	4.40
Octubre	157.82	163.02	159.37	140.68	139.54	239.99	166.74	5.56
Noviembre	160.76	163.44	260.92	178.58	178.20	226.62	194.75	6.49
Diciembre	182.91	213.15	258.84	216.95	222.31	216.77	218.49	7.28

La Figura 35 ilustra la irradiancia, que representa la potencia de la radiación solar por unidad de área (en W/m²), durante un día típico en Texcoco. En este caso, corresponde al 7 de abril del año actual. Como se puede observar en la figura, la mayor irradiancia se registra entre las 12:00 y las 13:00 horas.

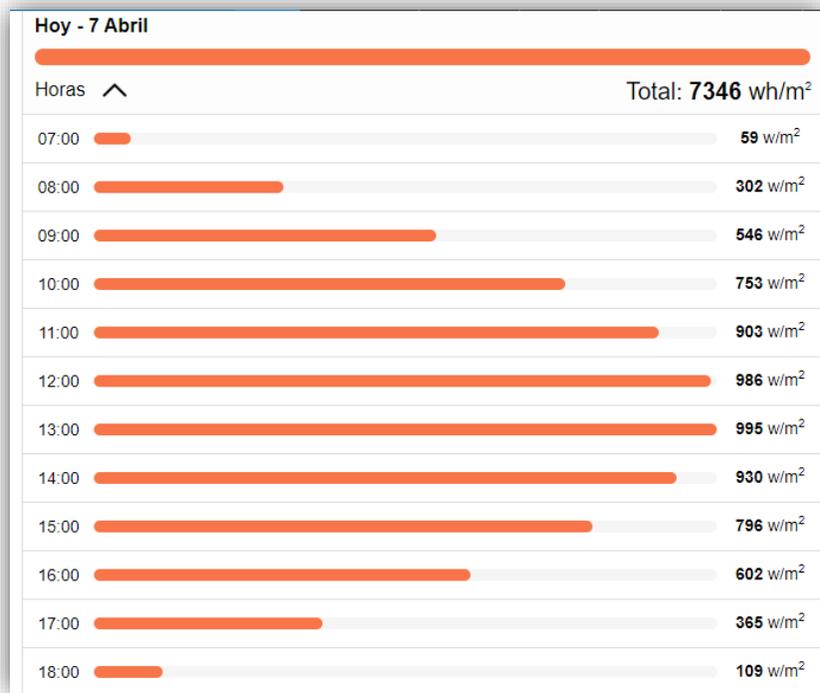


Figura 35. Irradiancia de un día normal de abril. <https://www.tutiempo.net/radiacion-solar/texcoco-de-mora.html>

Análisis matemático

- Calculo para conocer los promedios de las velocidades con las que opera el robot

Para conocer estas velocidades se ocupa la siguiente formula:

$$V = \frac{d}{t} \dots \dots \dots \text{Ecuación 1}$$

En donde:

V= velocidad de avance (m/s)

d= distancia recorrida (m)

t= tiempo en recorrer la distancia (s)

como en las pruebas realizadas se consideró una distancia de 50 m y se tomó el tiempo en que tardaba el robot en recorrer dicha distancia se tiene lo siguiente:

$$V_1 = \frac{50 \text{ m}}{54.35 \text{ s}} = 0.91 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_2 = \frac{50 \text{ m}}{52.16 \text{ s}} = 0.95 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_3 = \frac{50 \text{ m}}{43.14 \text{ s}} = 1.15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- Cálculo de la duración de la batería con los consumos de corriente obtenidos en el CENEMA

Para poder determinar la duración de la batería primero es necesario calcular su capacidad y voltaje, los cuales suelen encontrarse en su ficha técnica para este caso son los siguientes:

Capacidad de la batería (Ah)= 26Ah

Voltaje (V)= 12V

La duración de la batería se calculó utilizando la fórmula:

$$\text{Capacidad (Wh)} = \text{Capacidad (Ah)} * \text{Voltaje (V)} \dots \text{Ecuación 2}$$

$$\text{Capacidad (Wh)} = 26 \text{ Ah} * 12 \text{ V}$$

$$\text{Capacidad (Wh)} = 312 \text{ Wh}$$

Conocer los consumos de energía del dispositivo en este caso del robot en diferentes velocidades y pesos:

Velocidad 1 Peso: 20Kg Consumo: 23.34 A (tomado de la tabla1)

$$\text{Duración de la batería (horas)} = \frac{\text{Capacidad de la batería (Wh)}}{\text{Consumo promedio del dispositivo (A) * Voltaje del sistema (V)}} \dots \text{Ecuación 3}$$

$$\text{Duración de la batería (horas)} = \frac{312 \text{ Wh}}{23.3 \text{ A} * 12 \text{ V}}$$

$$\text{Duración de la batería (horas)} = \frac{312 \text{ Wh}}{280.08 \text{ W}}$$

$$\text{Duración de la batería (horas)} = 1.113 \text{ h}$$

Cálculo del número de baterías requeridas para una jornada laboral de 8 horas

Para determinar cuántas baterías se necesitan para una jornada laboral de 8 horas, primero es necesario determinar cuánta energía se consume en total durante esas 8 horas.

Dado que se tiene la duración de la batería en horas, se calcula la energía consumida por hora utilizando la fórmula:

$$\text{Energía consumida por hora (Wh)} = \text{Potencia del dispositivo (W)} * \text{Duración de la batería (horas)} \dots\dots\dots \text{Ecuación 4}$$

Se utiliza la potencia del dispositivo calculado previamente (280.08 W) y la duración de la batería en horas (1.113 horas) para calcular la energía consumida por hora.

$$\text{Energía consumida por hora (Wh)} = 280.08 \text{ W} * 1.113 \text{ horas}$$

$$\text{Energía consumida por hora (Wh)} = 311.72 \text{ Wh}$$

Determinada cuánta energía se consume por hora, se calcula la energía total consumida durante 8 horas sin embargo simplemente se multiplica por 8 ya que la energía consumida por hora ya está en watts-hora

$$\text{Energía total consumida (Wh)} = \text{Energía consumida por hora (Wh)} * 8 \dots\dots \text{Ecuación 5}$$

$$\text{Energía total consumida (Wh)} = 311.72 \text{ Wh} * 8$$

$$\text{Energía total consumida (Wh)} = 2493.76 \text{ Wh}$$

Dado que se tiene una batería de 312 Wh, se dividió la energía total consumida durante 8 horas por la capacidad de la batería para determinar cuántas baterías se necesitan:

$$\text{Número de baterías necesarias} = \frac{\text{Energía total consumida (Wh)}}{\text{Capacidad de la batería (Wh)}} \dots\dots \text{Ecuación 6}$$

$$\text{Número de baterías necesarias} = \frac{2493.76 \text{ Wh}}{312 \text{ Wh}}$$

$$\text{Número de baterías necesarias} = 7.99 \approx 8 \text{ Baterías}$$

Velocidad 1 Peso: 40Kg Consumo: 30.64 A

$$\text{Duración de la batería (horas)} = \frac{312 \text{ Wh}}{30.64 \text{ A} * 12\text{V}}$$

$$\text{Duración de la batería (horas)} = \frac{312 \text{ Wh}}{367.68 \text{ W}}$$

$$\text{Duración de la batería (horas)} = 0.85 \text{ horas}$$

Para convertir en minutos

$$\frac{0.85 \text{ horas} * 60 \text{ minutos}}{\text{hora}} = 51 \text{ minutos}$$

▪ **Cálculo de numero de baterías**

$$\text{Energía consumida por hora (Wh)} = 367.68 \text{ W} * 0.85 \text{ horas}$$

$$\text{Energía consumida por hora (Wh)} = 312.528 \text{ Wh}$$

$$\text{Energía total consumida (Wh)} = 312.528 \text{ Wh} * 8$$

$$\text{Energía total consumida (Wh)} = 2500.224 \text{ Wh}$$

$$\text{Número de baterías necesarias} = \frac{2500.224 \text{ Wh}}{312 \text{ Wh}}$$

$$\text{Número de baterías necesarias} = 8.01 \approx 8 \text{ Baterías}$$

Velocidad 2 Peso: 20Kg Consumo: 34.87 A

$$\text{Duración de la batería (horas)} = \frac{312 \text{ Wh}}{34.87\text{A} * 12\text{V}}$$

$$\text{Duración de la batería (horas)} = \frac{312 \text{ Wh}}{418.44 \text{ W}}$$

$$\text{Duración de la batería (horas)} = 0.75 \text{ horas}$$

Para convertir en minutos

$$\frac{0.75 \text{ horas} * 60 \text{ minutos}}{\text{hora}} = 44.73 \text{ minutos}$$

- **Cálculo de numero de baterías**

$$\text{Energía consumida por hora (Wh)} = 418.44 \text{ W} * 0.75 \text{ horas}$$

$$\text{Energía consumida por hora (Wh)} = 313.83 \text{ Wh}$$

$$\text{Energía total consumida (Wh)} = 313.83 \text{ Wh} * 8$$

$$\text{Energía total consumida (Wh)} = 2510.64 \text{ Wh}$$

$$\text{Número de baterías necesarias} = \frac{2510.64 \text{ Wh}}{312 \text{ Wh}}$$

$$\text{Número de baterías necesarias} = 8.04 \approx 8 \text{ Baterías}$$

Velocidad 2 Peso: 40Kg Consumo: 38.21 A

$$\text{Duración de la batería (horas)} = \frac{312 \text{ Wh}}{38.21\text{A} * 12\text{V}}$$

$$\text{Duración de la batería (horas)} = \frac{312 \text{ Wh}}{458.52 \text{ W}}$$

$$\text{Duración de la batería (horas)} = 0.68 \text{ horas}$$

Para convertir en minutos

$$\frac{0.68 \text{ horas} * 60 \text{ minutos}}{\text{hora}} = 41 \text{ minutos}$$

▪ **Cálculo de numero de baterías**

$$\text{Energía consumida por hora (Wh)} = 458.52 \text{ W} * 0.68 \text{ horas}$$

$$\text{Energía consumida por hora (Wh)} = 311.79 \text{ Wh}$$

$$\text{Energía total consumida (Wh)} = 311.79 \text{ Wh} * 8$$

$$\text{Energía total consumida (Wh)} = 2494.3488 \text{ Wh}$$

$$\text{Número de baterías necesarias} = \frac{2494.3488 \text{ Wh}}{312 \text{ Wh}}$$

$$\text{Número de baterías necesarias} = 7.99 \approx 8 \text{ Baterías}$$

Velocidad 3 Peso: 20Kg Consumo: 36.72 A

$$\text{Duración de la batería (horas)} = \frac{312 \text{ Wh}}{36.72 \text{ A} * 12 \text{ V}}$$

$$\text{Duración de la batería (horas)} = \frac{312 \text{ Wh}}{440.64 \text{ W}}$$

$$\text{Duración de la batería (horas)} = 0.70 \text{ horas}$$

Para convertir en minutos

$$\frac{0.70 \text{ horas} * 60 \text{ minutos}}{\text{hora}} = 42 \text{ minutos}$$

- **Cálculo de numero de baterías**

$$\text{Energía consumida por hora (Wh)} = 440.64 \text{ W} * 0.70 \text{ horas}$$

$$\text{Energía consumida por hora (Wh)} = 308.448 \text{ Wh}$$

$$\text{Energía total consumida (Wh)} = 308.448 \text{ Wh} * 8$$

$$\text{Energía total consumida (Wh)} = 2467.584 \text{ Wh}$$

$$\text{Número de baterías necesarias} = \frac{2467.584 \text{ Wh}}{312 \text{ Wh}}$$

$$\text{Número de baterías necesarias} = 7.90 \approx 8 \text{ Baterías}$$

Velocidad 3 Peso: 40Kg Consumo: 44.60 A

$$\text{Duración de la batería (horas)} = \frac{312 \text{ Wh}}{44.60 \text{ A} * 12\text{V}}$$

$$\text{Duración de la batería (horas)} = \frac{312 \text{ Wh}}{535.2 \text{ W}}$$

$$\text{Duración de la batería (horas)} = 0.59 \text{ horas}$$

Para convertir en minutos

$$\frac{0.59 \text{ horas} * 60 \text{ minutos}}{\text{hora}} = 34.97 \text{ minutos}$$

- **Cálculo de numero de baterías**

$$\text{Energía consumida por hora (Wh)} = 535.2 \text{ W} * 0.59 \text{ horas}$$

$$\text{Energía consumida por hora (Wh)} = 315.768 \text{ Wh}$$

$$\text{Energía total consumida (Wh)} = 315.768 \text{ Wh} * 8$$

$$\text{Energía total consumida (Wh)} = 2526.144 \text{ Wh}$$

$$\text{Número de baterías necesarias} = \frac{2526.144 \text{ Wh}}{312 \text{ Wh}}$$

$$\text{Número de baterías necesarias} = 8.09 \approx 8 \text{ Baterías}$$

7.2.1 Análisis cuantitativo de los módulos fotovoltaicos ya disponibles en el mercado

En primer lugar, se buscó dos módulos solares ya disponibles en el mercado: uno policristalino (ver Anexo 1) y otro monocristalino (ver Anexo 2), así como la ficha técnica de la batería (ver Anexo 3). A partir de estos, se obtuvieron las fichas técnicas necesarias para recopilar los datos requeridos para realizar los cálculos matemáticos. Estos cálculos son esenciales para determinar el tiempo necesario para cargar la batería, identificar el controlador óptimo y determinar el amperaje requerido para las protecciones durante la instalación del módulo en el robot.

Modulo Fotovoltaico Policristalino

Cálculo del tiempo de carga

$$T = \frac{Q}{I} \dots \dots \dots \text{ Ecuación 7}$$

Donde:

Q: Es la capacidad de la batería (Ah)

I: Es la corriente de carga, es decir, la corriente del panel solar (A)

$$T = \frac{26Ah}{2.79A} = 9.31 \text{ Hrs}$$

Cálculo del controlador

$$I_n = 1.25 * I_{sc} * \text{paneles en paralelo} \dots \dots \text{ Ecuación 8}$$

Donde:

1.25: coeficiente de corrección del 25%

I_{sc} : Corriente de cortocircuito (A)

$$I_n = 1.25 * 3.96A * 1$$

$$I_n = 4.95 A$$

- Se requiere un controlador de 10 APWM (por ser una buena opción para sistemas autónomos en cargas pequeñas)

Cálculo de las protecciones

$$Tensión = V_{oc} * No. de paneles en serie * 1.20... Ecuación 9$$

Donde:

V_{oc} : Voltaje en circuito abierto (V)

F_s : Factor de seguridad del 20%

$$Tensión = 22.2 v * 1 * 1.20$$

$$Tensión = 26.64 V$$

$$Corriente = I_{sc} * 1.25..... Ecuación 10$$

Donde:

I_{sc} : Corriente de cortocircuito (A)

C: Coeficiente de corrección del 25%

$$Corriente: 3.96A * 1.25$$

$$Corriente = 4.95A$$

- Se requiere fusibles de 5 A

- **Diagrama unifilar**

El diagrama unifilar indica que para este sistema autónomo se requiere de un módulo que se conectará a una caja de protecciones. En esta caja, los fusibles serán de 5A y se conectarán a un controlador del tipo PWM, el cual a su vez se conectará a la batería que posteriormente suministrará de energía a la carga en este caso al robot (Figura 36).

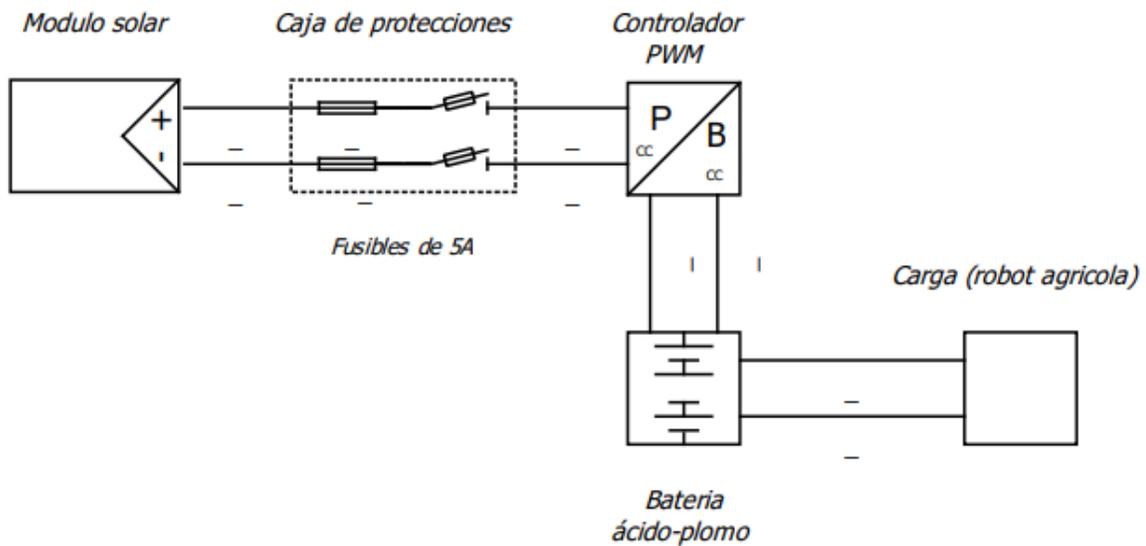


Figura 36. Diagrama unifilar de un sistema fotovoltaico autónomo con módulo policristalino

Modulo Fotovoltaico Monocristalino

$$T = \frac{26Ah}{2.81A} = 9.25 \text{ Hrs}$$

Cálculo del controlador

$$I_n = 1.25 * I_{sc} * \text{paneles en paralelo}$$

$$I_n = 1.25 * 3.03A * 1$$

$$I_n = 3.78 \text{ A}$$

Se requiere un controlador de 10 A PWM (por ser una buena opción para sistemas autónomos en cargas pequeñas).

Cálculo de las protecciones

$$\text{Tensión} = V_{oc} * \text{No. de paneles en serie} * 1.20$$

$$\text{Tensión} = 22.3 \text{ v} * 1 * 1.20$$

$$\text{Tensión} = 26.76 \text{ V}$$

$$\text{Corriente} = I_{sc} * 1.25$$

$$\text{Corriente: } 3.03\text{A} * 1.25$$

$$\text{Corriente} = 3.78\text{A}$$

- Se requiere fusibles de 5 A

Diagrama unifilar

Este sistema presenta el mismo diagrama unifilar que el módulo policristalino, ya que no hubo una gran diferencia entre ellos durante los cálculos matemáticos realizados.

Figura 37.

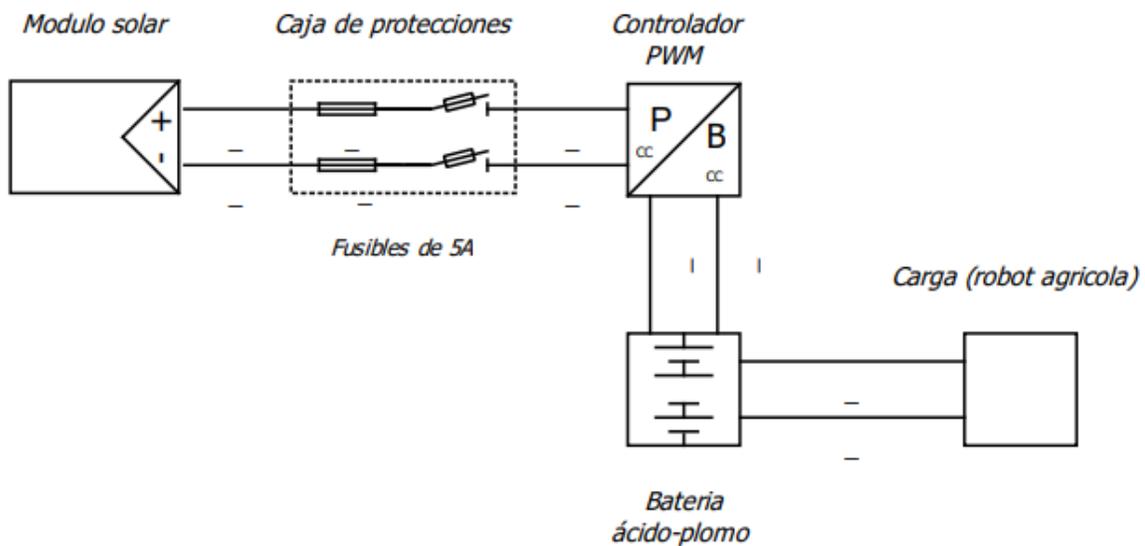


Figura 37. Diagrama unifilar de un sistema fotovoltaico autónomo con módulo monocristalino

Tiempo de carga con sistema propuesto II

Los siguientes cálculos determinan el tiempo de carga si se implementa el sistema fotovoltaico con la integración de cuatro módulos adicionales. Las fórmulas empleadas ayudan a calcular la potencia y la corriente generadas según su geometría. Es importante destacar que se seleccionaron algunos módulos disponibles en el mercado con dimensiones similares a las propuestas. Vale la pena mencionar que estos módulos no difirieron significativamente de los resultados obtenidos mediante cálculos aritméticos, lo que indica una alta precisión en los datos generados para determinar el tiempo de carga de la batería.

Policristalino

- **módulo geometría trapecial**

$$\text{Potencia del modulo} = \text{Área de panel} * \text{Potencia superficial típica}$$

$$\text{Potencia del módulo} = 0.059\text{m}^2 * 174 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Potencia del módulo} = 10.266$$

$$\text{Corriente (A)} = \frac{\text{Potencia Nominal (W)}}{\text{Tensión Nominal (V)}}$$

$$\text{Corriente (A)} = \frac{10.266\text{W}}{12\text{V}} = 0.85 \text{ A}$$

- **Módulo 1**

$$\text{Potencia del módulo} = 0.047\text{m}^2 * 174 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Potencia del módulo} = 8.178 \text{ W}$$

$$\text{Corriente (A)} = \frac{8.178\text{W}}{12\text{V}} = 0.6815 \text{ A}$$

▪ **Módulo 2**

$$Potencia\ del\ módulo = 0.04m^2 * 174 \frac{W}{m^2}$$

$$Potencia\ del\ módulo = 6.96\ W$$

$$Corriente\ (A) = \frac{6.96W}{12V} = 0.58\ A$$

$$Corriente\ total = C1 + C2 + C3 \dots$$

$$Corriente\ total = 2.79\ A + 0.85A + 0.85A + 0.6815A + 0.58$$

$$Corriente\ total = 5.7515\ A$$

$$T = \frac{26\ Ah}{5.7515\ A} = 4.52\ h$$

Monocrystalino

• **módulo geometría trapecial**

$$Potencia\ del\ módulo = 0.059m^2 * 177 \frac{W}{m^2}$$

$$Potencia\ del\ módulo = 10.443\ W$$

$$Corriente\ (A) = \frac{10.443W}{12V} = 0.87\ A$$

▪ **Módulo 1**

$$Potencia\ del\ módulo = 0.047m^2 * 177 \frac{W}{m^2}$$

$$Potencia\ del\ módulo = 8.319\ W$$

$$Corriente\ (A) = \frac{8.319W}{12V} = 0.69\ A$$

▪ **Módulo 2**

$$Potencia\ del\ módulo = 0.04m^2 * 177 \frac{W}{m^2}$$

$$Potencia\ del\ módulo = 7.08\ W$$

$$\text{Corriente (A)} = \frac{7.08W}{12V} = 0.59 A$$

$$\text{Corriente total} = 2.81 A + 0.87A + 0.87A + 0.69A + 0.59$$

$$\text{Corriente total} = 5.83 A$$

$$T = \frac{26 Ah}{5.83 A} = 4.45 h$$

Batería de litio

Para la batería de litio y de acuerdo a la corriente consumida de cada tipo de modulo se tiene lo siguiente:

- **Policristalino**

$$T = \frac{18 Ah}{5.7515 A} = 3.12 h$$

- **Monocristalino**

$$T = \frac{18 Ah}{5.83 A} = 3.08 h$$

7.2.2 Análisis del módulo propuesto

Modulo fotovoltaico tándem (silicio-perovskita)

Se propone este tipo de modulo por su debido a su extraordinaria eficiencia en la conversión de la luz solar en electricidad. Hasta el momento, se ha alcanzado un máximo teórico de eficiencia del 33.9% en laboratorio, lo que representa un avance significativo en comparación con los módulos solares convencionales, que suelen tener eficiencias máximas en el rango del 17 al 27% Figura 38.

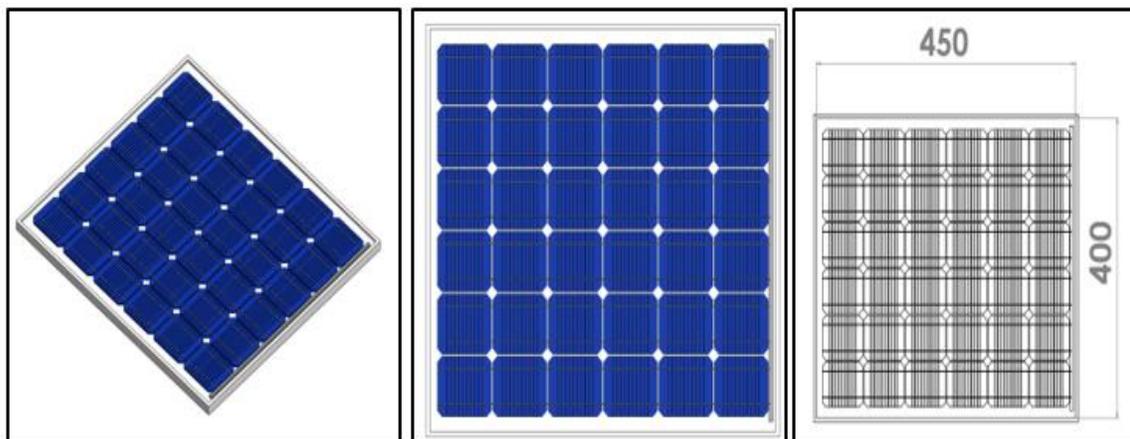


Figura 38. Diseño de Modulo Solar tándem (silicio-perovskita)

Ficha técnica

- Potencia máxima: 61 W
- Voltaje en circuito abierto: 22.5 V
- Corriente de cortocircuito: 4 A
- Voltaje máximo: 18V
- Voltaje: 12v
- Eficiencia de las células (%): 33.9%
- Dimensiones: 450mm*400mm*2mm
- Peso: 2 Kg

Los módulos solares tándem logran una alta eficiencia al usar múltiples capas de células solares, cada una diseñada para absorber diferentes longitudes de onda de la luz solar. Al apilar estas células, se maximiza la cantidad de luz solar convertida en electricidad, ya que cada capa puede aprovechar su banda específica del espectro solar Figura 39.

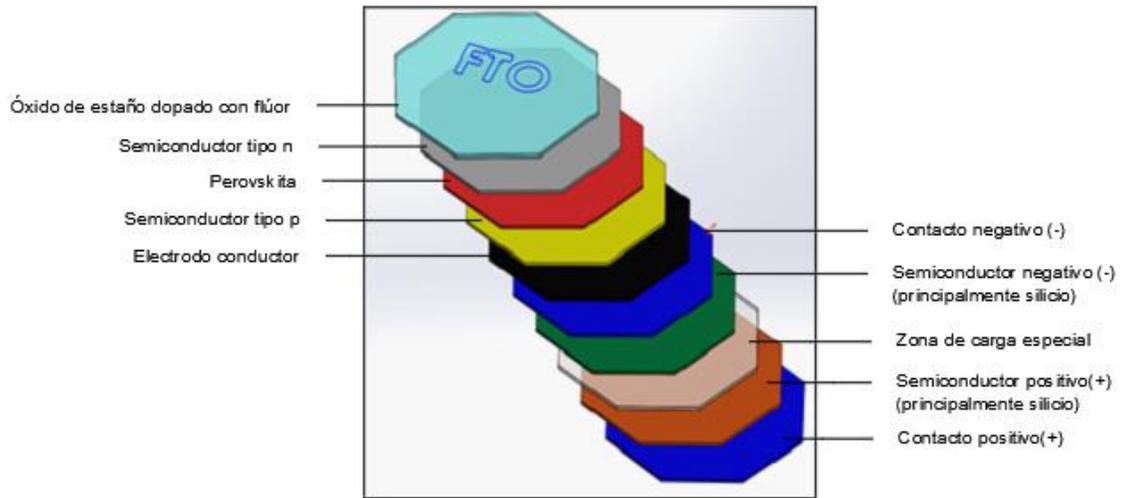


Figura 39. Estructura de una celda solar en tándem perovskita

Análisis numérico del módulo tándem

Cálculo para obtener su potencia

$$Potencia = \text{Área} * irradiancia * Eficiencia \dots\dots\dots \text{Ecuación 11}$$

Donde:

Área: Es la multiplicación de la longitud y el ancho del panel (m^2)

Irradiancia: Es la cantidad de radiación solar incidente en el panel, usamos una irradiancia promedio de 1000 W/m^2 (que es un valor típico para condiciones de pleno sol).

Eficiencia: es la eficiencia del panel solar, expresada como un decimal.

$$\text{Área} = 0.45m^2 * 0.40m^2 = 0.18m^2$$

$$Potencia = 0.18m^2 * 1000 \frac{W}{m^2} * 0.339$$

$$Potencia = 61.02 \text{ W}$$

Cálculo de su corriente

$$I = \frac{P}{V} \dots\dots\dots \text{Ecuación 12}$$

Donde:

P: Potencia máxima (W)

V: Voltaje máximo (V)

$$I = \frac{61.02 \text{ W}}{18 \text{ V}}$$

$$I = 3.39 \text{ A}$$

Cálculo del tiempo de carga

$$T = \frac{Q}{I}$$

$$T = \frac{26Ah}{3.39A} = 7.66 \text{ Hrs}$$

Cálculo del controlador

$$I_n = 1.25 * I_{sc} * \text{paneles en paralelo}$$

$$I_n = 1.25 * 4A * 1$$

$$I_n = 5 A$$

- Se requiere un controlador de 10A PWM

Cálculo de las protecciones

$$\text{Tensión} = V_{oc} * \text{No. de paneles en serie} * 1.20$$

$$\text{Tensión} = 22.5 \text{ v} * 1 * 1.20$$

$$\text{Tensión} = 27 \text{ V}$$

$$\text{Corriente} = I_{sc} * 1.25$$

$$\text{Corriente: } 4A * 1.25$$

$$\text{Corriente} = 5A$$

- Se requieren fusibles de 6A

Diagrama unifilar

Al igual que en los módulos anteriores, el diagrama representa una interconexión entre el módulo propuesto y una caja de protecciones, con fusibles de 6A, que se dirige al controlador. Este controlador, a su vez, se conectará a la batería, la cual energizará al robot una vez que esté completamente cargada Figura 40.

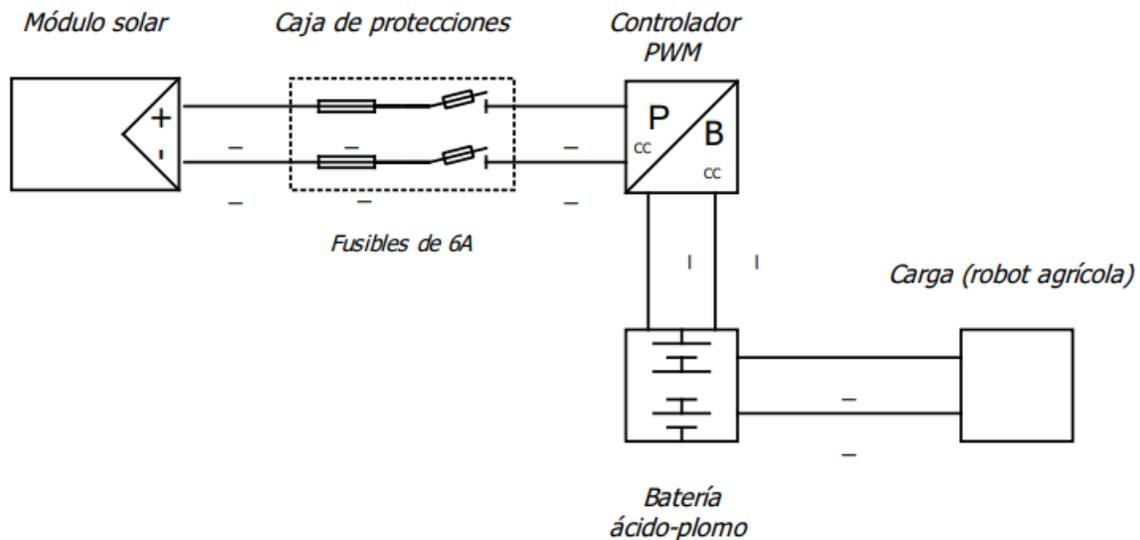


Figura 40. Diagrama unifilar de un sistema fotovoltaico autónomo con modulo tándem

En la Figura 41 se aprecia la interconexión del sistema fotovoltaico autónomo seleccionado, donde se puede observar que del lado izquierdo se encuentra la conexión que consta del módulo, el controlador y la batería. Esto se debe a que el propósito es cargar únicamente la batería y no suministrar energía al robot al mismo tiempo. Se utiliza el controlador para evitar que la energía del panel dañe la batería. Por ello, del lado derecho se observa la conexión de la batería con el robot agrícola, de manera que una vez que esté cargada, reemplace a la que se descargó en el robot.

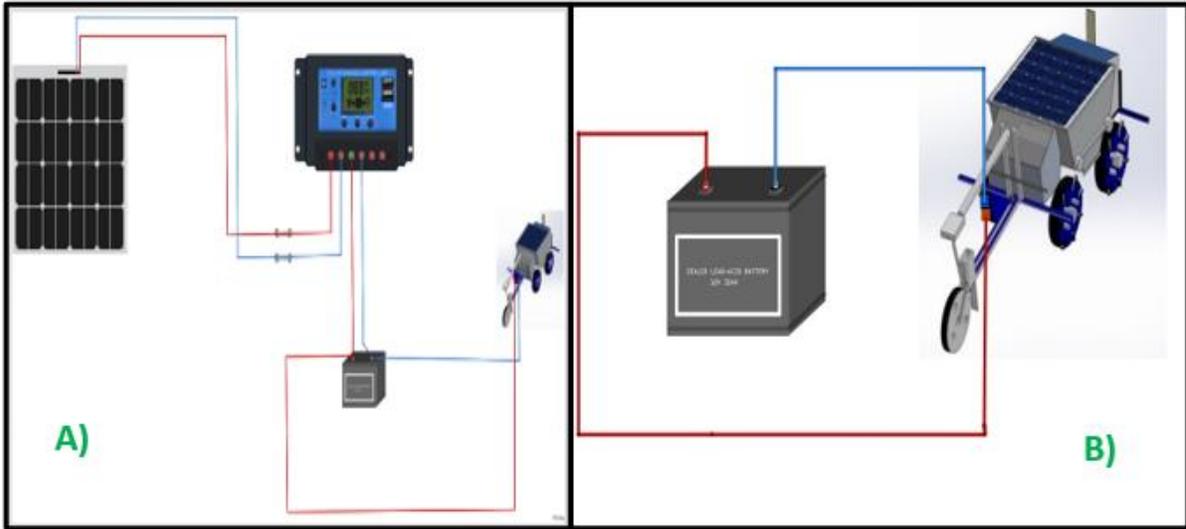


Figura 41. A) Diagrama de la interconexión sistema fotovoltaico autónomo B) Conexión de la batería al robot

7.2.3 Diseño de propuesta

Se propone colocar el módulo en la parte superior del robot para suministrar energía a la batería que se encuentra en la parte delantera del mismo (ver Figura 42), de esta manera se aprovecharía mejor la radiación solar cuando el robot esté trabajando.



Figura 42. Robot agrícola con batería auxiliar

En la Figura 43 se aprecia al robot Voltan con su implemento, la sembradora, y las unidades en milímetros de la parte superior del mismo, lo que facilita determinar el tamaño necesario del módulo solar.

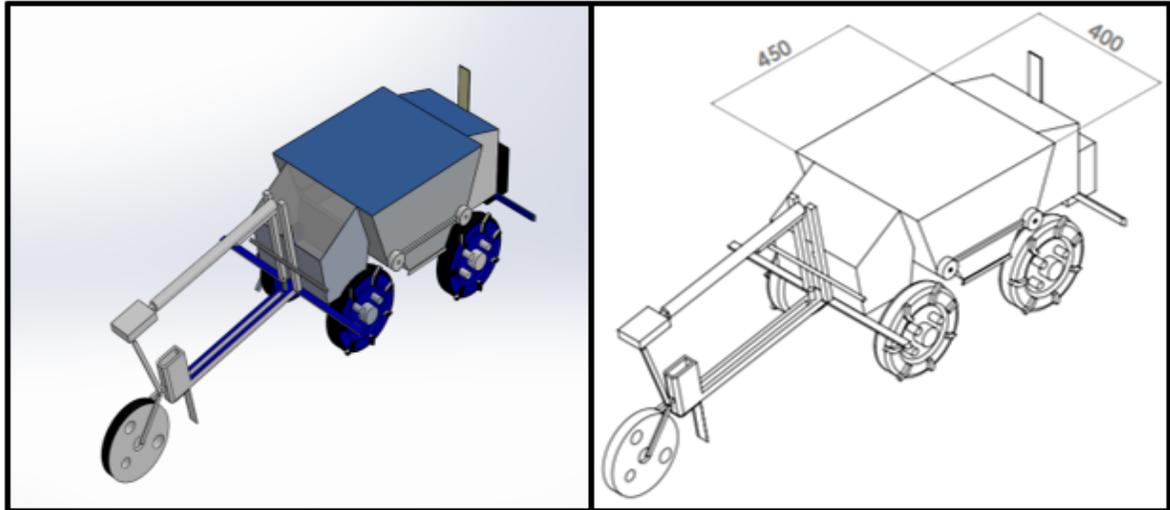


Figura 43. robot agrícola Voltan sin modulo solar

Ahora en la Figura 44 se puede apreciar al robot con el modulo colocado en la parte superior de este con las dimensiones requeridas de 450mm*400mm.

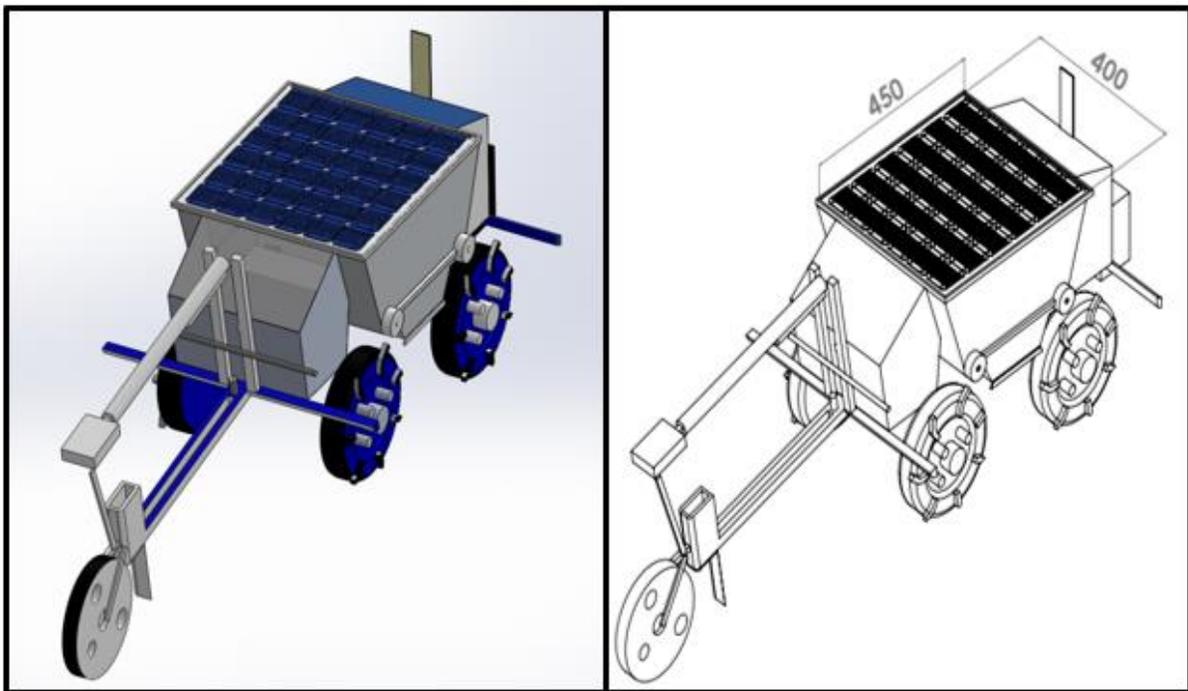


Figura 44. Robot Agrícola Voltan con modulo solar tándem (silicio-perovskita)

La Figura 45 muestra al robot agrícola sembrando, donde las líneas representan los surcos. La ilustración fue creada mediante Mega Creator.

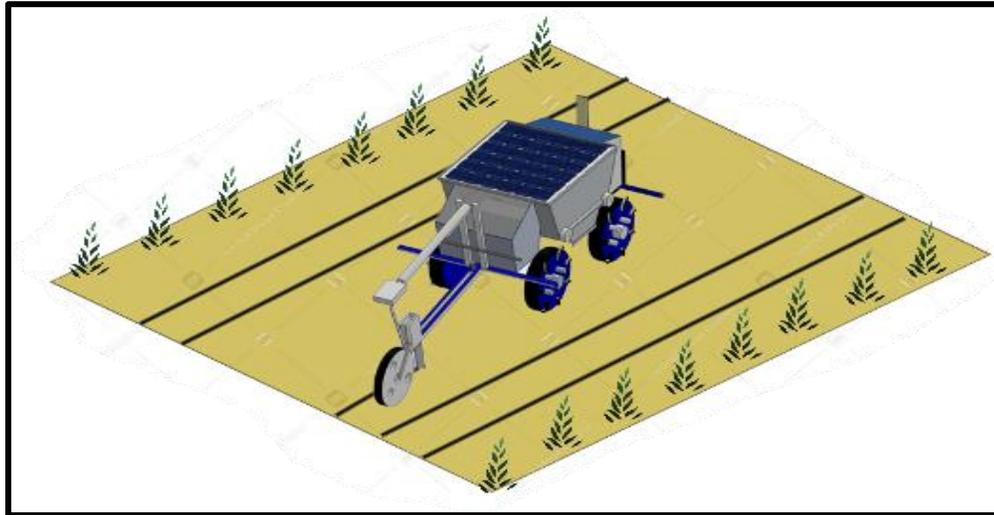


Figura 45. Ilustración de robot trabajando con sembradora

7.2.4 Análisis del sistema autónomo propuesto II

7.2.5 Módulos propuestos

Modulo trapezoidal

La Figura 46 ilustra el diseño del módulo tándem trapezoidal para el robot agrícola. Esta geometría se seleccionó estratégicamente con la finalidad de aprovechar los laterales del robot como ubicación óptima. Aunque la luz solar no incide directamente sobre ellos, se ha previsto su capacidad de absorción, especialmente durante las horas pico. En estos momentos, ambos lados del robot se ven beneficiados por la exposición solar, dado que durante cada recorrido en los surcos, el robot efectúa giros que exponen de manera equitativa sus laterales. Esta disposición maximiza la eficiencia de los módulos solares, permitiendo que el robot aproveche al máximo la energía solar disponible.

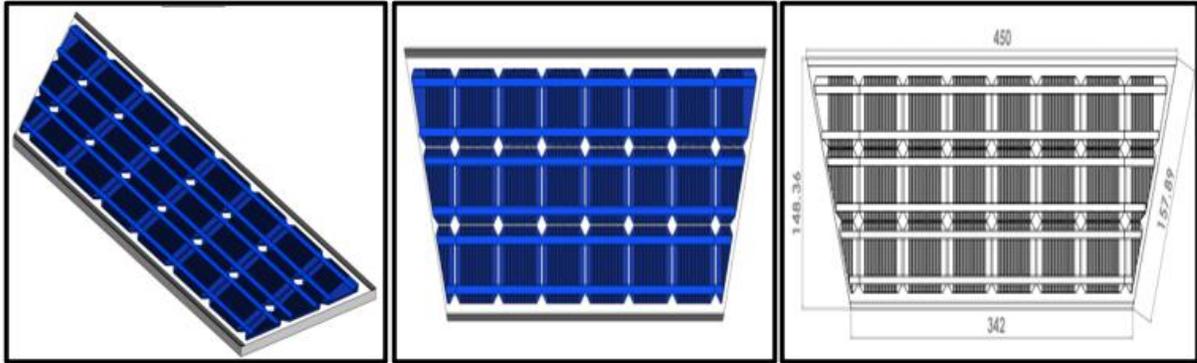


Figura 46. Diseño trapecial de modulo tándem

Ficha técnica

- Potencia máxima: 20 W
- Voltaje en circuito abierto: 22.5 V
- Corriente de cortocircuito: 4 A
- Voltaje máximo: 18V
- Voltaje: 12v
- Eficiencia de las células (%): 33.9%
- Dimensiones: 450mm*342mm*2mm
- Peso: 1.5 Kg

Análisis numérico del módulo trapecial

Cálculo para obtener su potencia

$$Potencia = \text{Área} * irradiancia * Eficiencia$$

$$\text{Área} = \frac{(B+b)h}{2} \dots\dots\dots \text{Ecuación 13}$$

Donde:

B: Base mayor del trapecio (m)

b= Base menor del trapecio (m)

h= Altura del trapecio (m)

$$\text{Área} = \frac{(0.450m + 0.342m)0.148m}{2}$$

$$\text{Área} = \frac{(0.792m)0.148m}{2}$$

$$\text{Área} = 0.058908 \approx 0.059m^2$$

$$\text{Potencia} = 0.059m^2 * 1000 \frac{W}{m^2} * 0.339$$

$$\text{Potencia} = 20.001 \approx 20W$$

Dado que son dos módulos trapeziales entonces:

$$\text{Potencia} = 20W + 20W = 40W$$

Cálculo de su corriente

$$I = \frac{P}{V}$$

$$I = \frac{20W}{12V}$$

$$I = 1.67 A$$

$$I = 3.3 A \text{ de los dos módulos}$$

Módulo tándem superior junto a la sembradora

La Figura 47 representa el módulo que se instalaría en la parte superior del robot, junto a la sembradora. A pesar de sus dimensiones reducidas, este módulo contribuye significativamente en la tarea de cargar una batería auxiliar, proporcionando una potencia considerable para cumplir con su función específica.

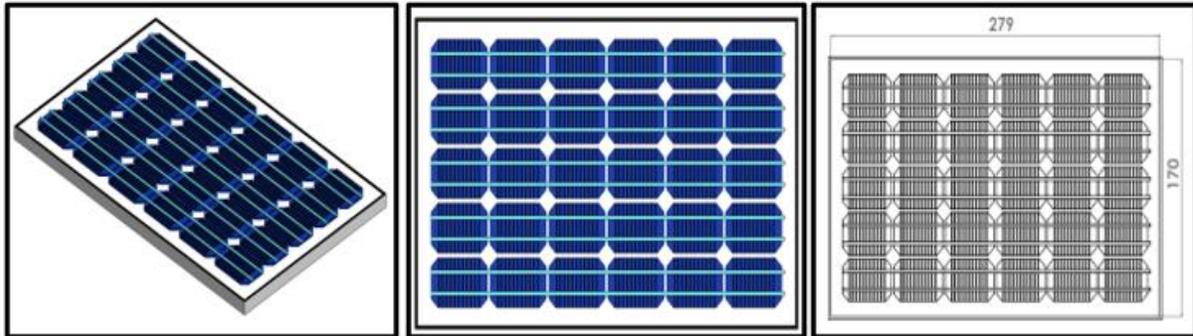


Figura 47. Diseño de modulo tándem superior lado de la sembradora

Ficha técnica

- Potencia máxima: 16 W
- Voltaje en circuito abierto: 22.5 V
- Corriente de cortocircuito: 4 A
- Voltaje máximo: 18V
- Voltaje: 12v
- Eficiencia de las células (%): 33.9%
- Dimensiones: 279mm*170mm*2mm
- Peso: 1Kg

Calculo para obtener su potencia

$$Potencia = \text{Área} * irradiancia * Eficiencia$$

$$\text{Área} = 0.279m * 0.170m$$

$$\text{Área} = 0.04743 \approx 0.047m^2$$

$$Potencia = 0.047m^2 * 1000 \frac{W}{m^2} * 0.339$$

$$Potencia = 15.933 \approx 16W$$

Cálculo de su corriente

$$I = \frac{P}{V}$$

$$I = \frac{16W}{12V}$$

$$I = 1.3 A$$

Modulo tándem superior junto a la cámara

La Figura 48 muestra el módulo superior que se colocaría junto a la cámara. Aunque sus dimensiones son relativamente mas pequeñas, su aporte de potencia al sistema sin duda alguna contribuye a una carga más rápida y eficiente de la batería.

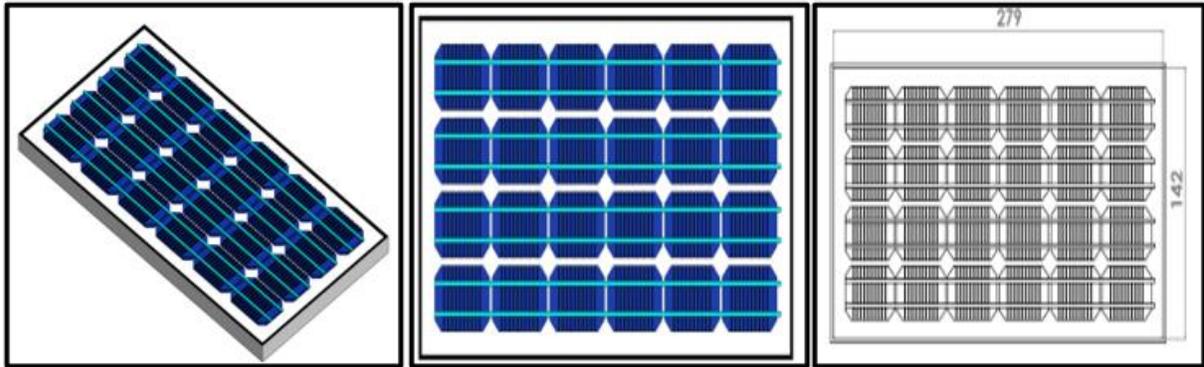


Figura 48. Diseño de modulo tándem superior lado de la cámara

Ficha técnica

- Potencia máxima: 13.6 W
- Voltaje en circuito abierto: 22.5 V
- Corriente de cortocircuito: 4 A
- Voltaje máximo: 18V
- Voltaje: 12v
- Eficiencia de las células (%): 33.9%
- Dimensiones: 279mm*142mm*2mm
- Peso: 1Kg

Calculo para obtener su potencia

$$Potencia = \text{Área} * irradiancia * Eficiencia$$

$$\text{Área} = 0.279m * 0.142m$$

$$\text{Área} = 0.039618 \approx 0.04m^2$$

$$Potencia = 0.04m^2 * 1000 \frac{W}{m^2} * 0.339$$

$$Potencia = 13.56 \approx 13.6W$$

Cálculo de su corriente

$$I = \frac{P}{V}$$

$$I = \frac{13.6W}{12V}$$

$$I = 1.13 A$$

7.2.6 Análisis numérico del sistema fotovoltaico autónomo propuesto II

$$\text{Número de paneles} = 5$$

$$\text{Voltaje del sistema} = 12V$$

Módulos en serie

$$N_s = \frac{\text{Voltaje del sistema}}{V_{max} \text{ del sistema}} \dots\dots\dots \text{Ecuación 14}$$

$$N_s = \frac{12V}{18V}$$

$$N_s = 0.66 \approx 1 \text{ módulo}$$

Módulos en paralelo

$$M_p = \frac{\text{Número de paneles totales}}{N_s} \dots\dots\dots \text{Ecuación 15}$$

$$M_p = \frac{5}{1}$$

$$M_p = 5 \text{ módulos}$$

Cálculo del controlador

$$I_n = 1.25 * I_{sc} * \text{paneles en paralelo}$$

$$I_n = 1.25 * 4A * 5$$

$$I_n = 25 A$$

- Se requiere un controlador de 25A PWM

Cálculo de las protecciones

$$\text{Tensión} = V_{oc} * \text{No. de paneles en serie} * 1.20$$

$$\text{Tensión} = 22.5 v * 1 * 1.20$$

$$\text{Tensión} = 27 V$$

$$\text{Corriente} = I_{sc} * 1.25$$

$$\text{Corriente: } 4A * 1.25$$

$$\text{Corriente} = 5A$$

- Se requieren fusibles de 6A

Calculo de las sumas de las potencias de los modulos fotovoltaicos

$$\sum \text{Potencia} = P1 + P2 + P3 \dots + Pn \dots\dots\dots \text{Ecuación 16}$$

$$\sum \text{Potencia} = 61W + 20W + 20W + 16W + 13.6W$$

$$\sum Potencia = 130.6W$$

*Potencia = Voltaje * Intensidad*.....Ecuación 17

$$Intensidad = \frac{Potencia}{Voltaje}$$

$$Intensidad = \frac{130.6W}{12V}$$

$$Intensidad = 10.88 \approx 10.9A$$

$$T = \frac{Q}{I}$$

$$T = \frac{26Ah}{10.9A}$$

$$T = 2.38h$$

Conexión en paralelo

El voltaje se mantiene = 12V

Las corriente se suman = I1 + I2 + I3 ... In..... Ecuación 18

$$Intensidad = 3.4A + 1.67A + 1.67A + 1.3A + 1.13A$$

$$Intensidad = 9.13A$$

$$T = \frac{26Ah}{9.13A}$$

$$T = 2.84h$$

Batería de litio

Cálculo del tiempo de carga

$$T = \frac{18Ah}{10.9A} = 1.65h$$

$$T = \frac{18Ah}{9.13A} = 1.97h$$

Digramas unifilares

La Figura 49 presenta el diagrama unifilar de los módulos propuestos, un total de cinco interconectados en paralelo. Esta configuración se ha seleccionado con el objetivo de incrementar la corriente sin afectar el voltaje, dado que el sistema opera a 12V. El propósito es aumentar el amperaje para reducir el tiempo de carga de la batería. Por esta razón, se ha optado por esta conexión en paralelo.

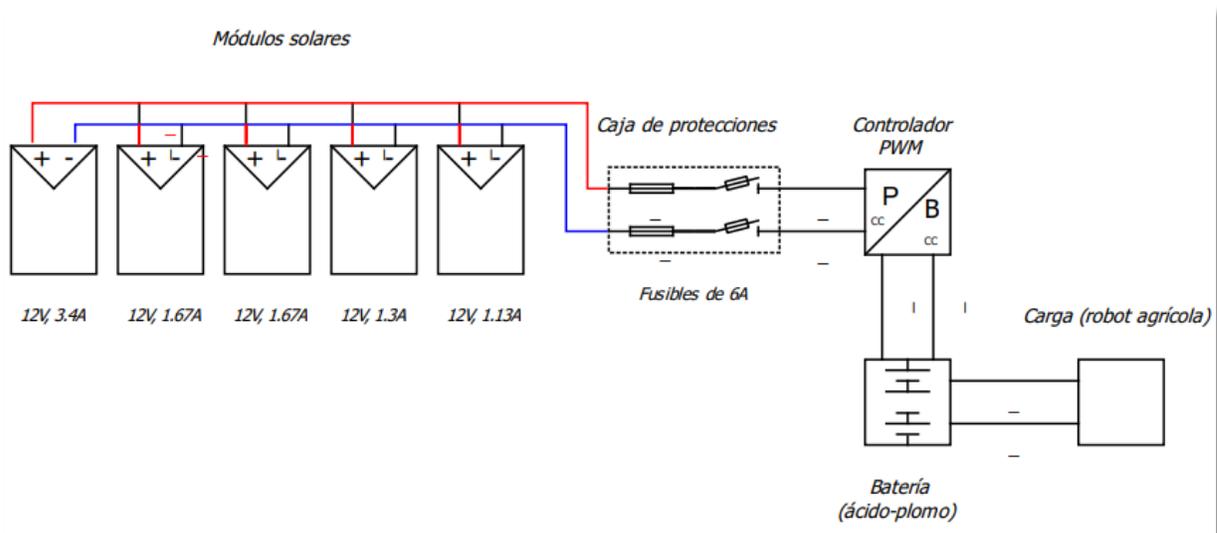


Figura 49. Diagrama unifilar del sistema autónomo con módulos tándem con batería de ácido-plomo

La Figura 50 muestra nuevamente el diagrama unifilar de los cinco módulos, esta vez con la incorporación de una batería de litio. Este diseño implica una consideración importante, ya que las baterías de litio ofrecen una serie de ventajas, como una mayor densidad de energía y una tasa de descarga más estable en comparación con las baterías convencionales de plomo-ácido.

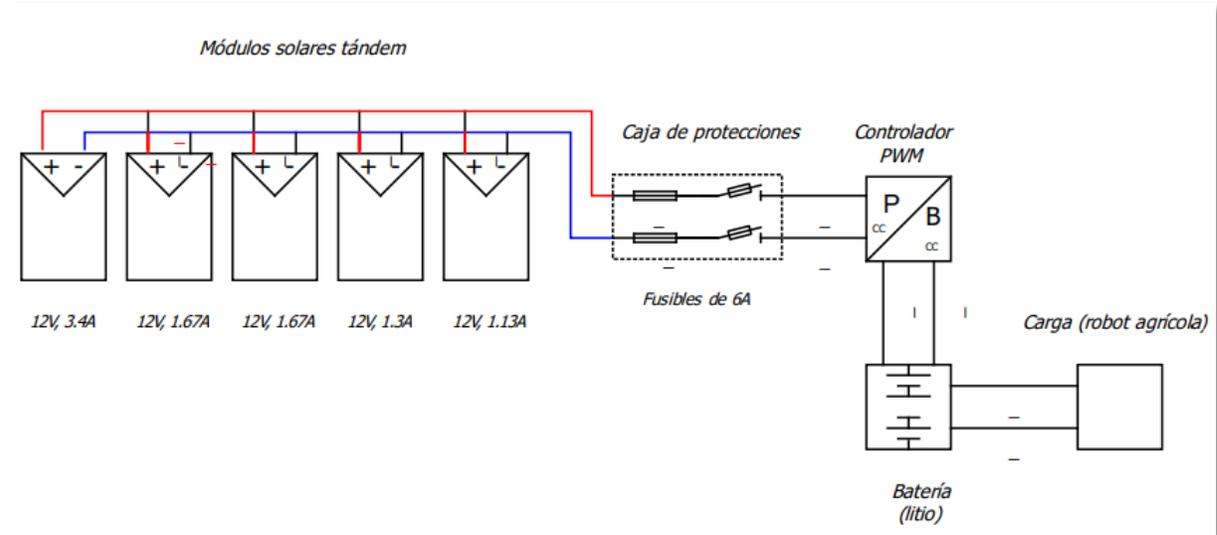


Figura 50. Diagrama unifilar del sistema autónomo con módulos tándem con batería de litio

En la Figura 51 se representa la interconexión de los módulos en paralelo, los cuales están diseñados para alimentar al controlador con protecciones integradas. Desde el controlador, la energía se dirige hacia la batería, donde se implementa un sistema de gestión de energía que garantiza una carga eficiente y segura. Una vez que la batería está completamente cargada, sustituirá a aquella que se encuentre descargada. Este proceso de conmutación de baterías asegura un suministro continuo de energía al sistema, optimizando su rendimiento y manteniendo su operatividad sin interrupciones prolongadas.

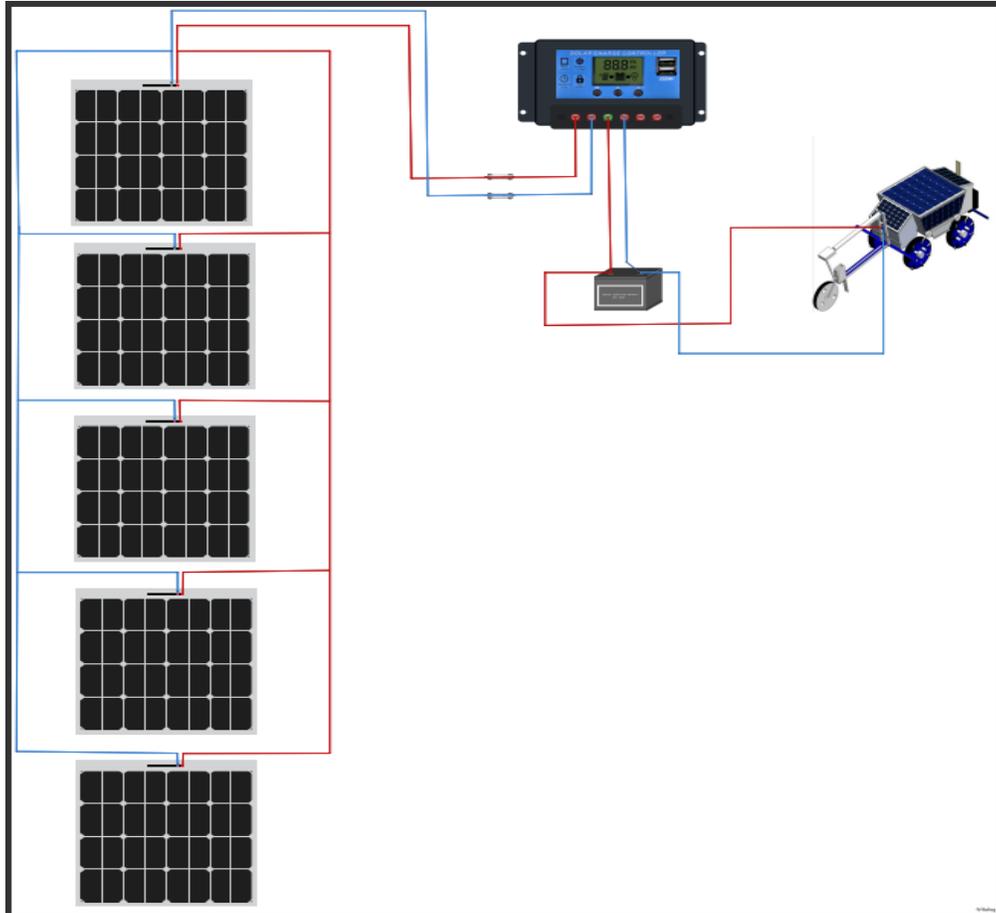


Figura 51. Diagrama de la interconexión del sistema autónomo

7.2.7 Diseño de propuesta II para el robot agrícola Voltan

La Figura 52 ilustra el sistema autónomo propuesto para suministrar energía a la batería auxiliar. Este sistema se compone de cinco módulos que se adaptan a la geometría disponible, aprovechando eficientemente el espacio disponible. La disposición estratégica de estos módulos no solo contribuye a su energización, sino que también impulsa la sostenibilidad energética de mismo. Al optimizar el aprovechamiento de recursos y alentar prácticas respetuosas con el medio ambiente, el sistema se convierte en un ejemplo de eficiencia energética y compromiso ecológico.

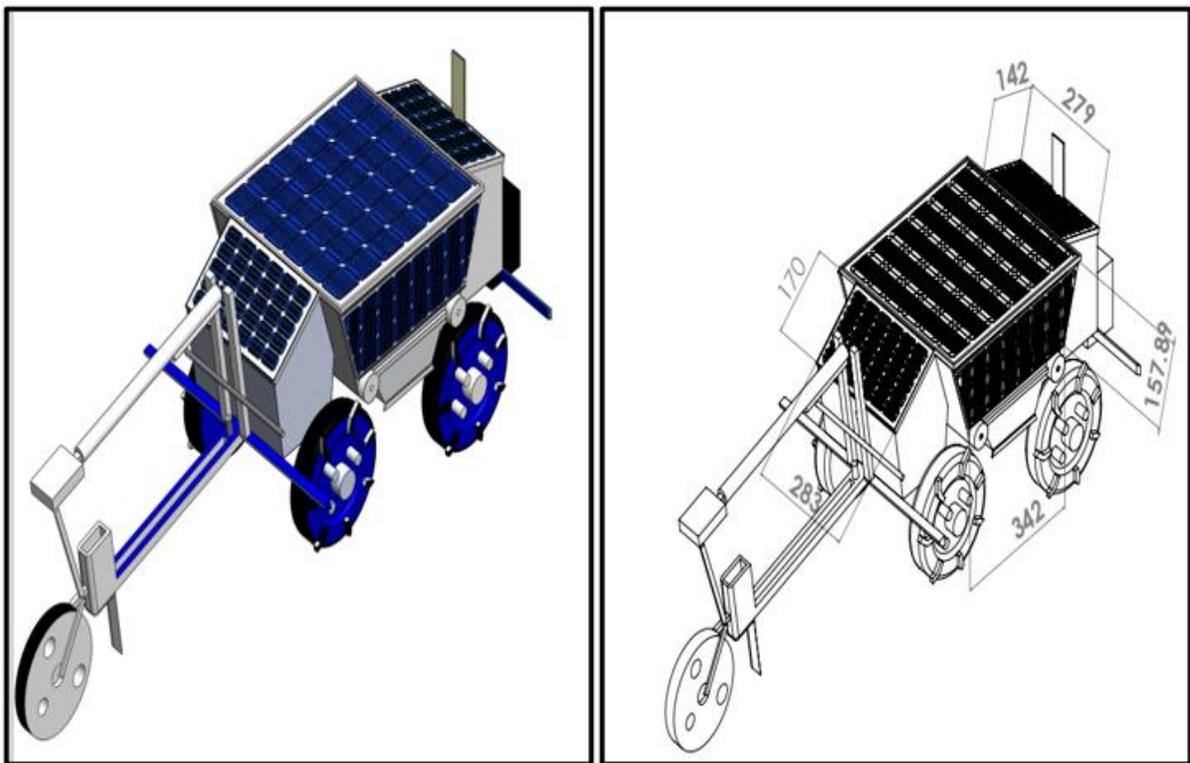


Figura 52. Diseño del robot agrícola con cinco módulos tándem adecuados a su geometría

En la Figura 53 se presenta una evolución del diseño anterior al introducir la idea de que incluso los módulos más pequeños puedan ajustarse para capturar de manera óptima la radiación solar. Esta innovación expande la eficiencia del sistema al permitir que cada componente, independientemente de su tamaño, pueda maximizar su exposición a la luz solar. Así, al igual que los otros módulos, este diseño se activaría

cuando el robot se encuentre en reposo, garantizando una captura continua de energía solar y optimizando su rendimiento en todo momento.

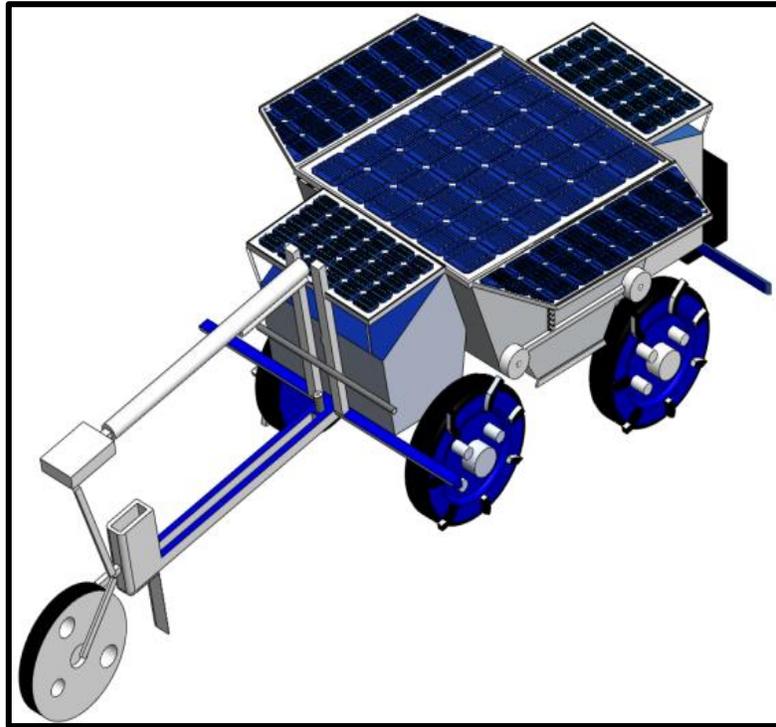


Figura 53. Segunda propuesta del robot para una eficiencia optima de captación solar

La Figura 54 representa una ilustración del robot realizando labores de siembra en un campo agrícola. En ella, se destaca también la presencia de una zona rural que se beneficia de diversas fuentes de energía renovable. Esta representación tiene como objetivo principal incentivar a los agricultores a adoptar el uso de energías renovables. No solo proporcionarán energía, sino que también permitirán llevar la agricultura a un nivel superior, ayudando a los agricultores para que sean autosuficientes incluso en lugares aislados, como suelen ser los campos agrícolas. Al promover estas tecnologías sostenibles, se crea una oportunidad para superar los desafíos asociados con la falta de energía en entornos rurales, al tiempo que se impulsa el desarrollo agrícola y se fomenta la resiliencia ante los cambios ambientales.

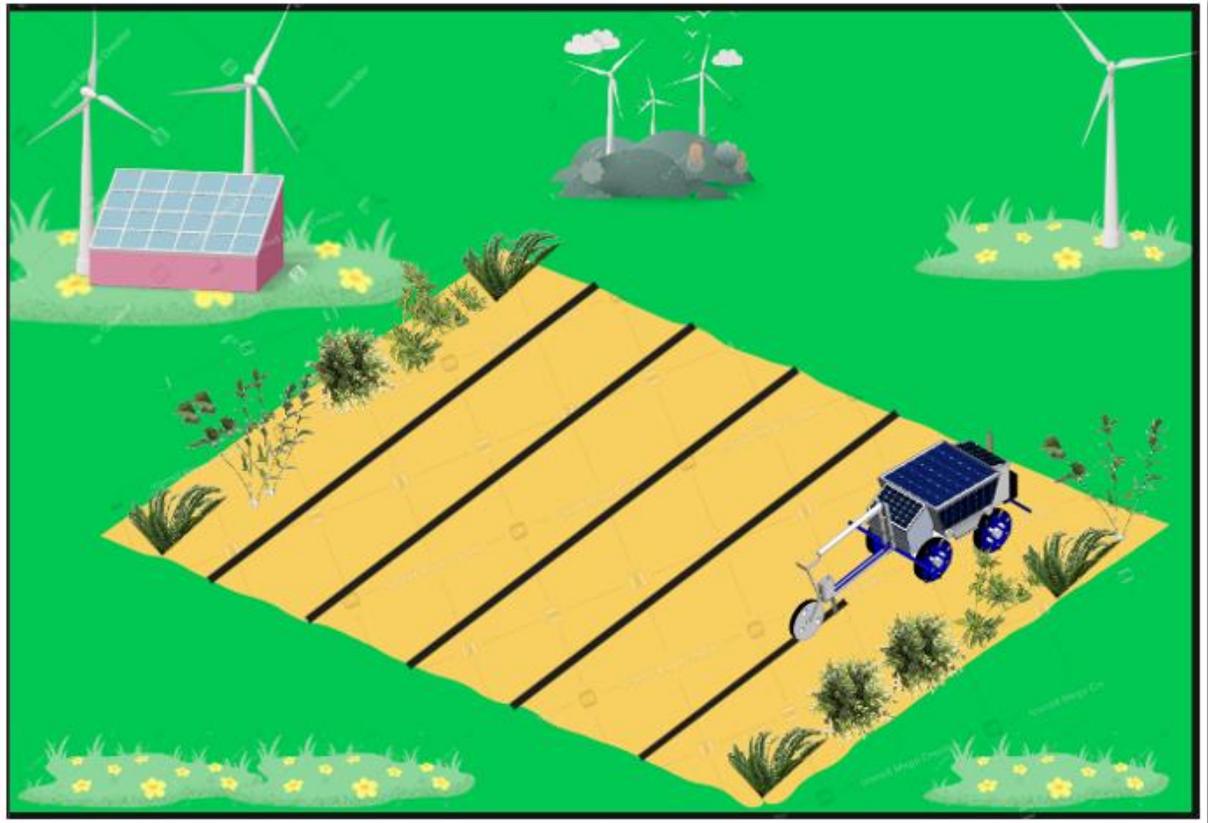


Figura 54. Ilustración del robot sembrando en campo

8. Resultados y discusión

Tras la realización de diferentes cálculos matemáticos y varias pruebas del robot para conocer su consumo energético se obtuvieron los siguientes resultados:

8.1 Consumo energético del robot

8.1.1 Promedio de los consumos

En la Tabla 13 adjunta se presentan los promedios correspondientes al consumo energético del robot Voltan en sus tres configuraciones de velocidad con una carga de 20Kg. Estos datos fueron recopilados durante pruebas llevadas a cabo en las instalaciones del Centro Nacional de Estandarización de Maquinaria Agrícola (Cenema), en una pista de concreto. Durante las pruebas, el robot fue sometido a un recorrido promedio de 84 metros, lo que implicaba dar cinco vueltas completas a la rueda motriz en cada iteración.

Tabla 13. Datos del consumo energético en sus tres velocidades con cargas de: 20kg y 40kg

Velocidad	Corriente eléctrica (A) para carga de 20 Kg	Corriente eléctrica (A) para carga de 40 Kg
1	23.34	30.64
2	34.87	38.21
3	36.72	44.6

- Gráfica de los promedios del consumo energético del robot con una carga de 20Kg a tres diferentes velocidades

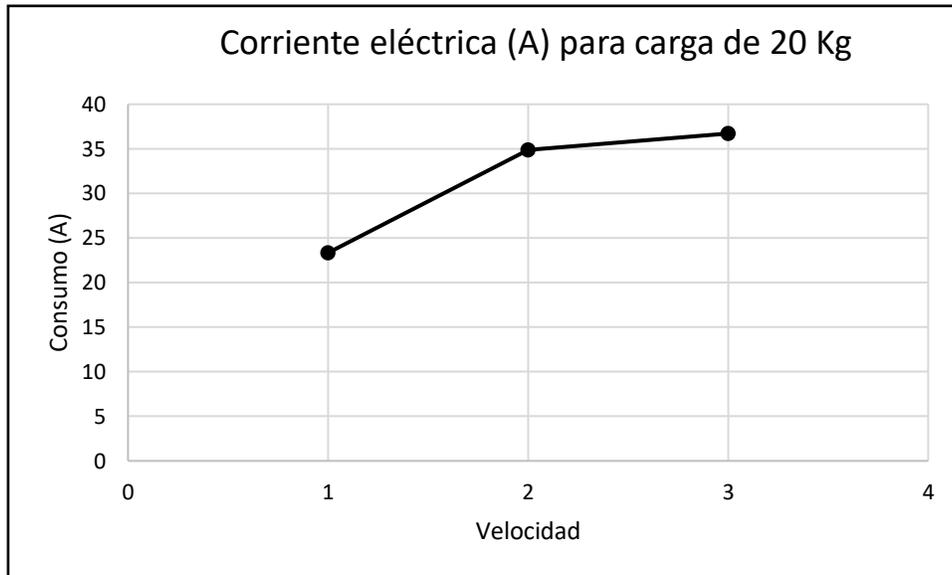


Figura 55. Gráfica de la corriente consumida con carga de 20kg

- Gráfica de los promedios del consumo energético del robot con una carga de 40Kg a tres diferentes velocidades

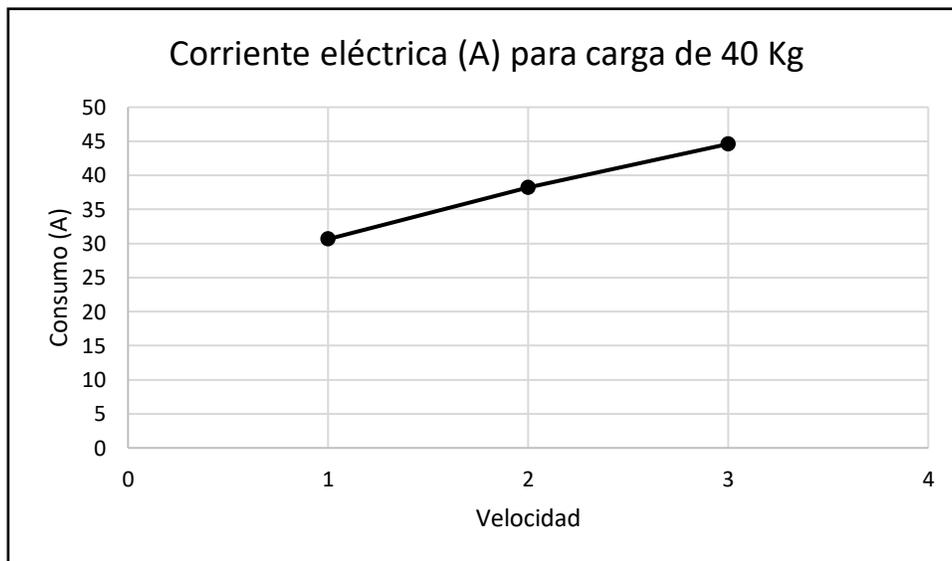


Figura 56. Gráfica de la corriente consumida con carga de 40kg

En las figuras anteriores se aprecia el consumo energético del robot en tres velocidades distintas, bajo dos condiciones de carga: 20 kg y 40 kg. En donde se observa que, conforme aumenta la velocidad, el consumo energético también tiende a incrementarse. Se destaca las diferencias de consumo entre las diversas cargas y velocidades. Por ejemplo, en la gráfica correspondiente a una carga de 20 kg (Figura 55), se observa un aumento del 36.44% en el consumo entre la primera y la tercera velocidad, mientras que, en la gráfica con una carga de 40 kg (Figura 56), se registra un incremento del 31.31% entre la primera y tercera velocidad. Estos datos ofrecen una comprensión detallada de cómo varía el consumo energético en función tanto de la velocidad como de la carga del robot.

Es relevante señalar que el consumo máximo se alcanza en la tercera velocidad con una carga de 40 kg, registrando un valor de 44.60 A. Esto subraya la importancia de considerar cuidadosamente las condiciones de carga y velocidad al diseñar estrategias para optimizar el consumo energético del robot

Máximos consumos

La Tabla 14 contiene los datos recopilados que representan los promedios de los máximos consumos energéticos registrados durante las pruebas realizadas con el robot. Estas mediciones al igual que la anterior se llevaron a cabo en tres configuraciones de velocidad distintas y bajo dos condiciones de carga, especificadas en pesos de veinte y cuarenta kilogramos respectivamente.

Tabla 14. Datos del promedio de consumo máximo en sus tres velocidades con cargas de: 20kg y 40kg

Velocidad	Corriente eléctrica máxima (A) para carga de 20 Kg	Corriente eléctrica máxima (A) para carga de 40 Kg
1	65.9	62
2	79	76
3	96	86

- Gráfica de los consumos máximos del robot con una carga de 20Kg a tres diferentes velocidades

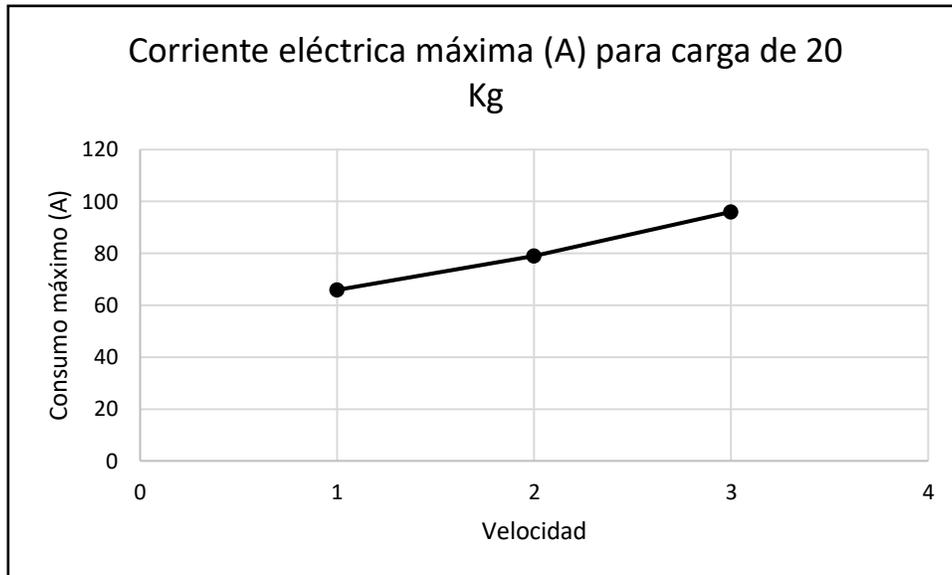


Figura 57. Gráfica de la corriente máxima consumida con carga de 20kg

- Gráfica de los consumos máximos del robot con una carga de 20Kg a tres diferentes velocidades

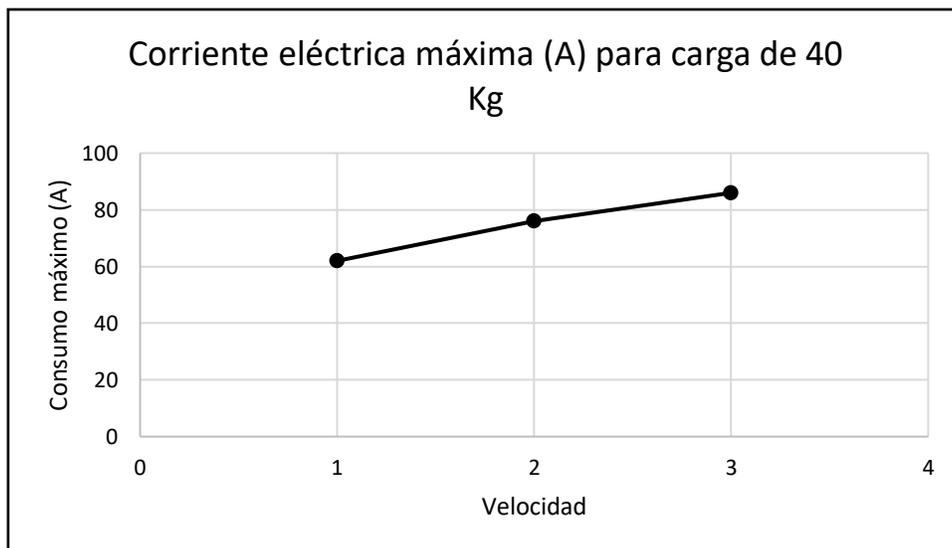


Figura 58. Gráfica de la corriente máxima consumida con carga de 40kg

La Figura 57 y Figura 58 presentan las gráficas de los máximos consumos registrados durante las diferentes pruebas realizadas con tres velocidades y dos cargas diferentes: 20Kg y 40Kg, registrando un máximo de 96 A.

8.1.2 Consumo energético de los surcos recorridos en sus tres velocidades

Las Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17 contienen los datos del consumo energético registrado durante el funcionamiento del robot con su implemento sembrador en sus tres velocidades y sin carga adicional operando en 15 surcos. Los datos presentados incluyen medidas clave como el promedio, máximo, mínimo, desviación estándar y varianza del consumo energético.

Estos valores proporcionan información valiosa que permiten comprender la variabilidad en el consumo energético del robot durante su operación en primera velocidad con la sembradora. Por ejemplo, el promedio da una idea general del consumo típico en estas condiciones, mientras que el máximo y el mínimo muestra los extremos en el consumo observado. La desviación estándar y la varianza ofrecen información sobre la dispersión de los datos, lo que ayuda a evaluar la consistencia y la estabilidad del consumo energético a lo largo de los ciclos de operación.

El análisis de estos datos es crucial para determinar el rendimiento y la eficiencia del robot en su tarea de siembra en cada velocidad. Además, proporciona una base sólida para identificar posibles áreas de mejora en el diseño y la gestión energética del sistema, con el objetivo último de optimizar su rendimiento operativo y reducir su consumo energético en futuras iteraciones y aplicaciones.

- **Primera velocidad**

Tabla 15. Datos del consumo de corriente de cada surco en primera velocidad

No. prueba	Promedio (A)
1	14.03
2	14.45
3	14.55
4	14.65
5	15.76
6	16.32
7	13.32
8	16.32
9	14.78
10	14.64
11	15.63
12	16.07
13	15.87
14	14.66
15	16.79
Promedio	15.19
Máximo	16.79
Mínimo	13.32
Desviación estándar	0.99
Varianza	0.98

- Gráfica de consumo energético del robot operando en primera velocidad (Figura 59).

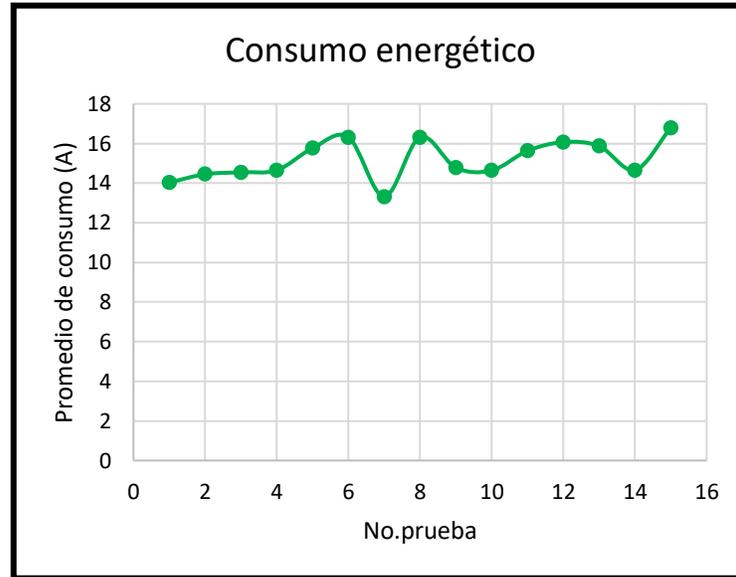


Figura 59. Gráfica del consumo energético primera velocidad

- **segunda velocidad**

Tabla 16. Datos del consumo de cada surco en segunda velocidad

No. prueba	promedio (A)
1	15.98
2	15.74
3	14.94
4	17.89
5	17.11
6	17.19
7	18.04
8	17.09
9	15.68
10	16.20
11	18.52
12	16.69
13	19.10
14	17.68

15	19.18
promedio	17.14
máximo	19.18
mínimo	14.94
desviación estándar	1.28
varianza	1.64

- Gráfica de consumo energético del robot operando en segunda velocidad (Figura 60)

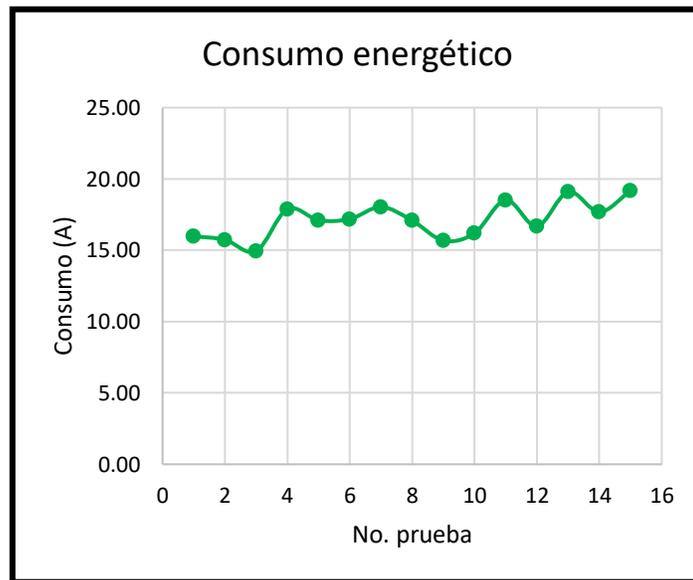


Figura 60. Gráfica del consumo energético segunda velocidad

- **tercera velocidad**

Tabla 17. Datos del consumo de cada surco en tercera velocidad

No. prueba	promedio (A)
1	18.11
2	18.93
3	20.69
4	22.15
5	21.80
6	21.91
7	20.62
8	19.71
9	17.12
10	18.92
11	18.67
12	20.21
13	19.04
14	19.51
15	26.08
Promedio	20.23
Máximo	26.08
Mínimo	17.12
Desviación estándar	2.17
Varianza	4.70

- Gráfica de consumo energético del robot operando en segunda velocidad (Figura 61)

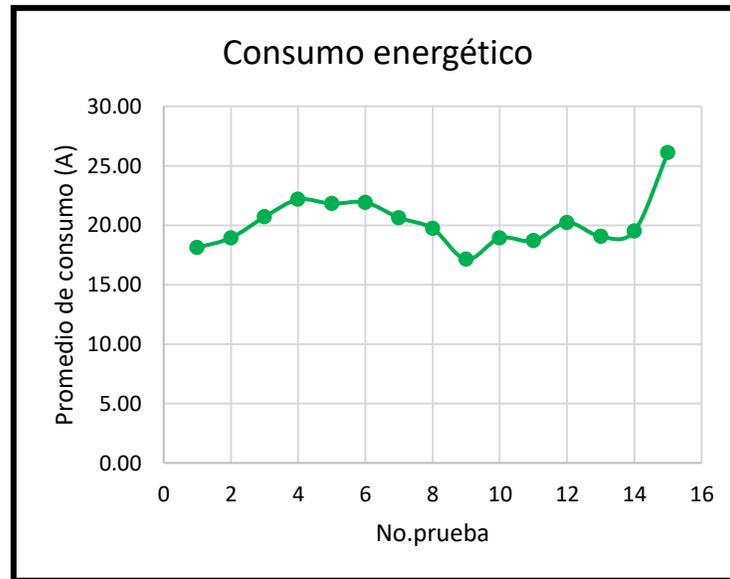


Figura 61. Gráfica del consumo energético tercera velocidad

8.1.3 Consumo energético del viraje recorridos en sus tres velocidades

Las tablas Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20 contienen los datos recopilados durante el funcionamiento del robot con su implemento sembrador en sus tres velocidades y sin carga adicional, centrándose específicamente en el consumo energético de 15 virajes. Estos datos son esenciales para comprender el rendimiento del robot en una de sus configuraciones más exigentes y relevantes para la tarea de siembra.

Además de los promedios del consumo energético, al igual que las anteriores la tabla incluye una serie de datos importantes que nos permiten profundizar en el análisis de su desempeño. Entre estos datos se encuentran los valores máximos y mínimos de consumo, que revelan los extremos observados durante las pruebas. También se proporcionan medidas de dispersión, como la desviación estándar y la varianza, que nos permiten evaluar la consistencia y la estabilidad de los consumos energéticos registrados.

Primera velocidad

Tabla 18. Datos del consumo de cada viraje en primera velocidad

No. prueba	Promedio (A)
1	17.45
2	14.98
3	14.09
4	15.9
5	16.76
6	15.99
7	14.78
8	15.98
9	15.9
10	17.09
11	16.3
12	18.97
13	19.87
14	16.76
15	16.98
promedio	16.52
Máximo	19.87
Mínimo	14.09
Desviación estándar	1.50
Varianza	2.25

- Gráfica de consumo energético de cada viraje del robot operando en primera velocidad (Figura 62)

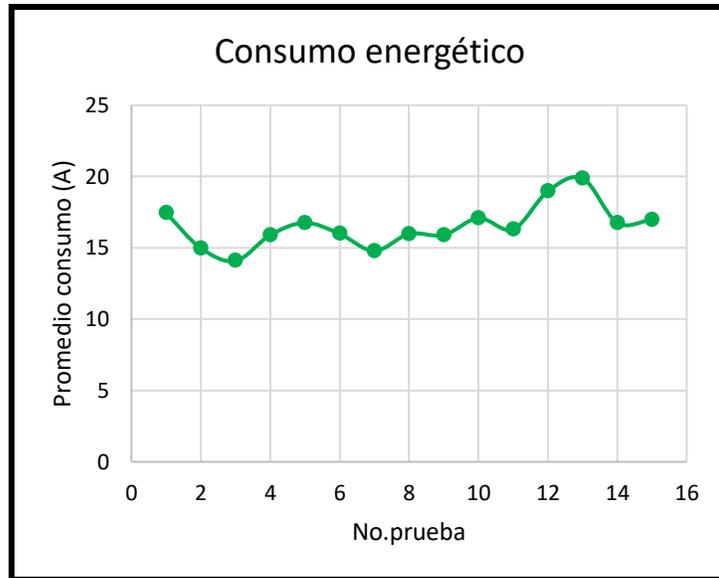


Figura 62. Gráfica del consumo energético de cada viraje en primera velocidad

Segunda velocidad

Tabla 19. Datos del consumo de cada viraje en segunda velocidad

No. prueba	Promedio (A)
1	19.62
2	16.22
3	18.56
4	19.52
5	17.87
6	16.18
7	16.08
8	16.28
9	15.99
10	17.02
11	17.24
12	16.43
13	18.28
14	16.49
15	19.98
Promedio	17.45
Máximo	19.98
Mínimo	15.99
Desviación estándar	1.42
Varianza	2.01

- Gráfica de consumo energético de cada viraje del robot operando en segunda velocidad (Figura 63)

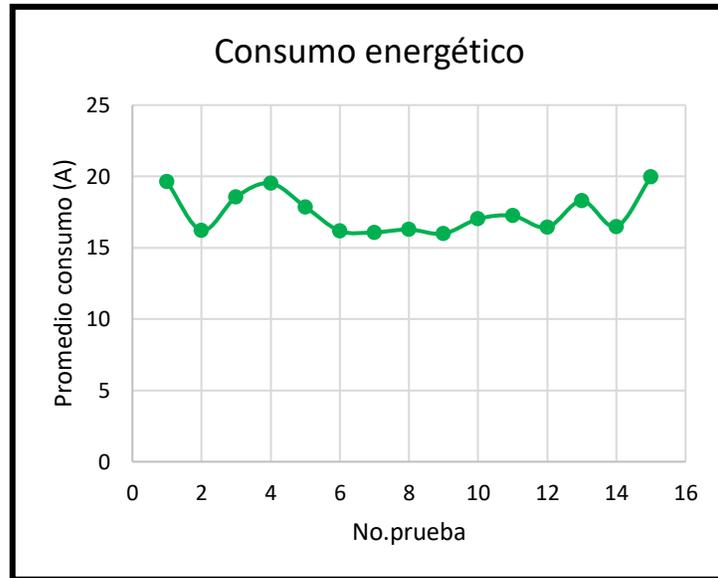


Figura 63. Gráfica del consumo energético de cada viraje en segunda velocidad

Tercera velocidad

Tabla 20. Datos del consumo de cada viraje en tercera velocidad

No. prueba	Promedio (A)
1	20.13
2	21.59
3	21.75
4	19.30
5	21.88
6	18.56
7	17.96
8	19.62
9	23.93
10	19.61
11	24.93
12	20.04
13	30.08
14	24.77
15	20.39

Promedio	21.64
Máximo	30.08
Mínimo	17.96
Desviación estándar	3.17
Varianza	10.02

- Grafica de consumo energético de cada viraje del robot operando en tercera velocidad (Figura 64)

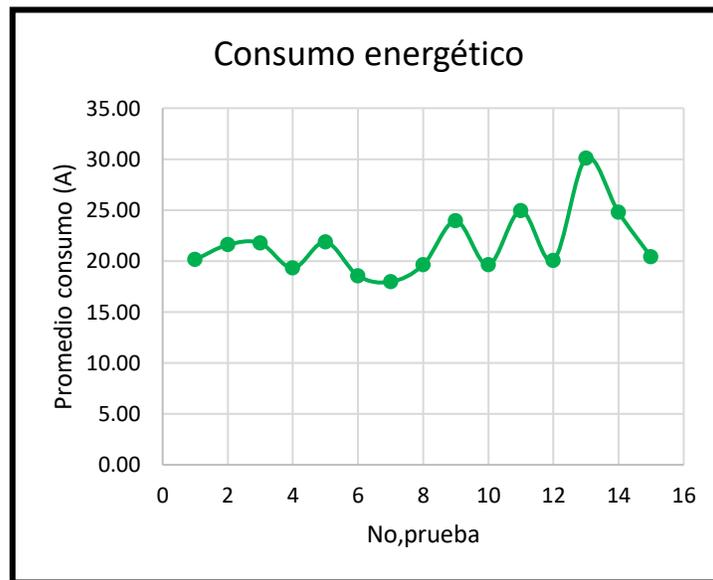


Figura 64. Gráfica del consumo energético de cada viraje en tercera velocidad

La Figura 65 exhibe un gráfico que presenta las barras de error correspondientes al consumo de energía asociado con cada velocidad operativa del robot. Estas barras proporcionan una representación visual de la variabilidad inherente en los datos en relación con su media, lo que resulta crucial para comprender tanto la dispersión de los datos como la consistencia de las mediciones del consumo energético en diversas configuraciones de velocidad. La magnitud de las barras de error sirve como un indicador clave de la precisión de las mediciones: barras de error más cortas indican mediciones más precisas, mientras que aquellas de mayor longitud sugieren una mayor variabilidad o incertidumbre en los datos recopilados. Los datos presentados

muestran claramente que la mayoría de los consumos se mantienen dentro de un rango aceptable alrededor del valor medio, lo que sugiere una estabilidad en el comportamiento del consumo energético del robot en cada una de sus velocidades.

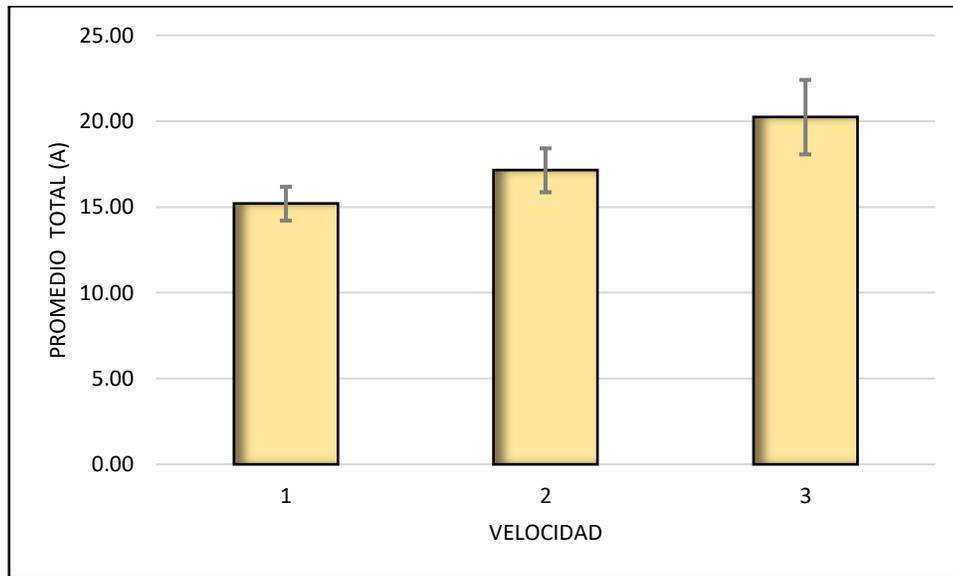


Figura 65. Barras de error del consumo energético del robot de sus tres velocidades

8.2 Consumo energético de Voltan en campo

La siguiente Tabla 21 presenta los datos obtenidos tras la realización de diversas pruebas en el campo de Chapingo, específicamente designado para este propósito. Se destaca que los amperajes mostrados durante el tiempo de descarga de la batería sin implemento no parecen ser coherentes con el tiempo de descarga con implemento. Se esperaría que sin implemento la duración fuera mayor; sin embargo, esto ocurrió debido a un manejo deficiente del robot en las primeras pruebas, especialmente en los giros, lo que provocó un alto consumo energético y, como resultado, una disminución más rápida de la carga de la batería.

Además, en la visualización se registra el número de surcos realizados en cada prueba. Es importante reconocer que, aunque algunos resultados pueden parecer inconsistentes, se deben tener en cuenta las variadas circunstancias que pueden

afectar la medición de la corriente, como las condiciones del suelo, el clima y otros factores. Sin embargo, se destaca el notable rendimiento del número de surcos alcanzados por la batería de litio en comparación con la de ácido plomo.

Tabla 21. Datos de consumo energético del robot en reposo y tiempos de descarga de la batería

Batería de ácido-plomo				
Condición	Corriente consumida (A)			
Robot en reposo sin peso y implemento	5-7			
Robot en reposo con implemento	6-8			
Robot en reposo con implemento y peso	7.5-10			
Tiempo de descargas de robot en sus tres velocidades sin implemento				
velocidad	tiempo	unidad	No. de surcos	No. de virajes
1	1.07.96	hrs.	35	34
2	49.36	min.	39	38
3	47.4	min.	43	43
Tiempo de descargas de robot en sus tres velocidades con implemento				
velocidad	tiempo	unidad	No. de surcos	No. de virajes
1	1.13.77	hrs.	40	39
2	1.09.39	hrs.	48	47
3	1.03.20	hrs.	45	45
Batería de litio				
Condición	Corriente consumida (A)			
Robot en reposo sin peso y con implemento	7.3-8.4			
Tiempo de descargas de robot con implemento				
velocidad	tiempo	unidad	No. de surcos	No. de virajes
2	1.00.97	hrs.	60	60

8.2.1 Análisis del consumo energético

Para determinar el consumo de energía del robot, se llevaron a cabo varias pruebas a diferentes velocidades. Sin embargo, se seleccionó únicamente la segunda velocidad, ya que es la más comúnmente utilizada durante la operación del robot. Por lo tanto, se realizaron mediciones de consumo en 15 surcos y 15 giros, tanto sin peso como con un peso de 10 kilogramos (representa el peso del módulo 2Kg, controlador 0.6Kg y batería 7.25Kg). Se consideró un tiempo de 65 segundos para cada surco y 33 segundos para los giros, que es el tiempo promedio que se tardaba en recorrer 50 metros, la longitud de un surco. Los datos obtenidos se presentan en las siguientes tablas.

En la Tabla 22 se muestran los promedios de consumo para distinto surco. Es decir, se registraron múltiples datos de consumo para cada surco y se calculó su promedio. Estos promedios se presentan en la tabla como el resultado del análisis de los 15 surcos.

Tabla 22. Datos obtenidos del consumo energético de cada surco

Consumo energético del robot en segunda velocidad con sembradora		
No. surco	Sin peso	Con peso (10Kg)
	promedio de cada prueba (A)	promedio de cada prueba (A)
1	15.98	20.59
2	15.74	26.66
3	14.94	18.47
4	17.89	23.53
5	17.11	24.13
6	17.19	24.08
7	18.04	19.30
8	17.09	18.59
9	15.68	17.26
10	16.20	18.16
11	18.52	22.65
12	16.69	18.98
13	19.10	22.74
14	17.68	21.86
15	19.18	23.53
promedio	17.14	21.37

8.2.2 Análisis de consumo energético cuando el robot opera con batería de ácido-plomo.

- Gráfica del consumo de Voltan en referencia a los promedios de cada surco.

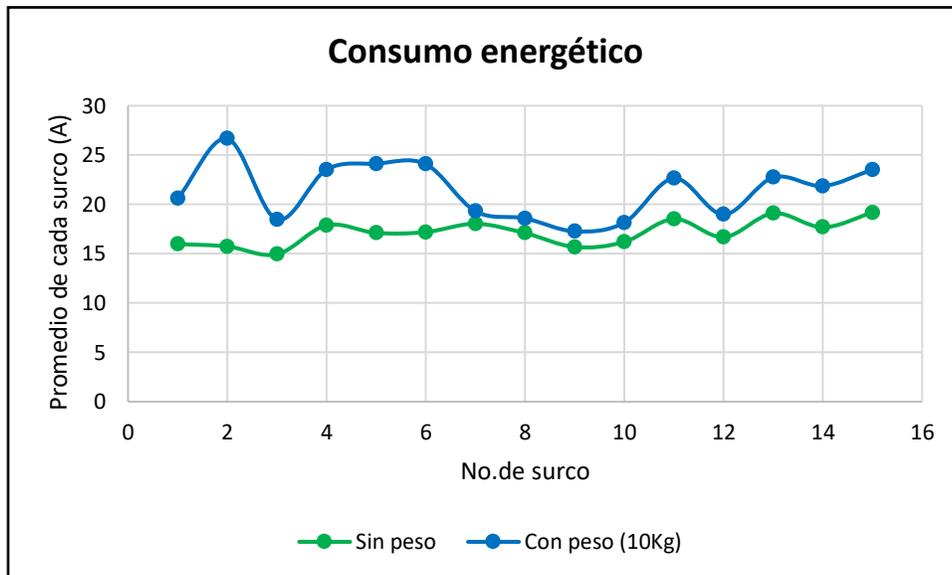


Figura 66. Grafica del consumo energético de los surcos sin y con peso

Como se muestra en la Figura 66, el consumo eléctrico del robot sin carga no superó los 20 A, mientras que con carga sí lo hizo, alcanzando los 26.66 A. Esto indica un aumento de 4.23 A en la corriente cuando se añadieron los 10 kilogramos de peso.

En la Tabla 23 se muestran los datos del consumo de los promedios obtenidos de los virajes o giros.

Tabla 23. Datos obtenidos del consumo de cada giro o viraje

Consumo energético del robot en segunda velocidad con sembradora		
No. viraje	Sin peso	Con peso (10Kg)
	promedio de cada prueba (A)	promedio de cada prueba (A)
1	19.62	23.33
2	16.22	28.47
3	18.56	21.08
4	19.52	25.56
5	17.87	25.41
6	16.18	18.75
7	16.08	17.09
8	16.28	18.88
9	15.99	16.47
10	17.02	19.75
11	17.24	18.89
12	16.43	22.74
13	18.28	22.87
14	16.49	22.86
15	19.98	25.30
promedio	17.45	21.83

- Gráfica del consumo energético de los giros del robot

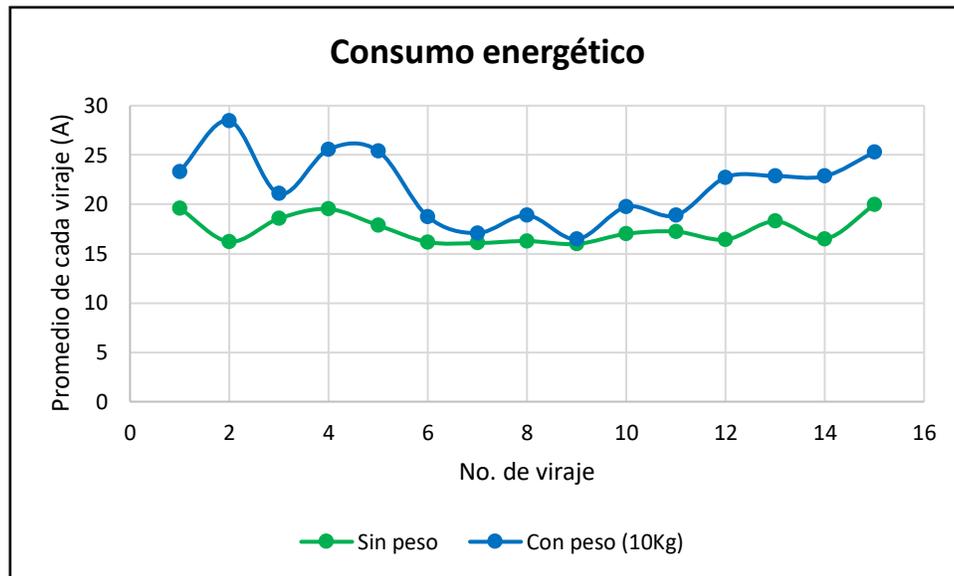


Figura 67. Grafica de los consumos de los virajes sin y con peso

Como se puede observar en la Figura 67, el consumo energético es mayor en comparación con el de los surcos, con una corriente máxima de 19.62 A sin peso y 26.66 A con peso. Esto indica un aumento de aproximadamente 4.65 A cuando se agrega un peso de 10Kg, tal como se puede apreciar visualmente en los datos presentados.

La Tabla 24 contiene los datos de los promedios de los máximo consumos que presento cada surco.

Tabla 24.Datos obtenidos del consumo máximo de cada surco

Consumo energético del robot en segunda velocidad con sembradora		
No. surco	Sin peso	Con peso (10Kg)
	Máximo de cada prueba (A)	Máximo de cada prueba (A)
1	25.50	36.40
2	24.40	37.20
3	25.30	36.50
4	24.90	29.60
5	24.10	31.60
6	25.20	31.40
7	27.90	31.10
8	27.60	30.60
9	22.00	31.80
10	23.10	31.10
11	26.20	29.60
12	25.50	34.50
13	27.30	33.70
14	23.50	33.50
15	25.00	30.70
promedio	25.17	32.62

- Gráfica de los máximos consumos de cada surco.

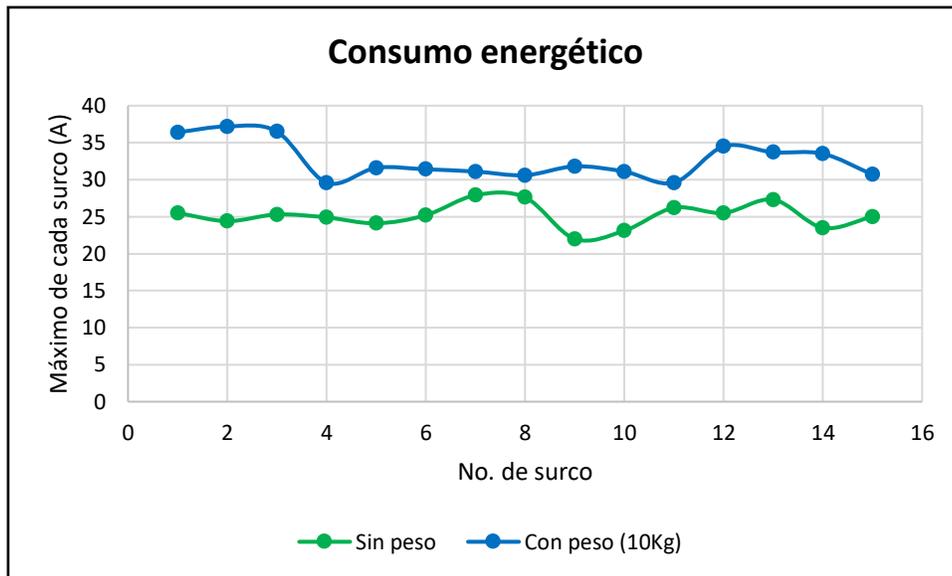


Figura 68. Grafica de los consumos máximos de cada surco sin y con peso

En la gráfica de la Figura 68 se observa una diferencia en el consumo eléctrico. Sin carga, el máximo alcanzado fue de 27.90 A, mientras que con carga alcanzó un máximo de 37.20 A. Esto muestra un aumento de corriente de 7.45 A al agregarle carga. Es importante recordar que en esta gráfica se están registrando los valores máximos de amperaje para cada surco.

La Tabla 25 contiene los datos de consumo máximos que presento cada giro con y sin peso.

Tabla 25. Datos obtenidos de los máximos de cada giro

Consumo energético del robot en segunda velocidad con sembradora		
No. viraje	Sin peso	Con peso (10Kg)
	Máximo de cada prueba (A)	Máximo de cada prueba (A)
1	39.50	50.50
2	31.20	37.00
3	24.70	42.90
4	35.50	52.40
5	32.40	39.40
6	32.40	50.10
7	26.70	29.60
8	30.40	30.80
9	19.20	33.30
10	24.20	28.10
11	34.40	40.30
12	28.30	60.20
13	25.90	32.80
14	27.20	46.90
15	34.20	32.90
promedio	29.75	40.48

- Grafica de los máximos consumos de cada viraje

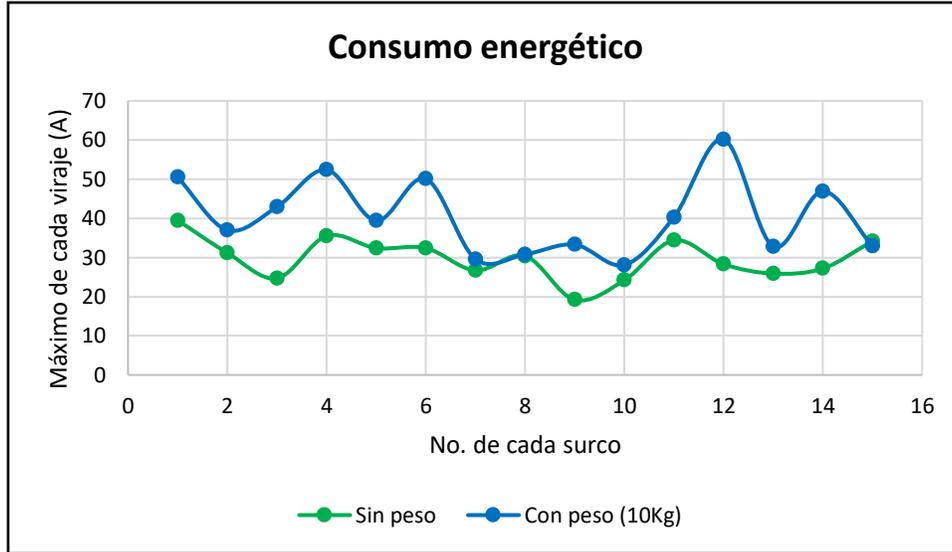


Figura 69. Grafica de los consumos máximos de cada viraje sin y con peso

En la Figura 69 se puede apreciar que, en los promedios de los máximos de cada viraje con peso, existe un aumento en el consumo energético de 10.35 A, alcanzando un máximo de 60.20 A, mientras que sin peso el máximo fue de 39.50 A

Análisis del consumo energético con diferentes pesos

La Tabla 26 presenta los datos obtenidos a partir de los promedios de cada surco, considerando diferentes condiciones de carga: sin peso, con un peso de 10 kg y otro de 15 kg. Estas mediciones proporcionan una visión detallada del rendimiento del sistema en diversas situaciones de carga, lo que permite evaluar su capacidad para realizar las labores agrícolas de manera eficiente y consistente bajo distintas circunstancias de trabajo.

Tabla 26. Datos del consumo energético de los promedios de los surcos con diferentes pesos

Consumo energético del robot en segunda velocidad con sembradora			
No. surco	Sin peso	Con peso (10Kg)	Con peso (15Kg)
	promedio de cada prueba (A)	promedio de cada prueba (A)	promedio de cada prueba (A)
1	15.98	20.59	28.43
2	15.74	26.66	27.54
3	14.94	18.47	21.74
4	17.89	23.53	25.20
5	17.11	24.13	28.79
6	17.19	24.08	27.33
7	18.04	19.30	22.67
8	17.09	18.59	21.98
9	15.68	17.26	21.21
10	16.20	18.16	20.55
11	18.52	22.65	24.91
12	16.69	18.98	20.95
13	19.10	22.74	25.13
14	17.68	21.86	26.92
15	19.18	23.53	28.59
Promedio	17.14	21.37	24.80

- Gráfica de los promedios de cada surco con diferentes condiciones de peso

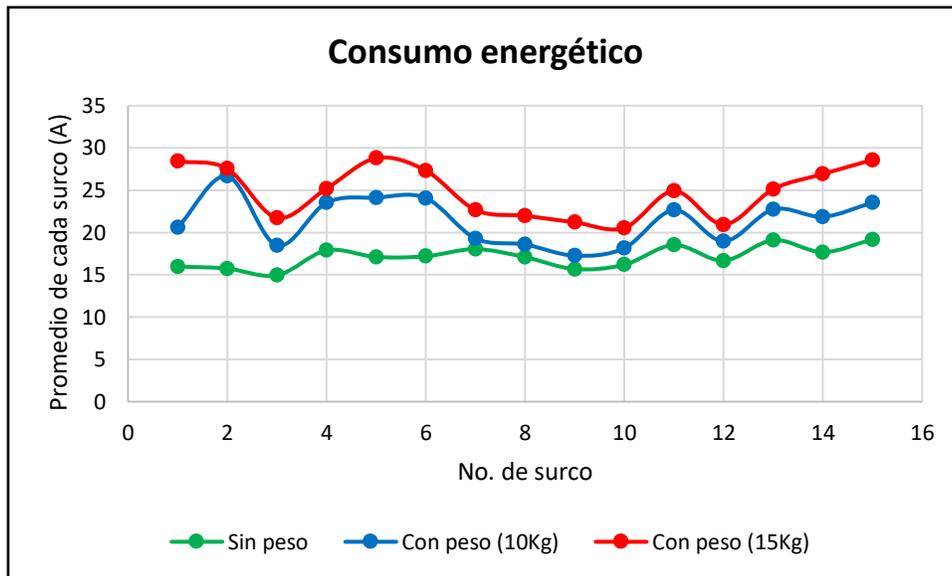


Figura 70. Gráfica de los consumos de cada surco con tres pesos

La gráfica de la Figura 70 revela una diferencia en el consumo eléctrico del sistema. En ausencia de carga, se registró un máximo de 19.18 A, mientras que con una carga de 10 kg se alcanzó un pico de 26.66 A, y con una carga de 15 kg, de 28.79 A. Estos datos ilustran un incremento en la corriente de 3.43 A con respecto a la carga de 10 kg y de 7.66 A en comparación con la ausencia de carga. Esta variación en el consumo eléctrico refleja la influencia directa del peso sobre la demanda energética del sistema, proporcionando información valiosa sobre su rendimiento bajo diferentes cargas y permitiendo ajustes precisos para optimizar su eficiencia y rendimiento en diversas condiciones de trabajo.

La Tabla 27 presenta datos relativos al consumo promedio de energía durante las maniobras de viraje bajo diversas condiciones de carga, incluyendo escenarios de carga nula, con cargas de 10 kg y 15 kg.

Tabla 27. Datos del consumo de los virajes con diferentes condiciones de carga

Consumo energético del robot en segunda velocidad con sembradora			
No. viraje	Sin peso	Con peso (10Kg)	Con peso (15Kg)
	promedio de cada prueba (A)	promedio de cada prueba (A)	promedio de cada prueba (A)
1	19.62	23.33	24.11
2	16.22	28.47	29.86
3	18.56	21.08	29.43
4	19.52	25.56	25.69
5	17.87	25.41	25.75
6	16.18	18.75	26.27
7	16.08	17.09	23.04
8	16.28	18.88	22.78
9	15.99	16.47	21.25
10	17.02	19.75	32.83
11	17.24	18.89	30.32
12	16.43	22.74	28.27
13	18.28	22.87	33.64
14	16.49	22.86	31.40
15	19.98	25.30	33.46
promedio	17.45	21.83	27.87

- Gráfica de los promedios de cada viraje con diferentes condiciones de peso

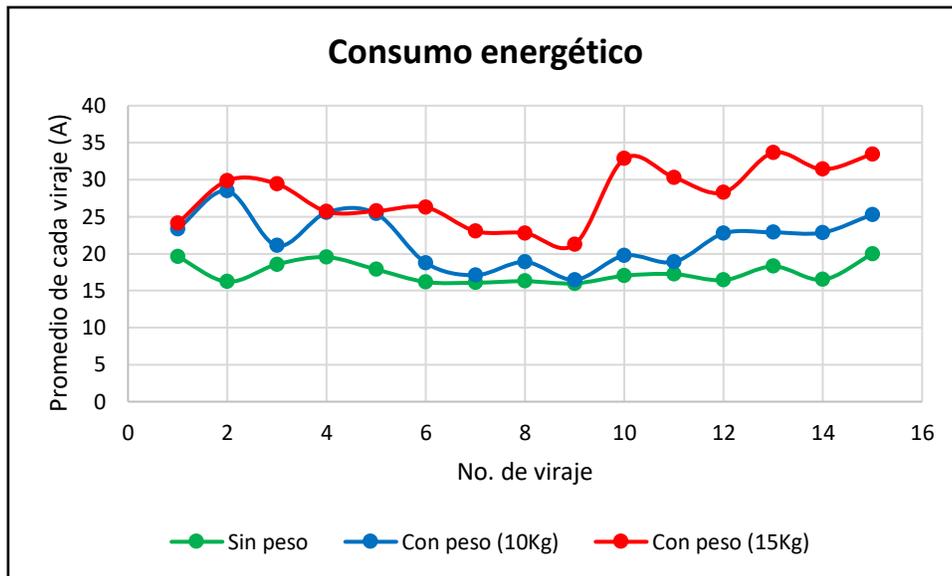


Figura 71. Gráfica de los consumos de cada viraje de tres pesos

La Figura 71 muestra una gráfica que detalla el comportamiento del incremento de la corriente en cada viraje bajo distintas cargas. Es importante destacar que este aumento de corriente se correlaciona directamente con el peso de la carga durante el viraje. Cuando no hay carga presente, se observa un aumento de corriente mínimo, con un máximo registrado de 19.62 A. Por otro lado, al introducir una carga de 10 kg, se evidencia un incremento en la corriente, alcanzando un máximo de 26.66 A. Este incremento es aún más cuando se aplica una carga de 15 kg, registrando un pico de 33.64 A. Al calcular los promedios totales de corriente para cada viraje, se revela una diferencia entre las diferentes condiciones de carga. En comparación con la condición de carga de 15 kg, el viraje con una carga de 10 kg muestra un aumento promedio de 5.6 A en la corriente. Asimismo, al contrastar con la condición sin carga, se observa un aumento en el consumo, con una diferencia promedio de 10.25 A en la corriente. Estos datos ilustran la relación directa entre el peso de la carga y el aumento correspondiente en la corriente durante los virajes, ofreciendo percepciones valiosas

para comprender mejor el comportamiento consumo energético del sistema en diferentes condiciones de carga.

La Tabla 28 contiene los datos obtenidos del consumo máximo de energía en cada surco, teniendo en cuenta diferentes condiciones de carga: sin peso, con una carga de 10 kg y con una carga de 15 kg. Estos datos proporcionan una visión exhaustiva de cómo varía el consumo eléctrico en función del peso aplicado durante las operaciones en los surcos.

Tabla 28. Datos del consumo máximo de cada surco en diferentes condiciones de carga

Consumo energético del robot en segunda velocidad con sembradora			
No. surco	Sin peso	Con peso (10Kg)	Con peso (15Kg)
	Máximo de cada prueba (A)	Máximo de cada prueba (A)	Máximo de cada prueba (A)
1	25.50	36.40	39.60
2	24.40	37.20	54.70
3	25.30	36.50	53.50
4	24.90	29.60	57.40
5	24.10	31.60	34.40
6	25.20	31.40	32.30
7	27.90	31.10	46.10
8	27.60	30.60	38.20
9	22.00	31.80	33.30
10	23.10	31.10	32.30
11	26.20	29.60	41.10
12	25.50	34.50	38.30
13	27.30	33.70	37.00
14	23.50	33.50	34.80
15	25.00	30.70	39.30
promedio	25.17	32.62	40.82

- Gráfica de los máximos de cada surco con diferentes condiciones de peso

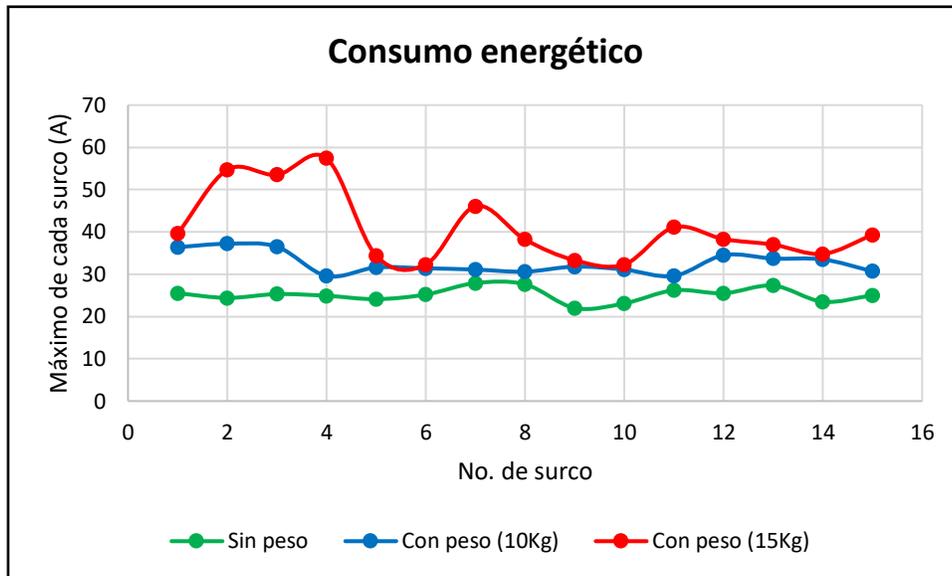


Figura 72. Grafica de los consumos máximos de cada surco con tres pesos

La Figura 72 muestra una gráfica que ilustra el aumento del consumo máximo de energía en cada surco, evaluado en tres condiciones de carga diferentes. Se destaca que el comportamiento varía significativamente según el peso aplicado. Es esencial destacar que el consumo máximo de energía se incrementa progresivamente con el aumento del peso. Por ejemplo, en ausencia de carga adicional, se registra un consumo máximo de 27.90 A. Sin embargo, al introducir una carga de 10 kg, este consumo aumenta notablemente, alcanzando un máximo de 37.20 A. Este aumento en el consumo es aún más pronunciado con una carga de 15 kg, donde se alcanza un pico de 47.40 A. Al analizar los promedios totales de consumo para cada peso, se evidencia claramente un incremento en el consumo. En comparación con la carga de 15 kg, el consumo promedio con una carga de 10 kg muestra una diferencia de 4.2 A, mientras que, respecto a la condición sin carga, la diferencia promedio es de 15.65 A. Estos datos resaltan la relación directa entre el peso aplicado y el consumo máximo de energía en cada surco, proporcionando información valiosa para comprender mejor

los requisitos energéticos y optimizar la eficiencia del sistema en diversas condiciones de carga.

La Tabla 29 contiene los datos del consumo máximo de cada viraje en distintas condiciones de carga

Tabla 29. Datos del consumo máximo de cada viraje en distintas condiciones de carga

Consumo energético del robot en segunda velocidad con sembradora			
No. viraje	Sin peso	Con peso (10Kg)	Con peso (15Kg)
	Máximo de cada prueba (A)	Máximo de cada prueba (A)	Máximo de cada prueba (A)
1	39.50	50.50	60.50
2	31.20	37.00	41.20
3	24.70	42.90	51.10
4	35.50	52.40	53.90
5	32.40	39.40	45.60
6	32.40	50.10	55.70
7	26.70	29.60	34.30
8	30.40	30.80	33.10
9	19.20	33.30	39.30
10	24.20	28.10	47.30
11	34.40	40.30	56.10
12	28.30	60.20	62.60
13	25.90	32.80	41.60
14	27.20	46.90	49.90
15	34.20	32.90	38.60
promedio	29.75	40.48	47.39

- Gráfica de los máximos de cada surco con diferentes condiciones de peso

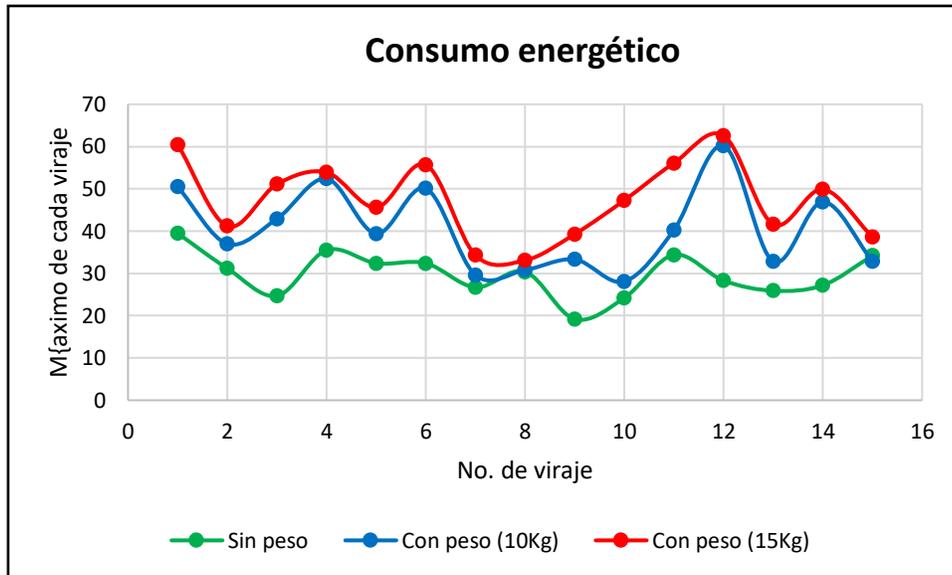


Figura 73. Grafica de los consumos máximos de cada viraje en tres pesos

La Figura 73 presenta un análisis del incremento en el consumo de energía bajo tres distintas cargas. Al considerar diferentes escenarios, se observa un claro patrón de aumento en el consumo máximo de energía. Por ejemplo, en condiciones sin carga adicional, se registra un consumo máximo de 39.50 A, reflejando el nivel mínimo de energía necesario para el funcionamiento del sistema en ese estado. Sin embargo, al introducir una carga de 10 kg, este consumo aumenta significativamente, alcanzando un máximo de 60.20 A. Este incremento es aún más marcado con una carga de 15 kg, donde se alcanza un pico de 62.60 A. Al analizar los promedios totales de consumo máximo para cada carga, se evidencia claramente una diferencia en el consumo. En comparación con la carga de 15 kg, el consumo promedio con una carga de 10 kg muestra una diferencia de 6.91 A, mientras que, en comparación con la condición sin carga, la diferencia promedio es de 17.64 A.

8.2.3 Análisis del consumo energético de la batería de litio-fosfato

La Tabla 30 presenta una recopilación detallada del consumo energético asociado a cada surco, específicamente cuando el robot opera utilizando una batería de litio-fosfato cuya ficha técnica se observa en el anexo 4. Estos datos son fundamentales para comprender el rendimiento del sistema en términos de eficiencia energética bajo esta configuración de alimentación. Al proporcionar información sobre el consumo energético en cada surco, esta tabla permite una evaluación exhaustiva de cómo la fuente de energía utilizada impacta en los requisitos operativos del robot. Además, estos datos pueden ser cruciales para la toma de decisiones en el diseño y la optimización del sistema, así como para la planificación de la gestión de energía durante las operaciones del robot en diversos entornos y condiciones de carga.

Tabla 30. Datos del consumo de cada surco con batería de litio

Batería de litio	
Consumo energético del robot en segunda velocidad y con sembradora	
No. De surco	Promedio de cada surco (A)
1	30.46
2	25.13
3	27.97
4	24.91
5	28.11
6	23.18
7	23.89
8	23.14
9	23.00
10	22.58
11	22.10
12	22.29
13	21.06
14	21.56
15	23.04
promedio	24.16

- Gráfica del consumo de cada surco con batería de litio-fosfato

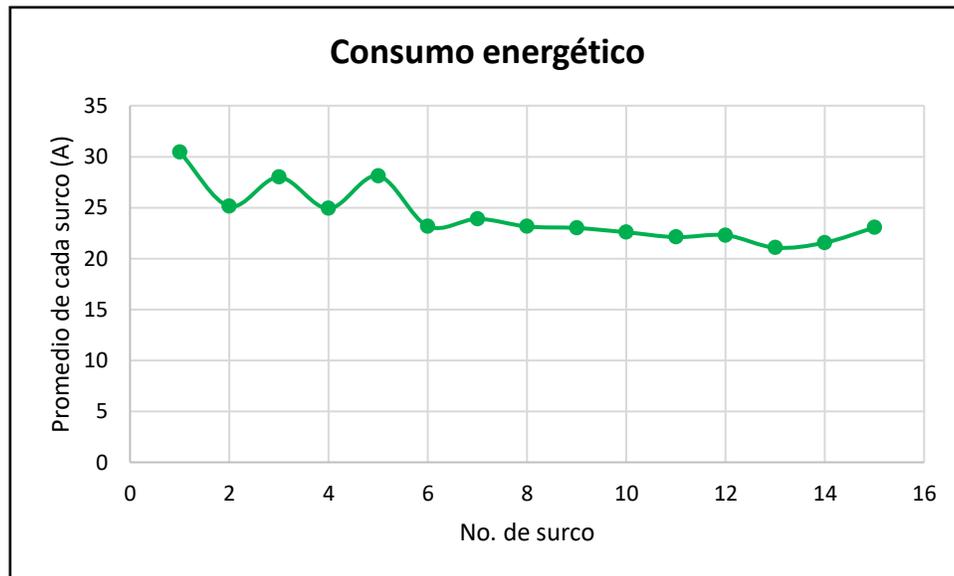


Figura 74. Gráfica del consumo de cada surco utilizando una batería de litio

En la Figura 74 se aprecia una representación gráfica del consumo energético del robot cuando opera utilizando una batería de litio. Este gráfico permite una visualización clara de los niveles de consumo de corriente durante el funcionamiento del robot. Se destaca que se observa un rango de consumo bastante significativo, con un máximo registrado de 30.46 A y un mínimo de 21.06 A. Es importante señalar que estos valores representan los promedios de cada surco, lo que significa que reflejan el consumo medio de corriente a lo largo de un período de una distancia específica (50m). Estos datos proporcionan una visión detallada de cómo varía el consumo de energía del robot en diferentes momentos y condiciones operativas. Además, ofrecen información valiosa para evaluar la eficiencia energética del robot y optimizar su rendimiento en términos de gestión de energía y autonomía durante las operaciones en el campo.

La Tabla 31 contiene los datos de consumo de cada viraje cuando el robot opera con una batería de litio-fosfato

Tabla 31. Datos del consumo de cada viraje con batería de litio

Batería de litio	
Consumo energético del robot en segunda velocidad y con sembradora	
No. de viraje	Promedio de cada viraje (A)
1	22.20
2	21.21
3	20.20
4	17.89
5	23.90
6	16.61
7	22.26
8	20.23
9	24.74
10	26.67
11	15.66
12	19.33
13	17.44
14	22.01
15	17.51
promedio	20.52

- Gráfica del consumo de cada surco con batería de litio-fosfato

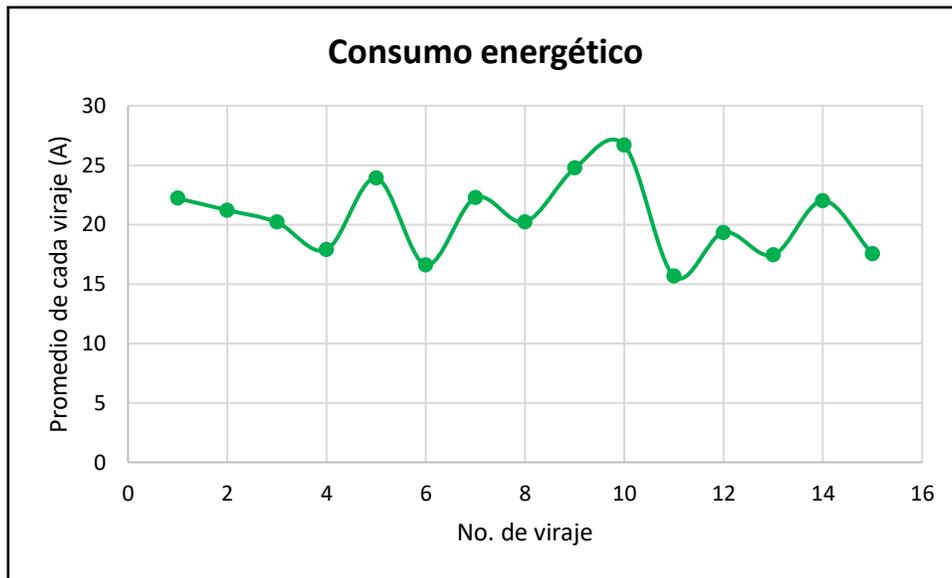


Figura 75. Grafica del consumo de cada viraje operando con batería de litio

La Figura 75 presenta una gráfica detallada que ilustra los consumos de energía durante los virajes del robot cuando está alimentado por una batería de litio-fosfato. Esta representación visual ofrece una visión clara de los niveles de corriente registrados en diferentes momentos durante los virajes. Se destaca que se observa un rango de consumo variado, con un pico máximo de corriente de 26.74 A y un mínimo de 15.66 A. Estos valores reflejan las fluctuaciones en la demanda de energía del robot mientras realiza las maniobras de viraje. Es importante tener en cuenta que estos datos proporcionan información crucial para evaluar la eficiencia energética del robot en esta configuración de alimentación. Además, ofrecen puntos de referencia para el diseño y la optimización del sistema, así como para la planificación de la gestión de energía durante las operaciones del robot en diferentes escenarios y condiciones de carga.

La Tabla 32 contiene los datos obtenidos de los consumos máximos de cada surco cuando el robot opera con una batería de litio-fosfato.

Tabla 32. Datos del consumo máximo de cada surco cuando el robot opera con una batería de litio-fosfato

Batería de litio	
Consumo energético del robot en segunda velocidad y con sembradora	
No. De surco	Máximo de cada surco (A)
1	56.80
2	40.70
3	41.80
4	34.60
5	43.70
6	33.80
7	35.30
8	46.30
9	32.70
10	34.20
11	36.30
12	34.00
13	28.00
14	32.10
15	37.10
promedio	37.83

- Gráfica del consumo máximo de cada surco con batería de litio-fosfato

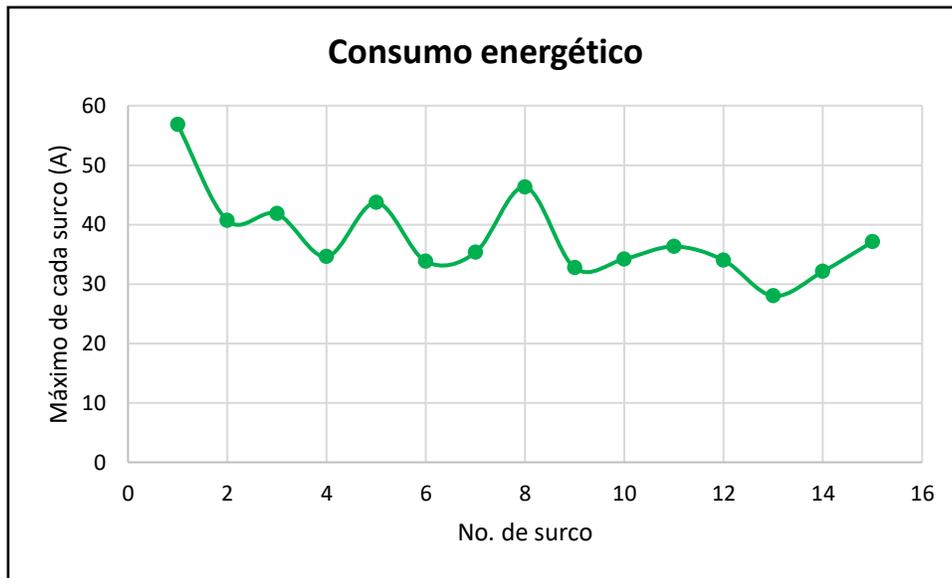


Figura 76. Grafica de los consumos máximos de cada surco con batería litio

La Figura 76 proporciona un resumen visual de los promedios de los consumos máximos de energía registrados en cada surco realizados por el robot mientras opera con una batería de litio. Este conjunto de datos ofrece una visión consolidada de la demanda de corriente en distintos momentos durante el funcionamiento del robot. Se destaca que se observa un rango notablemente amplio de consumos máximos, con un pico máximo de corriente de 56.80 A y un mínimo de 28 A. Estos valores representan los niveles medios de consumo de energía durante los diferentes surcos realizados por el robot. Es crucial tener en cuenta que estos promedios proporcionan una medida útil para evaluar la carga máxima a la que se somete el sistema en diversas operaciones.

La Tabla 33 contiene los datos de los promedios de los máximos consumos de cada viraje cuando el robot opera con una batería de litio-fosfato.

Tabla 33. Datos del consumo máximo de cada viraje cuando el robot opera con una batería de litio

Batería de litio	
Consumo energético del robot en segunda velocidad y con sembradora	
No. De viraje	Máximo de cada viraje (A)
1	47.40
2	36.30
3	27.00
4	34.40
5	42.20
6	29.30
7	35.50
8	40.30
9	37.40
10	44.60
11	18.50
12	25.60
13	34.50
14	36.10
15	26.70
promedio	34.39

- Gráfica del consumo máximo de cada viraje con batería de litio-fosfato.

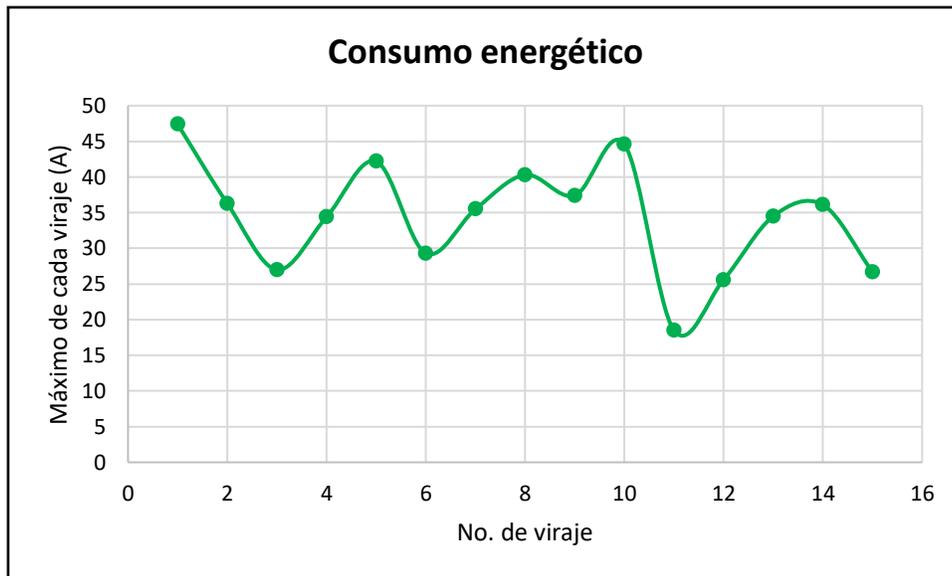


Figura 77. Grafica de los consumos máximos de cada viraje con batería de litio

La Figura 77 presenta una representación gráfica que resume los promedios de los consumos máximos de energía registrados en cada viraje realizado por el robot, mientras opera con una batería de litio. Esta gráfica proporciona una visión general de la demanda de corriente a lo largo de los diferentes virajes ejecutados por el robot. Se destaca que se observa un amplio rango de consumos máximos, con una corriente máxima registrada de 47.40 A y una mínima de 18.50 A. Estos valores representan los niveles medios de consumo de energía durante los virajes. Es importante señalar que estos promedios ofrecen una perspectiva útil para comprender la carga máxima experimentada por el sistema en diversas operaciones de viraje. Además, esta información es esencial para evaluar la eficiencia energética del robot cuando opera con una batería de litio, lo que puede ser fundamental para mejorar su rendimiento y autonomía en el terreno.

9. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- 1) El análisis del consumo energético del robot agrícola Voltan revela un nivel alto de consumo, evidenciado por una rápida descarga de las baterías. Además, se observa una variabilidad considerable en el consumo, atribuible a las condiciones de operación en terrenos agrícolas, caracterizados por desniveles y obstáculos como rocas. Los resultados resaltan que los giros representan el mayor consumo energético. Además, se identifica que el comportamiento del operador influye de manera significativa. En las primeras pruebas, se constató que los giros rápidos agotaron las baterías de forma más acelerada, incluso en comparación con la operación con la sembradora acoplada. En consecuencia, se concluye que el consumo energético del robot está directamente vinculado con la destreza y técnica del operador durante su manejo.
- 2) A primera vista, se observó que la adición de un peso propuesto de 10 kg resulta en un aumento del consumo energético. Sin embargo, este incremento, en promedio del 22.72 %, no se considera sustancial. Por consiguiente, se estima que el sistema fotovoltaico autónomo al que se le atribuye este peso no tendrá un impacto significativo ni afectará de manera considerable al consumo energético del robot.

La primera propuesta para cargar la batería auxiliar no cumplió con las expectativas, ya que tanto la utilización de los módulos convencionales disponibles en el mercado como la implementación del módulo de perovskita no ofrecían amplios beneficios. Los primeros módulos requerían aproximadamente 9 horas y 30 minutos para cargarse en condiciones óptimas, y considerando otros factores como el clima, este tiempo de carga podría prolongarse aún más. El módulo tándem, por otro lado, solo reducía dos horas el tiempo de carga en condiciones óptimas.

Es importante destacar que el robot, operando de manera autónoma, tiene una duración máxima de funcionamiento de una hora y 15 minutos. Esto indica que la descarga de la batería sería considerablemente más rápida. Por lo tanto, se propuso la implementación de más módulos solares tándems adecuados a la geometría desocupada del robot para aprovechar toda el área disponible. Se llevaron a cabo pruebas adicionales con 15 kg de carga, considerando que es el peso del sistema fotovoltaico propuesto. Se observó que el incremento de consumo fue del 36.11 %, pero aun con este aumento, el tiempo de descarga solo se vio afectado por pocos minutos ya que el tiempo aproximado para realizar 15 surcos y virajes sin peso fue de 13.50 min y con los 15Kg fue de 19.18min. La implementación de este sistema logró reducir el tiempo de carga de la batería de aproximadamente de dos horas y media, manteniendo la eficiencia actual de los módulos y en condiciones óptimas.

Sin embargo, para lograr el cumplimiento del tiempo de carga previsto, se propuso implementar un mecanismo adicional en los módulos de geometría trapecial y en los de menor dimensión. Este mecanismo se diseñará con el propósito de proporcionar una elevación óptima, asegurando que la eficiencia del proceso de abastecimiento no se vea comprometida, y así garantizar que la batería alcance su carga completa dentro del período calculado. En resumen, se concluyó que este mecanismo resolvería la pérdida de eficiencia que pudiera presentarse si siempre los módulos de geometría trapecial estuvieran fijados en los laterales, ofreciendo así una solución efectiva para optimizar su funcionamiento durante el proceso del suministro de energía a la batería. Este diseño se ideó especialmente para su uso durante el reposo del robot, ya que podría provocar un aumento en el consumo debido a la fuerza de rozamiento sobre los módulos desplegados

Además, se llevó a cabo una comparación entre el tiempo requerido para cargar la batería utilizando energía eléctrica y el tiempo estimado con el sistema fotovoltaico propuesto. La diferencia entre ambos métodos es mínima, con un tiempo promedio de carga de 1.2 horas utilizando electricidad. Esto subraya la eficacia del sistema fotovoltaico propuesto en términos de rendimiento y sostenibilidad. La implementación de esta solución contribuiría significativamente al aspecto ambiental del robot agrícola, posicionándolo como un proyecto amigable con el medio ambiente y alineado con las demandas actuales de sostenibilidad, lo cual es cada vez más relevante en los proyectos actuales.

- 3) Se destaca el notable rendimiento del número de surcos alcanzados por la batería de litio con fosfato en comparación con la de ácido plomo. Durante una hora, la batería de litio-fosfato logró completar sesenta surcos, en contraste con la otra batería que solo alcanzó un máximo de cuarenta y ocho surcos, a pesar de tener una capacidad nominal de 26Ah y la de litio 18Ah, además de que su carga con el sistema fotovoltaico propuesto sea de una hora sesenta y cinco minutos. Evidenciando una diferencia significativa en el rendimiento y la eficiencia entre ambos tipos de baterías, lo que resalta el potencial superior de la tecnología de litio en aplicaciones agrícolas. De manera que, al integrar una batería de litio en el sistema, se optimiza la eficiencia y la durabilidad del mismo, permitiendo una carga más rápida y una mayor capacidad de almacenamiento de energía. Esto se traduce en un rendimiento mejorado y una mayor autonomía para el sistema, lo que lo hace especialmente adecuado para aplicaciones donde se requiere una alta movilidad y una larga duración de la batería, como en el caso del robot.

En resumen, se logró alcanzar el primer objetivo al proporcionar una descripción de cada dispositivo electrónico que integra el robot. Además, se cumplió con el segundo objetivo al realizar pruebas con el robot equipado con su implemento sembrador, lo que permitió obtener el cálculo energético correspondiente. Respecto al tercer objetivo, este también se cumplió satisfactoriamente, ya que las pruebas realizadas permitieron examinar el rendimiento de las baterías de ácido plomo, las cuales mostraron un rendimiento inferior en comparación con la batería de litio-fosfato que se utilizó en las correspondientes pruebas. Asimismo, el cuarto objetivo se alcanzó, dado que, al conocer el consumo energético del robot, se pudo evaluar teóricamente, mediante cálculos estadísticos, el consumo potencial del robot si se implementara una fuente de energía fotovoltaica, como sería en el caso del sistema autónomo propuesto. Por último, el quinto objetivo presentó inicialmente mayores dificultades, ya que se determinó que un solo módulo fotovoltaico no sería suficiente, siendo necesario implementar un sistema compuesto por cinco módulos para satisfacer las necesidades energéticas del robot de manera óptima.

Como recomendaciones, se sugiere en primer lugar considerar la sustitución de las baterías actuales por otras de tecnología más eficiente, como las de litio. Además, del sistema fotovoltaico autónomo propuesto si se desea incrementar la eficiencia energética suministrada al robot se propone un sistema automatizado de seguimiento solar o adoptar por fuentes alternativas a las convencionales se puede optar por la implementación de un centro de carga solar o eólico dependiendo de la zona. Se podría incluso proponer a los agricultores la creación de centros de carga cercanos a sus campos agrícolas para facilitar la recarga del robot, o bien como se mencionó en la presente tesis implementar la energy harvesting.

Además, se plantea la implementación de un sistema autónomo de seguimiento solar para los módulos de la segunda propuesta abordada en esta tesis. Este enfoque representa un avance significativo al dotar a los módulos con la capacidad de ajustarse dinámicamente para seguir la trayectoria del sol a lo largo del día. Esta solución autónoma garantizaría una captura óptima de energía solar en todo momento, maximizando así la eficiencia del sistema. Al integrar esta tecnología de seguimiento

solar, los módulos serían capaces de adaptarse continuamente a las condiciones cambiantes de la luz solar, lo que resultaría en un rendimiento mejorado y una mayor producción de energía limpia y sostenible.

Así mismo es fundamental destacar en el manual de usuario el alto consumo energético que puede experimentar el robot si no se opera correctamente, incluso en el caso de que sea autónomo. Es crucial tener en cuenta esta consideración al automatizar el proceso, ya que un manejo inadecuado puede tener un impacto significativo en la eficiencia y la vida útil del equipo.

10. Referencias

- [1] J.L. Blariaux Dominique, “Guía para la implementación del proceso de recuperación del sector agrario”, Luxemburgo, jul. 2021.
- [2] Cortés M. Elkin Cortés, Álvarez M. Fernando, y González S. Hugo, “la mecanización agrícola: gestión, selección y administración de la maquinaria para las operaciones de campo”, Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia, vol. 4, núm., Colombia, el 2 de diciembre de 2009.
- [3] Reyes Amador y Velázquez López Noe, “Sistema de suspensión para vehículos terrestres autónomos o no autónomos”, Patente No. MX 4369 B, 2020
- [4] Márquez Javier, “Los tractores tienen competencia en el campo: el Solix, un robot solar que esparce herbicidas, es la prueba”.
- [5] Cinco Noticias Redacción, “EcoRobotix, el robot agrícola autónomo y ecológico”, <https://www.cinconoticias.com/ecorobotix-robot-agricola-autonomo-y-ecologico/>.
- [6] Emiliano Bellini, “Segadora robotizada con energía solar para viñedos”, : <https://www.pv-magazine.es/2022/02/25/segadora-robotizada-con-energia-solar-para-vinedos/>.
- [7] Reimondo Gustavo, “robot desmalezador con rayo láser y vapor de agua sin agrotóxicos”, <https://humanizationoftechnology.com/robot-desmalezador-con-rayo-laser-y-vapor-de-agua-sin-agrotoxicos/revista/2020/volumen-1-2020/03/2020/>, el 5 de marzo de 2020.
- [8] Martín Olmos Leandro, “FARMDROID FD20, el robot autónomo para siembra y deshierbe mecánico”, <https://www.tecnologiahorticola.com/farmdroid-fd20-el-robot-autonomo-siembra-deshierbe-mecanico/>.
- [9] Bechar Avital y Vigneault Clément, “Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems”, en Biosystems Engineering, ISSN 1537-5110., vol. 153, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.11.004.>, 2017, pp. 110–128.
- [10] Berrocal Aguilar Mónica Elizabeth, “caracterización eléctrica de robot agrícola y propuesta de diseño del centro de carga fotovoltaica”, Universidad Autónoma Chapingo, México, 2023.

- [11] Gutiérrez Corona Gustavo, De la Mora Gálvez Alberto, Galván Morales Enrique, y Cárdenas Rodríguez Roberto, “Automatización”, 6a ed., vol. 6, Guadalajara, 2010, pp. 5–306.
- [12] RIIPSA, “Automatización”.
- [13] Padrón Jabib Fernando Antonio, “manual de baterías y acumuladores”, 2013.
- [14] Buitrón Proaño Ricardo David y Burbano Gube Gisela, “elaboración de una normativa para el diseño y diagnóstico de sistemas fotovoltaicos residenciales autónomos para el ecuador”, Politécnica Nacional, Ecuador, 2010.
- [15] Rodríguez Augusto, Ortiz Mariela, y Thomas Jorge, “Baterías de ion litio: presente y futuro”, argentina, 2020.
- [16] Da Deng, “Li-ion batteries: basics, progress, and challenge”, en *Energy Science and Engineering*, 5a ed., vol. 3, 2015, pp. 385–318.
- [17] Chen Yuanwei, “Sistema De Energía Solar”, *Battery Structure*. el 25 de abril de 2014.
- [18] M. Cruz Acero y J. Esteve, “Energía ambiental (energy harvesting)”, 2012. [En línea]. Disponible en: www.energia2012.es
- [19] SolarProfit, “Energy Harvesting o los métodos para captar energía ambiental”, <https://solarprofit.es/es/blog/energy-harvesting-captacion-energia-ambiental/#None>.
- [20] Perpiñán Lamigueiro Oscar, “Sistemas Fotovoltaicos Autónomos”, 2023. [En línea]. Disponible en: <http://oscarperpinan.github.io>
- [21] enciclopedia de energía, “Célula fotovoltaica”, https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/C%C3%A9lula_fotovoltaica.
- [22] Arenas Sánchez Danny Andrés y zapata castaño Hodman Steven, “libro interactivo sobre energía solar y sus aplicaciones”, universidad tecnológica de Pereira, 2011.
- [23] Chen Julian, “Physics of Solar Energy”, en *Physics of Solar Energy*, vol. 1, 2011, pp. 1–370.
- [24] Prados García Federico y Vico Romero David, “Robótica y energía solar (Robots solares)”, dic. 2002.

- [25] Mártil Ignacio, “Perovskitas, ¿el ‘Santo Grial’ de la energía solar?”, <https://elperiodicodelaenergia.com/perovskitas-el-santo-grial-de-la-energia-solar/>.
- [26] Mártil de la plaza Ignacio, “Hacia un nuevo paradigma fotovoltaico: el tándem de silicio y perovskita”, nov. 2022.
- [27] López Suárez Patricia, “Materiales de perovskita, útiles para eficientar las celdas solares”, oct. 2023.
- [28] N. Suresh Kumar y K. Chandra Babu Naidu, “A review on perovskite solar cells (PSCs), materials and applications”, *Journal of Materiomics*, vol. 7, núm. 5, pp. 940–956, Sep. 2021, Doi: 10.1016/J.JMAT.2021.04.002.
- [29] S. Ameen, M. S. Akhtar, H. S. Shin, y M. K. Nazeeruddin, “Charge-Transporting Materials for Perovskite Solar Cells”, *Adv Inorg Chem*, vol. 72, pp. 185–246, ene. 2018, doi: 10.1016/bs.adioch.2018.05.009.
- [30] Q. Zhu *et al.*, “Enhanced carrier separation efficiency and performance in planar-structure perovskite solar cells through an interfacial modifying layer of ultrathin mesoporous TiO₂”, *J Power Sources*, vol. 465, p. 228251, Jul. 2020, Doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2020.228251.
- [31] Z. Yang, W. Chen, A. Mei, Q. Li, y Y. Liu, “Flexible MAPbI₃ perovskite solar cells with the high efficiency of 16.11% by low-temperature synthesis of compact anatase TiO₂ film”, *J Alloys Compd*, vol. 854, p. 155488, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.JALLCOM.2020.155488.
- [32] Q. Hu *et al.*, “Improving Efficiency and Stability of Perovskite Solar Cells Enabled by A Near-Infrared-Absorbing Moisture Barrier”, *Joule*, vol. 4, núm. 7, pp. 1575–1593, jul. 2020, doi: 10.1016/J.JOULE.2020.06.007.
- [33] P. Löper *et al.*, “Organic–Inorganic Halide Perovskites: Perspectives for Silicon-Based Tandem Solar Cells”, *IEEE J Photovolt*, vol. 4, núm. 6, pp. 1545–1551, 2014, doi: 10.1109/JPHOTOV.2014.2355421.
- [34] Q. Wali, N. K. Elumalai, Y. Iqbal, A. Uddin, y R. Jose, “Tandem perovskite solar cells”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 84, pp. 89–110, mar. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2018.01.005.
- [35] F. Miha *et al.*, “CH₃NH₃PbI₃ perovskite / silicon tandem solar cells: characterization based optical simulations”, *Opt. Express*, vol. 23, núm. 7, pp. A263–A278, abr. 2015, doi: 10.1364/OE.23.00A263.

- [36] A. S. Shikoh et al., "Assessing mobile ions contributions to admittance spectra and current-voltage characteristics of 3D and 2D/3D perovskite solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 215, p. 110670, sep. 2020, doi: 10.1016/J.SOLMAT.2020.110670.
- [37] Acosta Sandra, "El perovskita se posiciona para doblegar al silicio en los paneles solares del futuro", <https://elperiodicodelaenergia.com/la-perovskita-se-posiciona-para-doblegar-al-silicio-en-los-paneles-solares-del-futuro/>.
- [38] Cambio energético, "Diferencias entre paneles monocristalinos, policristalinos y de película delgada"
- [39] Sebastián Eliseo, "Precio de materiales para hacer panel solar", <https://eliseosebastian.com/precio-de-materiales-para-hacer-panel-solar>.
- [40] López Redondo Noelia, "Ventajas del perovskita frente al silicio en las placas solares", <https://www.energynews.es/las-ventajas-de-la-perovskita-frente-al-silicio-en-las-placas-solares/>.
- [41] MexicoNow, "proyecto para desarrollar celdas solares de última generación", <https://www.elfinanciero.com.mx/border/2023/04/24/hagase-la-luz-dan-1125-mdd-a-proyecto-para-desarrollar-celdas-solares-de-ultima-generacion/>.
- [42] Zabia Matías S., "Nuevo récord de eficiencia de un panel solar gracias al perovskita. El 'material milagroso' supera ya el límite teórico de los paneles convencionales".
- [43] Foehringer Merchant Emma, "La carrera por comercializar la tecnología solar de perovskita en tándem", <https://www.technologyreview.es/s/16111/la-carrera-por-comercializar-la-tecnologia-solar-de-perovskita-en-tandem>.
- [44] Hernández Emiliana, "los retos de la agricultura en México: un laberinto de desafíos y oportunidades", <https://quo.mx/mexico/los-retos-de-la-agricultura-en-mexico/>.
- [45] Vivas Alberto, "Diferencias, ventajas y desventajas de las Baterías de litio frente a las de Plomo ácido.", <https://www.linkedin.com/pulse/diferencias-ventajas-y-desventajas-de-las-baterias>.
- [46] Diario Oficial de la Federación, "decreto por el que se aprueba el Acuerdo de París, adoptado en la Ciudad de París, Francia, el 12 de diciembre de 2015.", pdf.
- [47] Naciones Unidas, "Acuerdo de París", 2015.

[48] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, “Con tecnología y conocimiento, el campo responderá a las nuevas necesidades de alimentación del mundo”, obregón, nov. 2022.

11. Anexos

Anexo 1. Modulo fotovoltaico de silicio policristalino





Celdas de Alta Calidad

Encapsuladas en EVA transparente y vidrio templado de 4 mm. La parte posterior del módulo está protegida con una hoja de TEDLAR resistente a los rayos UV. Los laminados están montados en un marco de aluminio anodizado, asegurando una máxima protección.

Aplicaciones:

- Estaciones repetidoras de radiocomunicación.
- Electrificación en zonas rurales.
- Sistemas de comunicación en emergencias.
- Alimentación de equipos médicos en zonas rurales.
- Sistemas de bombeo de agua.
- Luces de obstrucción para tráfico aéreo.
- Sistemas de protección catódica.
- Señalización de vías ferroviarias.

Garantía

5 años de garantía contra defectos de fabricación.



Especificaciones Técnicas

Potencia máxima (Pm)	50 W (±3%)
Máximo Voltaje (Vmp)	17.9 V (±3%)
Máximo Amperaje (Imp)	2.79 A (±3%)
Voltaje a circuito abierto (Voc)	22.1 Vcc (±3%)
Corriente a corto circuito (Isc)	2.94 A (±3%)
Dimensiones	530 x 670 x 25 mm
Peso	3.6 kg
Temperatura ambiente	-40 a 80 °C
Máximo voltaje del sistema	600 Vcc

Nota: Las especificaciones eléctricas se indican bajo una irradiancia de 1000 W/m² y temperatura de 25 °C.

www.syscom.mx

Anexo 2. Modulo fotovoltaico de silicio monocristalino

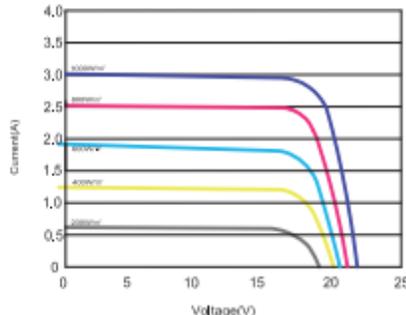


MESM-50W

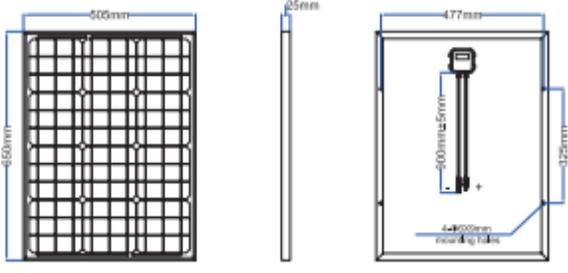
Monocrystalline Solar Panel Grade A



Characteristics



Module Diagram



Electrical Characteristics	
Product code	MESM-50W
Maximum power (P _{max})	50W
Voltage at P _{max} (V _{mp})	17.8
Current at P _{max} (I _{mp})	2.81
Open-circuit voltage (V _{oc})	22.3
Short-circuit current (I _{sc})	3.03
Power temperature coefficient	-0.41%/°C
Voltage temperature coefficient	-0.31%/°C
Current temperature coefficient	+0.05%/°C
Cells Efficiency(%)	18.43%
The maximum system voltage	600VDC(IEC)
Output power tolerance	±3%

Specifications	
Cells	Germany A grade Solarworld solar cell
No. of cells and connections	36(3X12)
Module dimension	650*505*25mm
Weight	3.7KG
Certification	CE,RoHS,ISO

www.me-energy.eu

Anexo 3. Batería de ácido plomo modelo MHB



Características del producto

Características principales

Marca del producto electrónico

MHB

Descripción

BATERIA RECARGABLE 12V/26AH MHB Ms 26-12

Medidas:

Largo 17.5 cm

Ancho 16.6 cm

Alto 12.5 cm

Peso: 7.25 kg

Anexo 4. Batería de litio



Tamaño:	12V 18Ah
Marca	XZNY
Tipo de servicio automotriz	Barco
Tamaño	12V 18Ah
Voltaje	12,8 voltios
Composición de las celdas de batería	Litio-Fosfato
Peso del producto	1,95 kilogramos
Terminal	Borne AGM