

Sistema electrónico para el funcionamiento de un minitractor fotovoltaico en pequeños terrenos de agricultura

Jeremías Bravo Tapia¹
Francisco Ramos Guzmán²
Miguel Fuentes Cortés³
Ana Laura Nieto Rosales⁴
Julio Cesar Rojas Nando⁵
Graciela Santos Martínez⁶

Cítese como: Bravo-Tapia, J., Ramos-Guzmán, F., Fuentes-Cortés, M., Nieto-Rosales, A. L., Rojas-Nando, J. C. y Santos-Martínez, G. (2023). Sistema electrónico para el funcionamiento de un minitractor fotovoltaico en pequeños terrenos de agricultura. En R. G. Moran-Perafán, F. C. Gómez-Meneses, T.M. Piamba-Mamian, F. A. Guasmayán-Guasmayán, A. L. Ibarra-Ordoñez y E. M. Moncayo-Torres (comps.), *Tecnología e Innovación: el camino a la transformación productiva* (pp. 43-60). Editorial UNIMAR. <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.173.c262>

Resumen

La energía fotovoltaica es aprovechada como fuente de alimentación de dispositivos electrónicos, una de las aplicaciones se presenta en el sector agroindustrial al ser utilizada en el sistema eléctrico o electrónico de tractores, minitractores, motocultores, etc. En esta investigación, se presenta un sistema electrónico propuesto para el funcionamiento de un minitractor fotovoltaico, el cual está en proceso de diseño y construcción. El sistema se forma por un módulo de paneles solares, un controlador de carga con entrada de 60 V de cd a 10 A, un banco de baterías, un motor de corriente directa con sistema de fuerza controlador y accesorios para su control. Los beneficios de este proyecto son sustituir los costos y reducir contaminantes provocados por el uso de combustible fósil, será viable para utilizarlo en terrenos pequeños con la posibilidad de sustituir a una yunta, que también demanda costos de alimentación y cuidado de los animales; el minitractor, en el tiempo que no se lo utilice, almacenará energía y también puede ser utilizado para alimentar el sistema de alumbrado de una casa con poco consumo eléctrico.

Palabras clave: minitractor, energía solar, motor, controlador eléctrico.

Introducción

La agricultura es una actividad esencial en el desarrollo de la región mixteca poblana. La producción agrícola se ha visto afectada por los cambios climáticos que han generado

¹Instituto Tecnológico Superior de Acatlán de Osorio, México. Correo electrónico: jrmsbt1@gmail.com

²Instituto Tecnológico Superior de Acatlán de Osorio, México. Correo electrónico: francisco_ramosguzman@yahoo.com.mx

³Instituto Tecnológico Superior de Acatlán de Osorio, México. Correo electrónico: academico_mfc@hotmail.com

⁴Instituto Tecnológico Superior de Acatlán de Osorio, México. Correo electrónico: analaura.nieto.r@gmail.com

⁵Instituto Tecnológico Superior de Acatlán de Osorio, México. Correo electrónico: jc.rojas@hotmail.com

⁶Instituto Tecnológico Superior de Acatlán de Osorio, México. Correo electrónico: graciela.santos@itsao.edu.mx

alteraciones en la temporada de precipitación, siendo la escasez de agua el principal factor que afecta a los agricultores y ganaderos. Lo anterior provoca un cambio de actividad, donde se abandona los terrenos de cultivo, tendiendo, en mayor parte, paso a la migración, con el fin de mejorar la economía familiar, llegando a ser un factor importante económico para la región y el desarrollo social de las personas. La región mixteca poblana es rica en radiación solar, la cual debe ser aprovechada para la tecnificación y desarrollo de maquinaria agrícola y, con ello, contribuir con el progreso ambiental de la región, en pequeños terrenos de agricultura de riego, temporal y agricultura protegida.

Ante los problemas ambientales derivados de la quema de combustibles como consecuencia de su uso en motores de combustión interna, especialmente diésel para tractores, así como la escasez de existencias de combustibles fósiles a lo largo del tiempo, es vital pensar en una fuente de energía alternativa. La adopción de un tractor eléctrico es una de esas soluciones, especialmente utilizando energía solar como fuente de energía renovable para ayudar a cargar la batería (Abouel-Seoud et al., 2020).

La agricultura familiar o en pequeña escala sigue siendo, en muchas partes del mundo, un factor importante en la producción de alimentos; sin embargo, las explotaciones agrícolas de las regiones subdesarrolladas a menudo carecen de los medios adecuados para llevar a cabo actividades agrícolas con la ayuda de maquinaria motorizada (Vaidya, 2018). Por otro lado, existen regiones que generalmente poseen una fuente de energía renovable confiable, principalmente en forma de radiación solar, que debe ser utilizada para mejorar el rendimiento de la agricultura en forma ambiental.

Por su parte, la tecnología ha sido un factor importante que ha contribuido en la forma de vivir, comunicarse, viajar e interactuar en la sociedad moderna. El gran auge de la tecnología tiene un gran impacto en todas las industrias, especialmente en la agricultura. En este sentido, la agricultura es la columna vertebral de la mayoría de las economías en desarrollo; hoy, está atravesando una transformación masiva debido a la digitalización. Se supone que las nuevas tecnologías, como robots, drones y aprendizaje automático, ayudarán a los agricultores a mejorar la eficiencia y maximizar el rendimiento. Las tecnologías emergentes ya han demostrado ser un factor clave en la sostenibilidad y rentabilidad futura de la agricultura (Sadiku et al., 2020).

Michail (2015) indica que después de la revolución industrial, la humanidad dio paso a la invención de nuevas formas para transformar la energía del sol en energía útil para todo tipo de actividades. En la práctica, el sol no caducará antes del final de la vida de la tierra, este hecho lleva a suponer que este tipo de fuentes de energía son renovables. Aparte de la energía, otro bien importante y fundamental para todas las sociedades es la alimentación. La agricultura es la ciencia por la que circulan todas las actividades relacionadas con la producción de alimentos. Parece que, el futuro de ambos bienes estará ligado, y la producción de alimentos dependerá directamente de la energía. Sumado a esto, la demanda de la industria de producción de alimentos aumentará y requerirá más energía, por lo tanto, se sumará al agotamiento ambiental al liberar CO₂ a la atmósfera.

Cabe mencionar que, la mayoría de las pequeñas explotaciones familiares de las regiones subdesarrolladas carecen de maquinaria agrícola motorizada adecuada, maquinaria que permite una agricultura eficiente y una buena productividad. Dicha carencia se debe a que no hay equipos desarrollados para condiciones específicas de pequeña agricultura en estas regiones. En general, la adopción de nuevas tecnologías por parte de las explotaciones

familiares se produce únicamente por criterios técnicos, sin consideraciones económicas, sociales o ambientales. Así las cosas, se pretende desarrollar un tractor agrícola eléctrico de pequeño tamaño para que la agricultura familiar haga la transición energética entre la energía fósil y la energía eléctrica. Esta fuente de energía se desarrolló mediante un método de innovación frugal.

El principal parámetro de optimización del sistema fue la autonomía de trabajo; el cual fue un desafío que se superó mediante una planificación y gestión innovadoras de baterías en diversas configuraciones operativas de transmisión de energía. El principal aporte de este trabajo fue demostrar que existe viabilidad económica y técnica (en comparación con un tractor convencional) en el uso de un tractor eléctrico para pequeñas fincas cuando existe un adecuado manejo de la tierra y uso de las baterías (Vogtb et al., 2021).

En este contexto, al buscar la reducción de la dependencia de la agricultura de los combustibles fósiles debido a su suministro limitado y los impactos adversos asociados en el medioambiente, el uso de infraestructuras adaptadas con las fuentes alternativas de energía serían una necesidad crucial. Entre todas las fuentes renovables, la energía solar tiene la mayor compatibilidad con las actividades agrícolas. La aparición de la tecnología de conversión de energía solar fotovoltaica (PV) en la agricultura disminuye la necesidad de combustibles a base de petróleo en este sector, ofreciendo una técnica de generación de electricidad más asequible y sostenible, y provocando una reducción notable de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En las actividades agrícolas modernas, se ha planteado la necesidad de electrificación, lo que ha llevado a la creación de una gran oportunidad para el empleo de la tecnología fotovoltaica en este sector (Gorjian et al., 2021).

Por su parte, Michail (2015) presenta una posible solución alternativa en cuanto al revestimiento de necesidades energéticas, necesarias para las actividades agrícolas relacionadas con las tierras cultivables. A medida que la industria del automóvil se dirige gradualmente a los motores eléctricos y a los vehículos eléctricos, la industria de los tractores agrícolas no se queda atrás con los motores diésel tradicionales. Por lo tanto, se asume que es posible fabricar tractores agrícolas eléctricos, donde se utilice la energía solar y supla las demandas de las actividades agrícolas en el campo.

La elaboración de este tipo de tractores involucra un esquema de paneles solares, un motor eléctrico del tractor y, por supuesto, una batería que almacenará la energía de los paneles, que la producirá en el tractor agrícola mientras opera en el campo. Sin embargo, falta evaluar la viabilidad técnica y financiera del proyecto, que fusiona a la agricultura con la ingeniería sostenible, para prácticas de agricultura sostenible.

En este sentido, se hace necesario la creación de un modelo de minitractor fotovoltaico, que implique la reducción del gasto económico, al eliminar el combustible fósil y el mantenimiento constante de yuntas para la labranza de la tierra, situación que se complica cuando se reduce la producción de pastura por la escasez de agua.

Así las cosas, el sistema propuesto tendrá un motor eléctrico que se alimentará de energía fotovoltaica, producida por un módulo de paneles solares, los cuales se almacenarán en un banco de baterías, un controlador de carga solar para el sistema de alimentación, y un control eléctrico para la operación del minitractor. El objetivo principal en esta etapa es diseñar un sistema electrónico para el funcionamiento de un minitractor impulsado por energía solar para ser utilizado en pequeños terrenos de agricultura.

Uno de los beneficios principales será la reducción del uso del combustible fósil, al ser un dispositivo autosustentable y eliminar la inversión de pastura que se requiere para alimentar a una yunta. También, con el almacenamiento de la energía fotovoltaica en los días que el minitractor no se utilice, se podrá utilizar para sistemas de iluminación y carga de dispositivos de baja potencia.

El término diseño abarca una amplia gama de significados. Tratándose del automóvil la palabra diseño puede estar dada en función de su apariencia externa; pero también los elementos que lo constituyen son diseñados, no por artistas sino por ingenieros, aunque en algunos casos este tenga oportunidad de mostrar algo de capacidad artística.

Por tanto, el diseño de un automóvil alimentado por energía solar consiste en definir y calcular movimientos, fuerzas y cambios de energía a fin de determinar el tamaño, las formas y los materiales necesarios para cada uno de los componentes interrelacionados del vehículo y de esta manera plantear procesos tecnológicos de fabricación apropiados que permitan llegar a la construcción de la máquina logrando que cumpla, sin falla, la función pretendida. (Carreño et al., 2012, p. 91)

En la India, un agricultor de Gujarat ha venido con una solución innovadora; ha fabricado un tractor que funciona con energía solar y electricidad para reducir los crecientes costos del combustible. El agricultor utilizó un taller de carrocería local y su conocimiento acerca de los circuitos eléctricos para fabricar este tractor en su casa. El tractor tiene un panel solar en su techo, que se utiliza para cargar las baterías del tractor. Si no hay luz solar o la carga no es suficiente para operar el tractor, hay otra forma de cargarlo, por medio del tomacorriente de la casa (Nag, 2021).

Teniendo en cuenta lo anterior, los requerimientos para estos sistemas consisten en el uso de paneles solares, controlador de carga, banco de baterías, inversores y controladores del motor de cd o de ca. Cuando la batería requerida se haya cargado por completo, se adhiere al motor eléctrico y se quita la carga del dispositivo. Aunque los motores de CC son de uso común, la industria recientemente se cambió a los motores de inducción de CA por varias razones; por lo tanto, la corriente CC de la batería debe convertirse en CA para permitir la operación del motor en una relación simple entre el motor eléctrico de CA, convertidores CD/CA y la batería (Suhas y Milind, 2020).

Por su parte, Chadalavada et al. (2021) desarrollaron un prototipo de una máquina multiusos que se utiliza para la siembra de semillas, agua, pulverización, corte de hierba. Esta máquina ayuda a reducir el costo de trabajo no calificado en la agricultura, aumentar la tasa de producción, reducir el tiempo para la siembra de semillas, la pulverización de fertilizantes y corte de césped. Esto es útil también porque la población está aumentando gradualmente. La máquina es impulsada por energía solar, con esto se demuestra que el sector agrícola está listo para la implementación de tecnología agroindustrial impulsada por energía solar.

Los autores Abouel-Seoud et al. (2020) crean un modelo de simulación de un tractor eléctrico asistido por energía solar, para lo cual utilizan ecuaciones con MATLAB / Simulink. El consumo de energía y el SOC de la batería se determinan en diferentes condiciones del tractor. La simulación del módulo fotovoltaico consideró el efecto de la insolación de la temperatura y la luz solar. Los resultados del modelo PV se validan con las curvas I-V y P-V, examinan el efecto de los parámetros sobre el rendimiento del tractor del consumo de energía y el SOC de la

batería. La influencia del campo fotovoltaico en el SOC de la batería se presenta en diferentes condiciones del tractor.

Vishu et al. (2015) proponen un enfoque para implementar sistemas-vehículo de ingeniería multiuso, que se puede operar desde cualquier lugar dentro de la radiofrecuencia para reducir los esfuerzos humanos. En este caso, es un vehículo solar multiusos controlado por radio basado en sensores, a fin de facilitar el arado en la agricultura; basado en la autonomía de supervisión, el tractor puede arar el campo con una presión definida sobre el suelo. Una simple computadora de escritorio puede operar este tractor controlado por radio, a través de las teclas de flecha y por la escena de la cámara que se dirige al frente. Este es un modelo prototipo que se puede implementar en un entorno del mundo real. El experimento con esta demostración muestra un efecto significativo y positivo al arar el campo sin la necesidad de visitarlo, y tan solo utilizar baterías cargadas con energía solar. Las estimaciones a futuro son que los agricultores serán los más beneficiados.

En la página web Motorpasión México, Bureau (2014) publicó:

La Facultad de Ciencias Físico Matemáticas (FCFM) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) presentó un prototipo de vehículo solar que es impulsado con paneles solares.

Apolonio Juárez Núñez, responsable del Centro de Estudios en Energía y Ambiente de la FCFM, comentó que la construcción del prototipo denominado Vehículo Universitario Solar (VUS) surgió de la idea de que la movilidad en este recinto universitario sea a través de este tipo de vehículos.

Tendrá una velocidad máxima de 30 kilómetros por hora, aunque puede alcanzar de 60 a 70 kilómetros en este tiempo, y puede llevar a tres personas.

Además, el VUS puede funcionar de manera mecánica, gracias a que cuenta con un juego de paneles que ayudan a generar movimiento y promueven el ejercicio físico. (párr. 1-4)

El fabricante japonés Kubota afirma que la agricultura va a cambiar, con la presentación de X Tractor, un tractor autónomo capaz de realizar trabajos en el campo por su cuenta, sin la necesidad de ser vigilado ni ayudado de ninguna manera.

Este vehículo forma parte de la nueva generación de productos de Kubota para la automatización de la agricultura, pero es sin duda alguna el más avanzado. No solo por su diseño, que se parece menos a un tractor y más a una especie de animal cibernético, sino también por todas las innovaciones que incluye.

Y es que este tractor es capaz de moverse por sí solo y atender el cultivo gracias a la combinación de varias tecnologías, desde el GPS para definir su localización a sensores de a bordo, como las cámaras integradas. Usando todos esos datos, el sistema de guía por Inteligencia Artificial es capaz de conducir el tractor tanto por cultivos tradicionales como por arrozales, tan importantes en Japón.

En lo que respecta a la motorización, este tractor abandona el clásico motor diésel en favor de cuatro motores eléctricos conectados a baterías de ion de litio. Lo interesante es que esas baterías no solo se pueden recargar con un enchufe, sino que la parte superior del tractor está cubierta de paneles solares; tiene sentido, ya que pasará la mayor parte del tiempo al sol. (Raya, 2020, párr. 4-8)

En Europa, Lombardi y Berni (2021) realizaron un estudio relacionado con un tractor multifuncional de batería, es decir, con funcionamiento eléctrico. Los autores estudiaron la

disposición al evaluar las preferencias de los consumidores potenciales hacia los atributos del tractor eléctrico con respecto a los convencionales, aplicando un experimento de elección para investigar la toma de decisiones del consumidor hacia las características técnicas y ambientales entre tres tractores diferentes y considerando las características de las fincas con viveros, así: un tractor eléctrico de batería completa recargado por energía fotovoltaica, un tractor de biocombustible y un tractor diésel (T1: RAMses, eléctrico; T2: Mejor, biocombustible; T3: ProGator 2030A, diésel). Los tres conjuntos de opciones se diseñaron para ofrecer, a los encuestados, diferentes niveles de los atributos clave de los tractores, como características técnicas y financieras, potencia del motor, emisión de gases, costos operativos y gastos mensuales.

En los resultados de la investigación de Vogtb et al. (2021), se evidencia que el tractor prototipo eléctrico logró fuerzas de tracción constantes que iban desde 1770 N (prueba 1) a 4754 N (prueba máxima). En la prueba preliminar 0, con solo 8 kg de peso de lastre, se produjo un deslizamiento excesivo. Por tanto, los resultados de la prueba 0 no se consideraron válidos. Todas las pruebas siguientes se llevaron a cabo con un pasajero adicional con una masa de 99 kg, que sirvió como lastre en el tractor. En este estudio, se concluyó que, para aplicaciones agrícolas con acceso a la red, un tractor eléctrico es una buena opción, tiene una buena viabilidad económica para hacer una transición energética exitosa.

Así, se ha comprobado que las configuraciones de planificación y gestión de la transmisión de energía eléctrica son una excelente solución y permiten autonomía funcional para los tractores eléctricos que operan en la agricultura familiar. El rendimiento del tractor eléctrico es superior al de un tractor con motor de combustión convencional. Además, el costo por hora del tractor eléctrico es de 2 a 3 veces menor que el del tractor tradicional.

Por su parte, Gorjian et al. (2021), en su estudio, investigan la integración de la tecnología fotovoltaica con tractores agrícolas eléctricos y robots agrícolas, mediante la discusión de trabajos de investigación y estudios de casos comerciales. Los resultados indican dos grandes desafíos en contra del despliegue generalizado de maquinaria agrícola eléctrica moderna alimentada con energía solar, están los altos costos iniciales asociados principalmente a los módulos fotovoltaicos y a las unidades de almacenamiento de baterías, junto con las deficiencias en las tecnologías de almacenamiento de electricidad. Debido al funcionamiento en condiciones exteriores, también se debe considerar el efecto de los parámetros ambientales en el rendimiento de los módulos fotovoltaicos integrados con máquinas agrícolas, incluida la temperatura de la superficie, la acumulación de polvo, la sombra y la humedad del aire. Otras mejoras técnicas, reducciones de costos y la obtención de incentivos gubernamentales pueden facilitar el despliegue en el mundo real de estas máquinas sostenibles. Los autores esperan promover la integración de la tecnología fotovoltaica con la maquinaria agrícola eléctrica moderna y animar a los agricultores, productores, planificadores y tomadores de decisiones a emplear esta técnica en la agricultura mecanizada, brindándoles una idea acerca de los últimos avances junto con los principales desafíos.

En los recientes y rápidos desarrollos de la ciencia y la tecnología en todo el mundo, la agricultura es un dominio que requiere desarrollos continuos para mejorar el estilo de vida de los agricultores, los estándares de la nación en términos de producción agrícola en un período de tiempo limitado y lograr la calidad, productos y servicios. El principal problema en la agricultura, a pesar de la amplia variedad de ayudas tecnológicas proporcionadas durante

las últimas décadas en temas agrícolas, es que los agricultores tienen dificultades para adoptar dichas tecnologías, debido a varios factores: costo, conocimiento de funcionamiento, mantenimiento y ahorro de combustible. Como resultado, la mayoría de los agricultores de mediana escala adoptan animales; algunos de ellos, que cuentan con un poco más de recursos, hacen uso de tractores; sin embargo, ambas opciones aún no son económicas (Sajjan et al., 2021).

Por lo tanto, Sajjan et al. (2021) hacen una propuesta para reducir las dificultades que enfrentan los agricultores, incluso en esta era, a través del mecanismo de Theo Jansen, en campos agrícolas provistos de múltiples sistemas destacados, de manera que el sistema resulta ser económico y eficiente a lo largo de los años de utilización. Este documento, aunque no muestra las ecuaciones cinemáticas necesarias y el análisis de prueba paramétrico, proporciona las posibilidades de aplicación del mecanismo de Theo Jansen en los campos agrícolas, pero con cambios en la configuración estándar, de modo que representa un reemplazo eficiente para los tractores y animales que se emplean.

Por otra parte, Mousazadeh et al. (2010) analizaron las diversas tecnologías de baterías disponibles para su uso en tractores eléctricos híbridos enchufables con asistencia solar. En este contexto, los tractores eléctricos híbridos enchufables con asistencia solar son los que se pueden utilizar en operaciones agrícolas ligeras. Para determinar la batería más adecuada, se analizan cuatro tecnologías comunes, teniendo en cuenta los efectos y costos ambientales del ciclo de vida. Las baterías utilizadas son VRLA, Ni – Cd, Ni-MH y Li-ion. El número de reemplazos necesarios durante la vida fotovoltaica para VRLA, Ni – Cd, Ni-MH y Li-ion es 12, 4, 14 y 5 veces, asumiendo un ciclo de carga / descarga de 24 h, siendo la de Li-ion la mejor opción.

En la investigación de Spykman et al. (2021), se menciona y demuestra que las actitudes de los agricultores hacia los robots de cultivos de campo en un entorno europeo apenas se han estudiado, a pesar de la creciente disponibilidad de la tecnología. Sin embargo, dada la relevancia de los robots para la agricultura a pequeña escala, su aceptabilidad, en regiones dominadas por la agricultura a pequeña escala como Baviera, Alemania, es de particular interés. Los datos se recopilaron mediante cuestionarios en dos eventos que incluyeron conferencias y demostraciones de campo y se analizaron mediante pruebas bivariadas. Considerando el tamaño de la finca, el sistema agrícola (orgánico/convencional) y la estructura ocupacional (tiempo parcial/tiempo completo) fueron atributos relevantes que influyeron en la evaluación de las ventajas y desventajas de los robots de cultivo de campo.

En general, los encuestados de granjas más grandes se centran más en los beneficios económicos de los robots y prefieren grandes tractores autónomos. Por el contrario, los agricultores orgánicos o de pequeña escala consideran que los beneficios ambientales de los robots de cultivo de campo son relativamente más importantes y favorecen a los robots pequeños. La agricultura orgánica también se correlaciona positivamente con la intención de comprar robots para cultivos de campo en los próximos cinco años. Generalmente, más agricultores pueden imaginarse poseer pequeños robots en lugar de un tractor autónomo en diez años, pero, al mismo tiempo, ven los tractores autónomos más adecuados para la mayoría de las tareas agronómicas específicas. Las opciones de no compra, como los servicios de contratistas y el uso compartido de maquinaria, representan los modos preferidos de implementación de robots.

Desarrollo

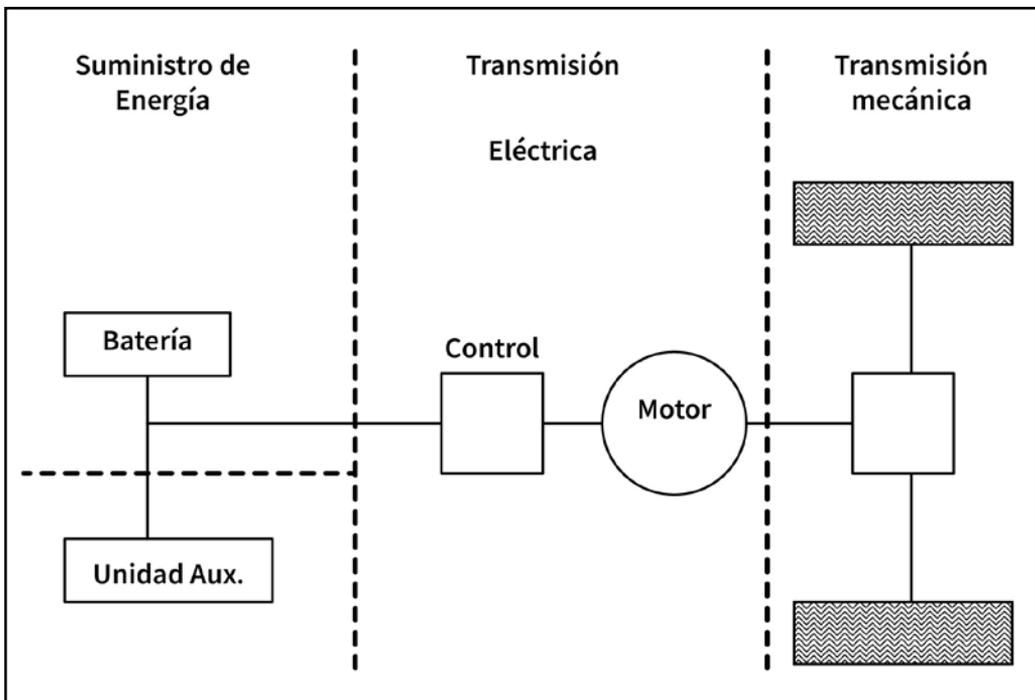
La metodología utilizada y planteada por Carreño et al. (2012), para el diseño y construcción de vehículos eléctricos que actualmente existen en el mercado, es sistemas de transmisión, originalmente desarrollados para su uso en vehículos de combustión interna, basándose en la simple idea de reemplazar el motor térmico por uno eléctrico; sin embargo, los motores eléctricos ofrecen una utilización mucho más flexible que los térmicos, por lo que se puede pensar para diferentes configuraciones de cadenas de tracción. En general, la cadena de tracción de un vehículo eléctrico puede dividirse en tres subsistemas principales: suministro de energía, transmisión eléctrica y transmisión mecánica (ver Figura 1).

Dentro de las consideraciones a tener en cuenta en el diseño de la cadena de tracción se pueden citar las siguientes:

- Tipo de tracción: delantera, trasera o a las cuatro ruedas.
- Número de motores que van a utilizarse.
- Transmisión comparable a la de un VCI o directa.
- Utilización o no de caja de velocidades.
- Cadena de tracción en las que se utiliza un solo motor.

Figura 1

Subsistemas de la cadena de tracción de vehículos eléctricos



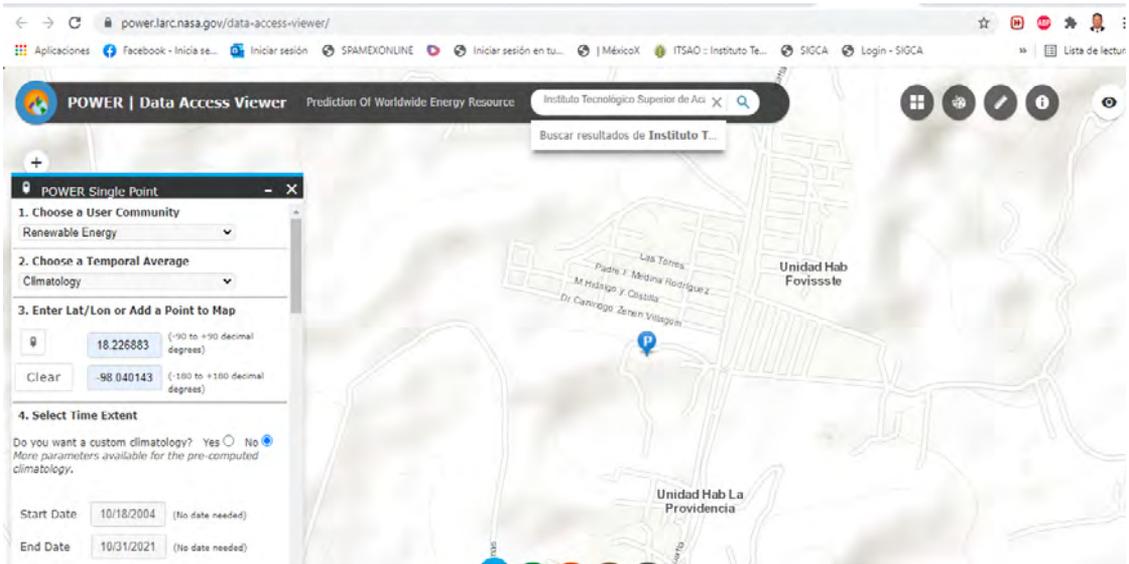
Fuente: Carreño et al. (2012).

Sistema fotovoltaico

En este proyecto, se utiliza la misma metodología de Carreño et al. (2012). El suministro de energía utilizado es fotovoltaico, que es un recurso muy abundante en la región de Acatlán de Osorio, Puebla, México. La investigación se está desarrollando en el Instituto Tecnológico Superior de Acatlán de Osorio, cuya ubicación se muestra en la Figura 2.

Figura 2

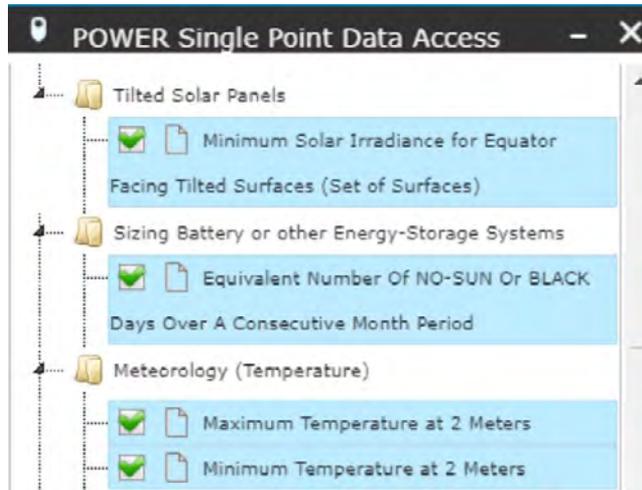
Ubicación del TecNM Campus Acatlán de Osorio



Para el cálculo de la dimensión del sistema fotovoltaico, se realizó la identificación de tres factores principales: la radiación solar mínima, los días nublados, la temperatura máxima y mínima a una altura de 2 metros, mediante la consulta en base de datos de la NASA POWER Single Point Data Access, en la Figura 3 se muestra la selección de estos parámetros para su consulta.

Figura 3

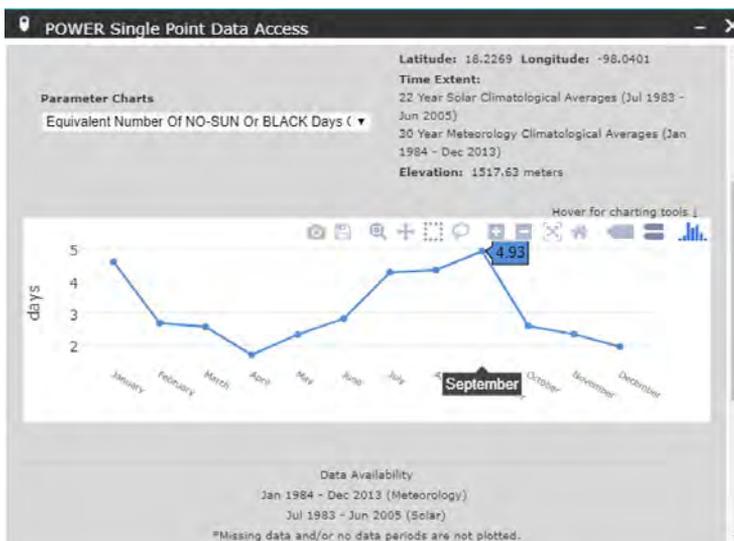
Selección de parámetros para sistema fotovoltaico



Uno de los factores consultados fue el número de días nublados, en la Figura 4 se visualiza y se identifica que el mes con más días nublados es septiembre con 5 días, aproximadamente; sin embargo, esto varía de acuerdo con los cambios climáticos que se presentan globalmente.

Figura 4

Cálculo de días nublados



Es importante considerar la temperatura mínima y máxima, ya que se debe conocer su comportamiento para identificar el punto de operación y rendimiento del panel solar; 2 metros es la altura aproximada en la que se encontrarán ubicados los módulos de paneles solares. En este caso, en Acatlán la temperatura mínima aproximada es de 16.91 °C (ver Figura 5) y la temperatura máxima es de 32.49 °C (ver Figura 6).

Figura 5

Temperatura mínima aproximada

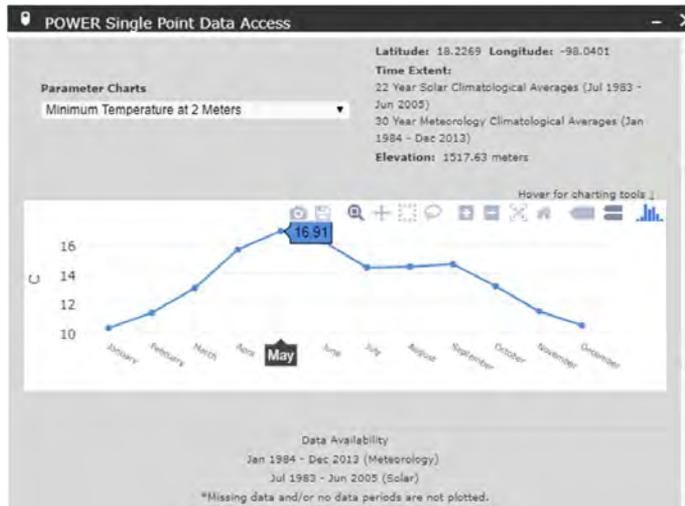
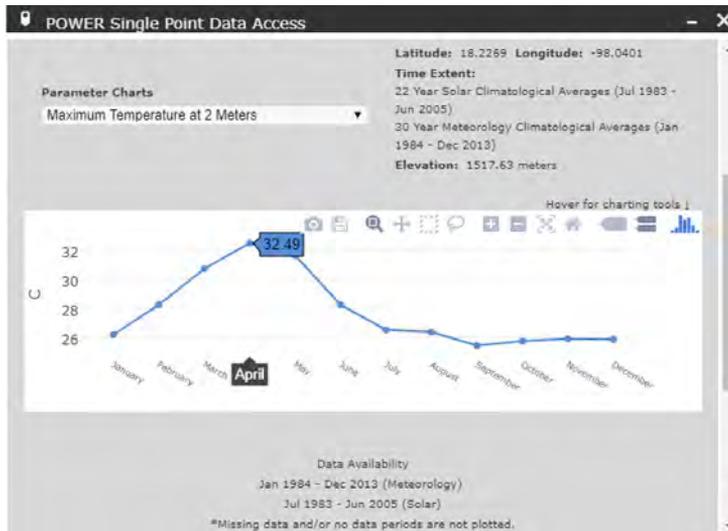


Figura 6

Temperatura máxima aproximada



En la Figura 7 se muestra el concentrado de los parámetros consultados para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico como temperatura, días nublados, inclinación, horas de radiación solar, etc., se concentra en forma mensual y anual.

Figura 7

Parámetros para el dimensionamiento fotovoltaico

PARAMETER	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	AIN
T2H_MAX	26.18	28.25	30.72	32.49	31.63	28.24	26.52	26.37	25.45	25.75	25.91	25.88	27.78
T2H_MIN	10.30	11.34	13.02	15.65	16.91	16.19	14.42	14.48	14.66	13.14	11.44	10.48	13.50
EQVINT_NO_SUN_BLACKDAYS_MONTH	4.60	2.69	2.57	1.70	2.33	2.83	4.27	4.34	4.93	2.60	2.34	1.95	-999
SI_EF_MIN_TILTED_SURFACE_0	4.37	5.40	6.20	6.50	6.12	5.63	5.66	5.36	4.70	5.08	4.91	4.57	5.38
SI_EF_MIN_TILTED_SURFACE_10	5.14	6.06	6.52	6.39	6.03	5.67	5.60	5.17	4.76	5.52	5.77	5.56	5.69
SI_EF_MIN_TILTED_SURFACE_33	4.53	5.54	6.29	6.52	6.14	5.67	5.69	5.35	4.73	5.18	5.00	4.76	5.46
SI_EF_MIN_TILTED_SURFACE_90	4.01	3.90	3.85	1.90	1.97	2.36	2.20	1.60	2.07	3.17	4.31	4.68	2.94
SI_EF_MIN_OPTIMAL	5.53	6.25	6.52	6.52	6.14	5.70	5.71	5.36	4.78	5.58	6.16	6.17	5.87
SI_EF_MIN_OPTIMAL_ANG	42.00	33.00	20.00	5.00	-6.00	-11.00	-9.00	0.00	12.00	27.00	40.00	46.00	16.00
SI_EF_MIN_TILTED_ANG_ORT	S	S	S	S	N	N	N	S	S	S	S	S	S

En la Figura 8 se muestra el concentrado mensual y anual, de horas de sol e inclinación, en este caso, se cuenta con 5.87 h de radiación solar por día, con una inclinación de 16°, que es el valor de referencia.

Figura 8

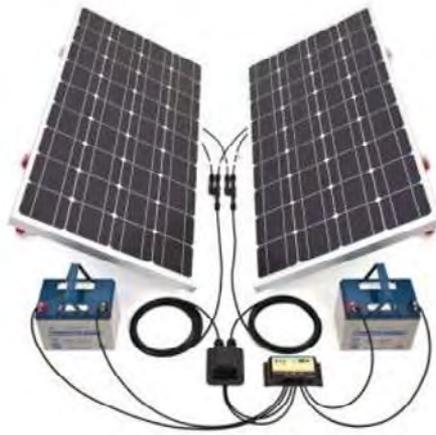
Horas de radiación solar e inclinación de paneles solares

PARAMETER	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	AIN
T2H_MAX	26.18	28.25	30.72	32.49	31.63	28.24	26.52	26.37	25.45	25.75	25.91	25.88	27.78
T2H_MIN	10.30	11.34	13.02	15.65	16.91	16.19	14.42	14.48	14.66	13.14	11.44	10.48	13.50
EQVINT_NO_SUN_BLACKDAYS_MONTH	4.60	2.69	2.57	1.70	2.33	2.83	4.27	4.34	4.93	2.60	2.34	1.95	-999
SI_EF_MIN_TILTED_SURFACE_0	4.37	5.40	6.20	6.50	6.12	5.63	5.66	5.36	4.70	5.08	4.91	4.57	5.38
SI_EF_MIN_TILTED_SURFACE_10	5.14	6.06	6.52	6.39	6.03	5.67	5.60	5.17	4.76	5.52	5.77	5.56	5.69
SI_EF_MIN_TILTED_SURFACE_33	4.53	5.54	6.29	6.52	6.14	5.67	5.69	5.35	4.73	5.18	5.08	4.76	5.46
SI_EF_MIN_TILTED_SURFACE_90	4.01	3.90	3.85	1.90	1.97	2.36	2.20	1.60	2.07	3.17	4.31	4.68	2.94
SI_EF_MIN_OPTIMAL	5.53	6.25	6.52	6.52	6.14	5.70	5.71	5.36	4.78	5.58	6.16	6.17	5.87
SI_EF_MIN_OPTIMAL_ANG	42.00	33.00	20.00	5.00	-6.00	-11.00	-9.00	0.00	12.00	27.00	40.00	46.00	16.00
SI_EF_MIN_TILTED_ANG_ORT	S	S	S	S	N	N	N	S	S	S	S	S	S

Para la conexión de los paneles solares, se realiza de acuerdo con la configuración de conexión en serie o en paralelo, dependerá del tipo de motor o carga que va alimentar el sistema fotovoltaico, en la Figura 8 se muestra la configuración de las conexiones en paralelo; se muestran paneles solares estándar, controlador de carga de batería, baterías y accesorios para realizar las conexiones.

Figura 9

Conexión típica de paneles solares, controlador de carga y baterías



Fuente: Suhas y Milind (2020).

Sistema de transmisión eléctrica y mecánica.

En la parte del sistema de transmisión eléctrico se utilizará un controlador de potencia eléctrica que se conectará a un motor eléctrico de cd sin escobillas, el cual estará acoplado con el diferencial; lo anterior es factible debido a que los motores eléctricos, a diferencia de los convencionales de combustible fósil, desarrollan un alto en el arranque y ofrecen, en general, un amplio rango de velocidad. Por el tipo de alimentación y de motor no se requiere utilizar embrague, caja de velocidades y árbol de transmisión, porque el motor irá acoplado directamente en el diferencial; se utilizará un solo motor (Carreño et al., 2012). En la Figura 10 se muestran los elementos que se utilizarán para el minitractor fotovoltaico.

Figura 10

Partes del sistema de alimentación, eléctrico y mecánico propuesto



La potencia de consumo se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$P = T_t * W_r$$

Donde:

T_t = par de tracción.

W_r = velocidad angular de la rueda.

A partir de estos cálculos se establecerá la potencia necesaria del motor y, según la autonomía deseada, se identificará la capacidad necesaria de almacenamiento en las baterías. Para empezar, se trabajará con 5 paneles de 50 Watts a 12 V conectados en serie, de lo cual se obtendrá 60 V, que producirá 250 W-h. Al tomar 6 h de radiación solar se obtiene una producción diaria de 1,500 w-h/día para hacer funcionar al motor y al controlador eléctrico del motor. El controlador de carga (ver Figura 11) se eligió para soportar la configuración fotovoltaica de 60 V de entrada, ya que deberá controlar la carga y descarga de un banco de 5 baterías de 12 V a 120 A conectadas en serie, con esto se logrará una capacidad de almacenamiento de 1,440 W.

Figura 11

Controlador de carga solar de 60 V a 10 A



Fuente: ZHCSolar, 2022.

El controlador utilizará un algoritmo activo de software avanzado para rastrear de forma rápida y precisa el punto de potencia máximo del voltaje del módulo de paneles fotovoltaicos, también un seguimiento activo en el punto de máxima potencia del módulo de células solares permitirá obtener más energía solar y mejorar la corriente de carga y la generación de energía.

Características del controlador de carga solar:

- Modos de funcionamiento: MPPT y DC-DC seleccionable, MPPT para la aplicación de paneles fotovoltaicos y DC-DC para alimentación de potencia.
- Selección de carga: Aplicable a la batería de iones de litio y la célula acumuladora.
- La energía de salida es 600 W, conveniente para el panel solar 100 W-600 W.
- Entre mayor es la carga el efecto MPPT es más obvio.
- Protección reversa de la carga: Evita que la célula del acumulador proporcione carga reversa la batería solar.
- Protección de conexión inversa: Circuito de protección inversa MOS en el extremo de entrada y salida para proteger eficazmente el controlador y la batería.
- Protección de sobrecarga: El controlador cortará automáticamente el circuito si hay sobrecarga.

El motor eléctrico, el diferencial, el controlador, el acelerador y el reversero que se muestran en la Figura 12 presentan las siguientes características:

1. Diferencial con motor integrado
 - Medida: entre ruedas 80 cm
 - Medida: largo total 100 cm
 - Peso: 35 kilos
 - Paso: 9.3 a 145 km/h soporta 900 k
 - Paso: 12.5 a 135 km/h soporta 1100 k
 - Freno: Tambor
 - Motor: Directo al diferencial
2. Motor Brushless
 - Voltaje: 48/60 V
 - Potencia: 800 W / 1000 W / 1200 W
 - RPM: 3200 / 3500
 - Reversa: Si
 - Carbones: Sin carbones
3. Controlador
 - Voltaje: 48/60 V.
 - Potencia: 800 W/1000 W/1200 W
 - Corriente max: 45 A.
 - Controlador: Para motor sin carbones

Figura 12

Diferencial con motor, controlador eléctrico y accesorios



Pruebas de funcionamiento del controlador de carga solar

Como primera etapa, se realizaron pruebas de funcionamiento del controlador de carga solar, donde se logró tener el ajuste de voltaje proveniente de los paneles solares; además, se ajustó el voltaje de carga y sobrecarga del banco de baterías, la corriente de carga para las baterías; igualmente, se muestra la energía almacenada en las baterías, el amperaje almacenado y el tiempo de operación de carga o funcionamiento. Con este controlador se programan y ajustan las características de carga para obtener un mejor rendimiento de la producción de la energía fotovoltaica. En la Figura 13 se muestra el controlador en funcionamiento con una fuente de alimentación de cd y una batería de ciclo profundo, estas pruebas se han realizado en el laboratorio de Ingeniería Electrónica.

Figura 13

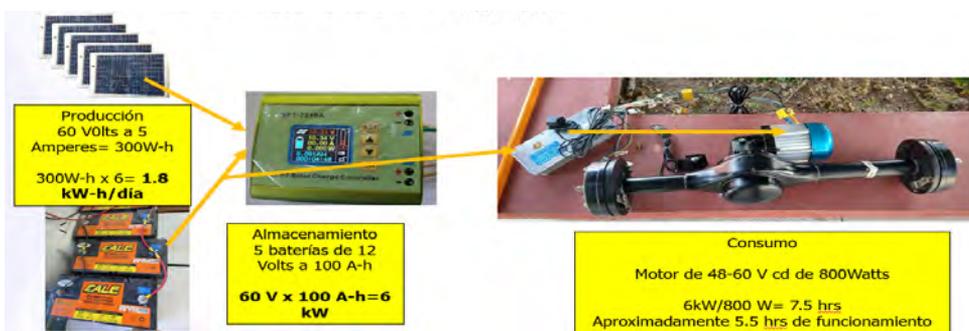
Pruebas de funcionamiento del controlador de carga solar



Como segunda etapa, se realiza la conexión del sistema fotovoltaico con el controlador eléctrico del motor que está acoplado con el diferencial para evaluar su funcionamiento. Cabe mencionar que, el estudio se encuentra en el proceso del diseño del chasis para el minitractor, en el cual se realizará el montaje del sistema fotovoltaico, controladores, baterías, motor con diferencial y accesorios (ver Figura 14).

Figura 14

Propuesta de conexión del sistema fotovoltaico, eléctrico y mecánico



Conclusiones

El sistema electrónico propuesto es viable para el funcionamiento del minitractor fotovoltaico, debido a que los elementos principales como el motor con diferencial y su controlador tendrán la energía suficiente para su funcionamiento. El controlador de carga es programable para realizar los ajustes necesarios de la energía entregada por los paneles solares y la que entrega en la salida para carga de las baterías, el controlador de carga tiene una pantalla digital en la que se muestra y monitorea el estado de carga de la batería y permite realizar los ajustes necesarios.

El aprovechamiento de la energía solar es viable porque en esta región se presentan días soleados la mayor parte del año; solo en temporada de calor la temperatura es algo elevada, esto teóricamente afecta en el rendimiento de los paneles solares; sin embargo, se obtiene una producción muy buena en la mayor parte del año y esto sustituye al combustible fósil, cuyo consumo es costoso.

Referencias

- Abouel-Seoud, S., El-Adros, A., Metwalley, S., & Watany, M. (2020). Simulation and Performance Indices Analysis of Solar Assist Plug-in Electric Tractor. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 9(10), 62-78.
- Carreño, E., Vacca, E. y Lugo, I. (2012). Diseño y fabricación de un vehículo autónomo impulsado por energía solar. *Tecnura*, 16(32), 91-106. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2012.2.a08>
- Chadalavada, H., Bharath, N., Shaila, P., Lakshmi, O., & Naveen, C. (2021). Solar powered semi-automated mutlipurpose agriculture machine. *Materialstoday: Proceedings*, 46(9), 3469-3473. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.864>
- Gorjian, S., Ebadi, H., Trommsdorff, M., Sharon, H., Demant, M., & Schindele, S. (2021). The advent of modern solar-powered electric agricultural machinery: A solution for sustainable farm operations. *Journal of Cleaner Production*, 292. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126030>
- Lombardi, G., & Berni, R. (2021). Renewable energy in agriculture: Farmers willingness-to-pay for a photovoltaic electric farm tractor. *Journal of Cleaner Production*, 313(1). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127520>
- Marcos, B. (2014). Crean en Puebla un vehículo impulsado por energía solar. *Motorpasion México*. <https://www.motorpasion.com.mx/autos-mexicanos/crean-en-puebla-un-vehiculo-impulsado-por-energia-solar>
- Michail, K. (2015). *Solar Charged Electric Farming Tractors* [Tesis de maestría, University of Strathclyde Engineering]. Archivo digital. http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc_2015/Akritidis.pdf
- Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, K., & Sharifi, A. (2010). Evaluation of alternative battery technologies for a solar assist plug-in hybrid electric tractor. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 15(8), 507-512. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2010.05.002>

- Raya, A. (2020, 2 de febrero). El tractor autónomo con paneles solares que puede acabar con el trabajo en el campo. *El Español*. https://www.elespanol.com/omicrono/tecnologia/20200202/tractor-autonomo-paneles-solares-puede-acabar-trabajo/463704147_0.html
- Sadiku, M., Ashaolu, T., & Musa, S. (2020). Emerging Technologies in Agriculture. *International Journal of Scientific Advances*, 1(1), 31-34. <https://doi.org/10.51542/ijscia.v1i1.6>
- Sajjan, S., Nadaf, S., Deshpande, S., Malik, M., & Sushma, N. (2021). Mechanical ox – Replacement of tractors and farm animals for agriculture practices. *Materialstoday: Proceedings*, 47(10), 2529-2536. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.047>
- Shuhas, S., & Milind, B. (2020). Solar Powered Multi-Functioned Electric Tractor for Agriculture Usage. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, 3(3), 374-376. https://www.ijresm.com/Vol.3_2020/Vol3_Iss3_March20/IJRESM_V3_I3_98.pdf
- Spykman, O., Gabriel, A., Ptacek, M., & Gandorfer, M. (2021). Farmers' perspectives on field crop robots – Evidence from Bavaria, Germany. *Computers and Electronics in Agriculture*, 186, 106176. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106176>
- Vaidya, A. (2018). A Study of Solar Electric Tractor for Small Scale Farming. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 8(3), 1255-1259.
- Vishu, Agrawal, P., Kumar, S., Kaur, K., & Kaur, K. (2015). Sensor Based Radio Controlled Multi-utility Solar Vehicle to Facilitate Plough in Agriculture. En Satapathy, S., Govardhan, A., Raju, K., Mandal, J. (Eds.), *Emerging ICT for Bridging the Future - Proceedings of the 49th Annual Convention of the Computer Society of India CSI* (Vol. 2; pp. 35-42). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13731-5_5
- Vogtb, H., De Melo, R., Daher, S., Schmuelling, B., Antunes, F., Dos Santos, P., & Albiero, D. (2021). Electric tractor system for family farming: Increased autonomy and economic feasibility for an energy transition. *Journal of Energy Storage*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102744>
- ZHCSolar. (2022). MPT-7210A MPPT Charge Controller Intro. <https://zhcsolar.com/product/mpt-7210a-mppt-controller-48v-60v-72v-boost/>