

Journal of Agricultural Sciences Research

ISSN 2764-0973

vol. 6, n. 1, 2026

••• ARTICLE 4

Data de Aceite: 26/01/2026

DESGRANADORA DE MAÍZ CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA UNA AGRICULTURA SOSTENIBLE EN LA REGIÓN SUROESTE DE MÉXICO

López Rivera Marcos Samuel

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Pinotepa

Ramírez Arancibia Jaime Abel

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Pinotepa

López Maldonado Omar

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Pinotepa

Rodríguez Santiago Cesar Ulises

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Pinotepa

Pérez Baños Paola Isabel

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Pinotepa



All content published in this journal is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

Resumen: El presente artículo propone el desarrollo de una desgranadora de maíz impulsada por energía solar fotovoltaica, diseñada para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los pequeños productores en comunidades rurales de México. Actualmente, una parte significativa de estos productores realiza el desgranado de forma manual, un proceso laborioso y de baja productividad (Cholca & Mantilla, 2015). La implementación de una desgranadora tecnificada y sostenible puede incrementar notablemente la eficiencia del proceso, permitiendo procesar mayores volúmenes de maíz en menor tiempo y con un menor impacto ambiental. La adopción de energía solar en la agricultura no solo ofrece una mayor seguridad energética (Ilumexico, 2024), sino que también contribuye a la reducción de la huella de carbono. La máquina propuesta busca ser una solución accesible, de bajo costo y fácil operación, especialmente para regiones como la costa de Oaxaca, donde el maíz es un cultivo fundamental para el autoconsumo (SAGARPA, 2017). Este enfoque integral no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también promueve prácticas agrícolas más sostenibles y resilientes.

Palabras clave: agricultura sostenible, autoconsumo, desgranadora de maíz, energía solar fotovoltaica, pequeños productores.

INTRODUCCIÓN

El maíz como pilar de la seguridad alimentaria y la soberanía tecnológica en México

El maíz (*Zea mays L.*) no es simplemente un cultivo en México; es el eje sobre el cual giran la seguridad alimentaria, la identidad cultural y la economía de millo-

nes de personas. Como cuna de la domesticación del teocintle, su ancestro silvestre, hace aproximadamente 9,000 años, México alberga una biodiversidad de maíces nativos que constituye un patrimonio genético invaluable para la humanidad (Ranum et al., 2014). Sin embargo, paradójicamente, la nación enfrenta una compleja encrucijada: a pesar de ser un centro de origen, su producción nacional lucha por satisfacer la demanda interna, llevando a una dependencia de las importaciones, principalmente de maíz amarillo para uso forrajero e industrial (SADER, 2020). En 2025, se proyecta que la producción de maíz blanco, destinado al consumo humano, alcance aproximadamente 21.25 millones de toneladas, una cifra que, si bien es significativa, subraya la tensión constante entre la producción y el consumo nacional (Forbes, 2025).

Esta tensión se agudiza en el estrato de los pequeños productores, quienes, a pesar de representar cerca del 60% de la producción total de maíz en el país, operan en condiciones de alta vulnerabilidad (SADER, 2020). Estos agricultores, que a menudo cultivan en parcelas de menos de cinco hectáreas, son los custodios de la diversidad genética del maíz, pero enfrentan barreras estructurales que limitan su productividad y rentabilidad. La brecha tecnológica, la falta de acceso a créditos, la volatilidad de los precios y los efectos cada vez más pronunciados del cambio climático configuran un escenario donde la innovación tecnológica, adaptada y accesible, deja de ser una opción para convertirse en una necesidad imperativa para la supervivencia y el progreso.

El desafío post-cosecha: un cuello de botella para la productividad

Dentro de la cadena de valor del maíz, las operaciones post-cosecha representan

uno de los cuellos de botella más significativos para el pequeño productor. El proceso de desgranado, es decir, la separación del grano de la mazorca (olote), es una tarea intensiva en mano de obra y tiempo que impacta directamente en la eficiencia, la calidad del producto y, en última instancia, en los ingresos del agricultor. La evolución de las tecnologías de desgranado ofrece un microcosmos de la historia agrícola misma, abarcando un espectro que va desde métodos manuales ancestrales hasta maquinaria industrial de alta capacidad.

Métodos manuales y tradicionales

El método más antiguo, que consiste en presionar los granos con los pulgares, garantiza un daño mínimo al grano, pero su rendimiento es extremadamente bajo, estimado en apenas 8-15 kg por hora por persona, lo que lo hace insostenible para volúmenes comerciales (Castelán & Vázquez, 2017). El uso de utensilios como ololetes secos, piedras o tablas con clavos (conocidas como “oloteras”) puede duplicar o triplicar esta eficiencia, pero a menudo a costa de un mayor daño al grano y un riesgo ergonómico considerable para el operador (Tapia et al., 2017).

Desgranadoras mecánicas manuales y motorizadas

La introducción de desgranadoras mecánicas, primero manuales y luego motorizadas, marcó un salto cuántico en la productividad. Las desgranadoras manuales rotativas pueden alcanzar rendimientos de 50-100 kg/hora, pero su eficacia depende de la fuerza y resistencia del operador (Ricaldi, 2020). Las máquinas motorizadas, impulsadas por motores de combustión interna (gasolina o diésel) o eléctricos, elevan la capaci-

dad a rangos que van desde los 300 kg/hora hasta varias toneladas por hora en modelos industriales (Pérez et al., 2017). Sin embargo, esta eficiencia tiene un costo. Los motores de combustión interna, si bien ofrecen autonomía, implican un gasto constante en combustible, mantenimiento frecuente, emisiones de gases de efecto invernadero y contaminación acústica (Solórzano & Zumba, 2023). Las desgranadoras eléctricas son más limpias y eficientes, pero su utilidad queda restringida a zonas con acceso fiable a la red eléctrica, una condición que no se cumple en vastas áreas rurales de México.

La pobreza energética y su impacto en la agricultura rural

El acceso a la energía es un catalizador fundamental para el desarrollo. En el contexto agrícola, la energía es necesaria para el riego, el procesamiento, la refrigeración y el transporte. La falta de acceso a servicios energéticos modernos y asequibles, un fenómeno conocido como “pobreza energética”, perpetúa un ciclo de baja productividad y estancamiento económico. En estados como Oaxaca, a pesar de su extraordinario potencial en recursos renovables, persisten comunidades enteras sin conexión a la red eléctrica nacional. Esta carencia no solo limita las oportunidades de desarrollo económico, sino que también afecta la calidad de vida, la educación y la salud.

La dependencia de los combustibles fósiles en las zonas rurales no conectadas a la red no es una solución sostenible. Los costos fluctuantes de la gasolina y el diésel, sumados a la logística de su transporte a zonas remotas, imponen una carga económica significativa a los agricultores. En este contexto, las fuentes de energía renovable, y en particular la energía solar fotovoltaica, emergen

como una solución descentralizada, resiliente y económicamente viable a largo plazo.

El potencial de la energía solar fotovoltaica en el campo mexicano

México, y en particular el estado de Oaxaca, está dotado de un recurso solar excepcional. Oaxaca presenta una radiación media diaria que oscila entre 5.5 y 5.6 kWh/m², una de las más altas del país y del mundo (Idom Consulting, 2015). Este vasto potencial energético, sin embargo, ha sido históricamente subexplotado, especialmente en aplicaciones agrícolas a pequeña escala. La tecnología fotovoltaica, que convierte la luz solar directamente en electricidad, ha experimentado una drástica reducción de costos en la última década, haciéndola cada vez más competitiva frente a las fuentes de energía convencionales.

La aplicación de la energía solar en la agricultura, conocida como “agrovoltáica”, va más allá del simple reemplazo de una fuente de energía por otra. Permite la creación de sistemas energéticos autónomos que pueden alimentar una variedad de equipos, desde bombas de agua hasta, como se propone en este trabajo, desgranadoras de maíz. Investigaciones recientes han demostrado el impacto positivo de la energía solar en la agricultura, no solo en términos de reducción de costos y emisiones, sino también en la mejora de la eficiencia hídrica y la resiliencia ante el cambio climático (Hilario Rivas et al., 2025; Ilumexico, 2025). El presente proyecto se inscribe en esta corriente de innovación, buscando desarrollar una solución tecnológica que no solo resuelva un problema técnico específico—el desgranado del maíz— sino que también contribuya a un modelo de desarrollo rural más justo, sostenible y soberano.

Antecedentes de la desgranadora de maíz con sistema de energía solar fotovoltaica

La evolución de las técnicas y tecnologías para el desgranado del maíz ha sido un reflejo directo de las necesidades agrícolas y los avances tecnológicos a lo largo de la historia. Desde los métodos ancestrales hasta las soluciones contemporáneas, cada etapa ha buscado optimizar la eficiencia, reducir el esfuerzo humano y mejorar la calidad del grano. La presente invención, una desgranadora de maíz con sistema de energía solar fotovoltaica, se posiciona en la vanguardia de esta evolución, integrando principios de ingeniería mecánica con fuentes de energía renovable para ofrecer una solución sostenible y autónoma.

Contexto de la producción de maíz en México y Oaxaca

México, como centro de origen y diversificación del maíz, presenta un panorama agrícola complejo. La producción nacional de maíz en 2025 se estima en 21.25 millones de toneladas de maíz blanco, un cultivo fundamental para la dieta mexicana (Forbes, 2025). Sin embargo, el rendimiento promedio en estados como Oaxaca, de 0.8 toneladas por hectárea, se encuentra por debajo del promedio nacional de 1.3 toneladas por hectárea (INEGI, 1997). Esta disparidad subraya la necesidad de tecnologías que impulsen la productividad en regiones con condiciones agroecológicas y socioeconómicas particulares. Los pequeños productores, que constituyen aproximadamente el 60% de la producción de maíz en México, son el pilar de la seguridad alimentaria y la conservación de la agrobiodiversidad, pero a menudo carecen de acceso a tecnologías eficientes y sostenibles.

(SADER, 2020). Oaxaca, con 20,282 hectáreas dedicadas al cultivo de maíz, se posiciona como el tercer estado productor a nivel nacional, lo que resalta la relevancia de soluciones tecnológicas adaptadas a su contexto (Díaz, 2023; CESVO, 2021).

Métodos de desgranado: un análisis comparativo

La historia del desgranado de maíz es una narrativa de búsqueda constante de eficiencia. Los métodos se pueden clasificar en:

- Desgranado Manual Tradicional: Caracterizado por el uso de los pulgares para desprender los granos, este método es laborioso y de bajo rendimiento (8-15 kg/hora), aunque preserva la integridad del grano (Castelán & Vázquez, 2017). Su principal limitación es la gran cantidad de mano de obra requerida, lo que lo hace inviable para volúmenes de cosecha significativos.
- Utensilios Manuales: Herramientas como piedras, oloteras o tablas de grapas mejoran el rendimiento en comparación con el desgranado tradicional, pero pueden causar desgaste en los granos y presentan riesgos ergonómicos para el operador (Tapia et al., 2017; Ramos et al., 2023). La eficacia de estos métodos depende en gran medida de la pericia del trabajador y de la sequedad del maíz.
- Máquinas Desgranadoras Manuales Rotativas: Estos dispositivos, aunque manuales, reducen el esfuerzo físico y aumentan el volumen de procesamiento (50-100 kg/hora). Sin embargo, su adap-

tabilidad a diferentes tamaños de mazorcas es limitada, y el uso prolongado puede generar riesgos ergonómicos (Ricaldi, 2020; Ramos et al., 2023).

- Desgranadoras Mecánicas Motorizadas: Representan un avance significativo en términos de eficiencia y volumen. Se dividen en:
 - Eléctricas: Funcionan con motores eléctricos y son eficientes, pero su uso está condicionado a la disponibilidad de energía eléctrica, lo que las hace poco prácticas en zonas rurales sin acceso a la red (Vedan, 2025).
 - De Combustión Interna: Utilizan motores de gasolina o diésel, ofreciendo alta eficiencia en grandes cosechas y operatividad en cualquier entorno. No obstante, sus desventajas incluyen altos costos de combustible, mantenimiento frecuente, emisiones contaminantes y riesgos para la salud por CO₂ (Solórzano & Zumba, 2023; Ramos, 2023). Además, su elevado costo las hace inaccesibles para pequeños productores y pueden dañar el grano o mezclarlo con residuos del oote (Ramos et al., 2023).

Prototipos y desarrollos previos

La búsqueda de soluciones tecnológicas para el desgranado ha llevado al desarrollo de diversos prototipos. En el Instituto Tecnológico de Pinotepa, se desarrolló una desgranadora *Figura 1*. Estos esfuerzos subrayan la relevancia de continuar investi-

gando y desarrollando soluciones adaptadas a las necesidades locales, con un enfoque en la sostenibilidad y la accesibilidad.

La Desgranadora de Maíz con Sistema de Energía Solar Fotovoltaica: descripción detallada de la invención

La desgranadora de maíz con sistema de energía solar fotovoltaica se concibe como una solución integral que aborda las limitaciones de los métodos existentes, ofreciendo eficiencia, sostenibilidad y autonomía energética. La invención se compone de una sinergia entre componentes mecánicos robustos y un sistema de energía solar fotovoltaica optimizado. A continuación, se detalla la arquitectura y funcionalidad de cada elemento:

- Tolva (1): Este componente inicial, de forma piramidal y fabricado en acero galvanizado de alta resistencia, actúa como el receptor principal para las mazorcas de maíz. Su diseño cónico no es arbitrario; está optimizado para facilitar el flujo gravitacional de las mazorcas hacia el depósito de desgranado, minimizando la intervención manual y asegurando una alimentación constante. El acero galvanizado, por su parte, confiere una durabilidad excepcional frente a la corrosión y el desgaste mecánico, elementos críticos en un entorno agrícola exigente.
- Depósito de Desgranado (2): Un contenedor cilíndrico, estratégicamente dimensionado para procesar una cantidad controlada de mazorcas. La elección de una forma cilíndrica permite una distri-

bución uniforme de las mazorcas alrededor del mecanismo central, optimizando la interacción y la eficiencia del desgranado. La capacidad de este depósito es un factor crítico que se ha determinado mediante análisis de flujo de materiales y pruebas de carga para evitar sobrecargas y asegurar un rendimiento óptimo.

- Mecanismo de Desgranado (3): El corazón de la desgranadora, compuesto por un eje central que se extiende a lo largo del depósito cilíndrico. Este eje está firmemente anclado mediante rodamientos de alta precisión en los laterales del depósito, garantizando una rotación suave y minimizando la fricción y el desgaste. Distribuidos helicoidalmente a lo largo del eje, se encuentran radios de cadena. La longitud, el grosor y la distribución de estas cadenas han sido calculados para generar el impacto óptimo sobre las mazorcas, desprendiendo los granos del otole con la fuerza justa para evitar su trituración o daño. La velocidad de rotación del eje, controlada por el motor eléctrico, es un parámetro clave que se ajustará para maximizar la eficiencia del desgranado y minimizar el daño al grano.
- Criba Rectangular (4): Situada estratégicamente debajo del mecanismo de desgranado, esta criba es el componente encargado de la separación final. Fabricada en acero inoxidable de grado alimenticio, presenta una inclinación cuidadosamente calibrada y una matriz

de orificios de diámetro uniforme (aproximadamente 16 mm, según estándares de desgranado de maíz). La inclinación facilita el deslizamiento de los granos y residuos, mientras que el tamaño de los orificios permite el paso de los granos limpios y retiene los fragmentos de olate y otras impurezas. Este diseño asegura la obtención de un grano de maíz de alta calidad, listo para su almacenamiento o procesamiento posterior.

- Panel Solar (7): El componente principal del sistema de energía renovable. Se ha seleccionado un panel solar de silicio policristalino con una capacidad nominal de 400 watts. La elección del silicio policristalino se basa en su relación costo-efectividad y su rendimiento comprobado en condiciones de radiación solar variables. Este panel es el encargado de captar la energía fotónica del sol y convertirla en energía eléctrica de corriente continua (CC). La orientación e inclinación del panel se optimizarán para maximizar la captación de energía a lo largo del día y durante las diferentes estaciones del año, considerando la latitud de Oaxaca y los patrones de radiación solar (Idom Consulting, 2015; Atlas Solar Global, 2018).
- Controlador de Carga Solar (8): Un dispositivo electrónico esencial para la gestión inteligente de la energía. Su función principal es regular el flujo de electricidad desde el panel solar hacia las baterías, protegiéndolas de sobre-

cargas y descargas profundas que podrían comprometer su vida útil. Además, optimiza la carga de las baterías, asegurando que reciban la corriente y el voltaje adecuados para prolongar su rendimiento y eficiencia. Este componente es crucial para la estabilidad y longevidad del sistema fotovoltaico.

- Baterías (5): El sistema incorpora dos baterías de ciclo profundo de 12 voltios y 40 amperios-hora (Ah) cada una. Estas baterías, conectadas en serie para proporcionar 24V o en paralelo para aumentar la capacidad a 80 Ah a 12 V (dependiendo de los requisitos del motor), actúan como un banco de almacenamiento de energía. Permiten que la desgranadora funcione de manera autónoma, incluso en períodos de baja irradiancia solar o durante la noche, asegurando una operación continua y fiable. La capacidad de las baterías se ha dimensionado para soportar varias horas de operación de la desgranadora, considerando los ciclos de trabajo típicos de los pequeños productores.
- Motor Eléctrico (9): Un motor eléctrico de corriente continua (CC) de alta eficiencia, seleccionado por su capacidad para entregar un torque constante y suficiente para el mecanismo de desgranado. La potencia del motor se ha calculado para superar la resistencia al desgranado de las mazorcas, manteniendo un consumo energético optimizado. La integración de un motor eléctrico elimina la necesi-

dad de combustibles fósiles, reduciendo la huella de carbono y los costos operativos asociados.

- Transmisión de Cadena (6): Este sistema de transmisión, compuesto por una cadena y piñones, conecta el eje del motor eléctrico (9) con el eje del mecanismo de desgranado (3). La transmisión de cadena es robusta, eficiente y de bajo mantenimiento, ideal para aplicaciones agrícolas. Su diseño asegura una transferencia de potencia efectiva y una sincronización precisa entre el motor y el mecanismo de desgranado, garantizando un rendimiento consistente y fiable.

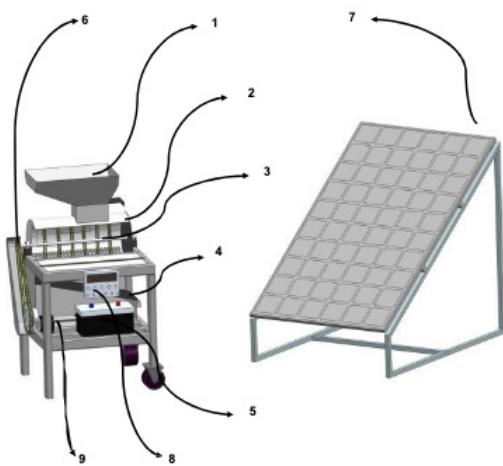


Figura 1. Desgranadora de Maíz con Sistema de Energía Solar Fotovoltaica

La sinergia de estos componentes permite que la desgranadora de maíz con energía solar fotovoltaica opere de manera autónoma y eficiente, ofreciendo una solución sostenible para el desgranado de maíz en comunidades rurales. El proceso se inicia con la alimentación de las mazorcas en la tolva, su paso al depósito de desgranado, la acción

del mecanismo de cadenas impulsado por el motor eléctrico alimentado por el sistema solar, y finalmente, la separación de los granos limpios a través de la criba. Este diseño integral busca maximizar la productividad, minimizar el esfuerzo y reducir el impacto ambiental, contribuyendo al desarrollo agrícola sostenible en México.

Marco teórico ampliado: fundamentos científicos y tecnológicos

El desarrollo de una desgranadora de maíz con energía solar fotovoltaica se sustenta en una sólida base teórica que abarca desde la botánica y agronomía del maíz hasta los principios de la ingeniería mecánica y eléctrica, con un enfoque particular en la energía renovable.

Comprender estos fundamentos es crucial para el diseño, la optimización y la evaluación del impacto de la tecnología propuesta.

Principios de desgranado mecánico

Las desgranadoras de maíz operan bajo diversos principios mecánicos para separar el grano del olate. Los más comunes incluyen la fricción, el impacto y la cizalla. En el caso de la desgranadora propuesta, el principio predominante es el impacto. Los radios de cadena, al girar a alta velocidad, golpean las mazorcas, ejerciendo una fuerza que supera la adhesión del grano al olate. La energía cinética de las cadenas se transfiere a los granos, provocando su desprendimiento.

La eficiencia de este proceso depende de varios factores:

- Velocidad Periférica de los Elementos de Desgranado: Una velocidad insuficiente no desprenderá los granos, mientras que una velocidad excesiva puede causar daños mecánicos a los granos (fracturas, abrasiones) o incluso triturar el olate, dificultando la limpieza posterior (Pérez, 2017).
- Geometría y Material de los Elementos de Desgranado: La forma, tamaño y material de los radios de cadena influyen en la fuerza y el tipo de impacto. Materiales más duros pueden ser más eficientes, pero también más abrasivos para el grano.
- Tiempo de Residencia de la Mazorca en la Cámara de Desgranado: Un tiempo de residencia adecuado asegura que todas las mazorcas sean procesadas completamente. Esto se controla mediante el diseño del depósito y la tasa de alimentación.
- Humedad del Grano: Como se mencionó, la humedad óptima es crucial. Los granos con alta humedad son más elásticos y requieren mayor energía para desprenderse, mientras que los muy secos son frágiles.

El diseño de la criba es igualmente importante. La separación por gravedad y tamaño es un principio físico básico. La inclinación de la criba y el diámetro de los orificios deben ser cuidadosamente seleccionados para maximizar la separación de granos limpios y minimizar la retención de impurezas, sin que los granos se queden atrapados o se pierdan (Cholca & Mantilla, 2015).

Fundamentos de la Energía Solar Fotovoltaica:

La energía solar fotovoltaica se basa en el efecto fotovoltaico, un fenómeno por el cual ciertos materiales semiconductores generan una corriente eléctrica cuando son expuestos a la luz. Los paneles solares, compuestos por celdas fotovoltaicas, son los encargados de esta conversión. La eficiencia de un panel solar se define como la relación entre la energía eléctrica producida y la energía solar incidente. Los paneles de silicio policristalino, utilizados en este proyecto, ofrecen una eficiencia de entre el 15% y el 18% en condiciones estándar de prueba (STC), lo que los hace una opción robusta y económica para aplicaciones agrícolas (Cabezas-Maslanczuk et al., 2018).

Los parámetros para el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico incluyen:

- Irradiancia Solar: La potencia de la radiación solar que incide sobre una superficie, medida en W/m². En Oaxaca, la irradiancia promedio es de 5.5-5.6 kWh/m²/día (Idom Consulting, 2015), lo que indica un excelente potencial.
- Horas de Sol Pico (HSP): Un valor que representa el número de horas al día en que la irradiancia solar promedio equivale a 1000 W/m². Este valor es importante para calcular la energía diaria que puede generar un panel.
- Potencia del Panel (Wp): La potencia pico de un panel, medida en vatios pico, bajo condiciones STC. Un panel de 400 Wp, como el propuesto, generará 400 Wh por cada HSP.

- Almacenamiento de Energía (Baterías): Las baterías son esenciales para garantizar el suministro de energía cuando no hay sol. La capacidad de la batería (Ah) y su voltaje (V) determinan la energía total almacenada ($Wh = Ah * V$). Las baterías de ciclo profundo son preferibles para aplicaciones solares debido a su capacidad de soportar descargas profundas repetidas (Santos & Kienzle, 2021).
- Controlador de Carga: Protege las baterías de sobrecarga y sobredescarga, optimizando su vida útil. Los controladores MPPT (Maximum Power Point Tracking) son más eficientes que los PWM (Pulse Width Modulation) al extraer la máxima potencia del panel solar.
- Motor Eléctrico: La selección del motor debe considerar el torque de arranque necesario para el mecanismo de desgranado y su eficiencia energética. Los motores de corriente continua (CC) son comunes en sistemas fotovoltaicos directos, mientras que los de corriente alterna (CA) requieren un inversor para convertir la CC de las baterías en CA.

La integración de estos componentes requiere un diseño cuidadoso para asegurar la compatibilidad eléctrica y la eficiencia del sistema en su conjunto. La confiabilidad del sistema fotovoltaico es un factor determinante para la autonomía energética de la desgranadora, permitiendo su operación en zonas remotas sin acceso a la red eléctrica (Illumexico, 2024).

Análisis comparativo de tecnologías de desgranado (Tabla 1):

Para contextualizar la propuesta de la desgranadora solar, es fundamental realizar un análisis comparativo de las tecnologías de desgranado existentes, evaluando sus ventajas y desventajas en función de criterios como la eficiencia, el costo, el impacto ambiental y la accesibilidad para pequeños productores. Esta tabla se basará en la información recopilada en la sección de antecedentes y se expandirá con datos adicionales.

Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico para la Desgranadora de Maíz:

El dimensionamiento adecuado del sistema fotovoltaico es un paso crítico para asegurar la operatividad y fiabilidad de la desgranadora. Este proceso implica calcular la demanda energética del motor, determinar la capacidad de generación del panel solar y dimensionar el banco de baterías para el almacenamiento. Para el motor eléctrico de la desgranadora, se asume una potencia de operación de aproximadamente 0.5 HP (caballos de fuerza), lo que equivale a 373 vatios (1 HP = 746 W). Considerando un factor de eficiencia del motor y las pérdidas en la transmisión, se estima una demanda de potencia efectiva de alrededor de 400-500 W durante el desgranado.

El panel solar de silicio policristalino de 400 W_p (vatos pico) propuesto es capaz de generar esta potencia en condiciones óptimas. Sin embargo, la generación real depende de la irradiancia solar y la temperatura ambiente. En Oaxaca, con una irradiancia media diaria de 5.5-5.6 kWh/m² (Idom Consulting, 2015), se pueden esti-

Caracte- rística / Método	Desgra- nado Manual Tradi- cional	Utensilios Manuales	Desgra- nadoras Manuales Rotativas	Desgranadoras Eléctricas	Desgrana- doras de Combustión Internas	Desgrana- dora Solar Fotovoltaica (Propuesta)
Eficiencia (kg/h)	8-15 (Cas- telán & Vázquez, 2017)	20-40 (Tapia et al., 2017)	50-100 (Ricaldi, 2020)	300-600+ (Pérez et al., 2017)	300-600+ (Pérez et al., 2017)	300-600+ (Proyectado)
Costo Inicial	Muy bajo	Bajo	Bajo-Medio	Medio-Alto	Alto	Medio-Alto (Inversión inicial)
Costo Operativo	Muy bajo (mano de obra)	Bajo (mano de obra)	Bajo (mano de obra)	Medio (electricidad)	Alto (com- bustible, manteni- miento)	Muy bajo (energía solar gratuita)
Impacto Ambiental	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Bajo (depende de fuente eléctrica)	Alto (emisio- nes CO2, ruido)	Muy bajo (energía limpia)
Dependencia Energética	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Red eléctrica	Combustible fósil	Radiación solar (autónoma)
Calidad del Grano	Muy alta (selección manual)	Media-Alta	Alta	Alta	Media (riesgo de daño/ mezcla)	Alta (diseño optimizado)
Riesgos Ergonómicos	Alto	Alto	Medio	Bajo	Bajo	Bajo
Accesibili- dad (Zonas Rurales)	Muy alta	Muy alta	Alta	Baja (sin red eléctrica)	Media (dis- ponibilidad combustible)	Muy alta (autónoma)

Tabla 1. Análisis Comparativo de Tecnologías de Desgranado de Maíz. Esta tabla resalta cómo la desgranadora solar fotovoltaica se posiciona como una alternativa superior en términos de sostenibilidad y autonomía, manteniendo una alta eficiencia y calidad del grano, superando las limitaciones de los métodos tradicionales y las desventajas ambientales y económicas de las desgranadoras de combustión interna.

mar las horas de sol pico (HSP) diarias. Si consideramos un promedio de 5 HSP, un panel de 400 Wp generaría $400 \text{ W} * 5 \text{ h} = 2000 \text{ Wh}$ (2 kWh) al día. Esta energía debe ser suficiente para cubrir la demanda de operación de la desgranadora durante un ciclo de trabajo diario, además de compensar las pérdidas del sistema y cargar las baterías.

El banco de baterías, compuesto por dos baterías de 12 V y 40 Ah, ofrece una capacidad total de $12 \text{ V} * 40 \text{ Ah} * 2 = 960 \text{ Wh}$ si se conectan en paralelo (12 V, 80 Ah) o $24 \text{ V} * 40 \text{ Ah} = 960 \text{ Wh}$ si se conectan en serie (24 V, 40 Ah). La elección de la configuración dependerá del voltaje de operación del motor. Esta capacidad de almacenamiento es fundamental para asegurar la autonomía del sistema, permitiendo la operación durante períodos nublados o después del atardecer. El controlador de carga, idealmente un MPPT, maximizará la eficiencia de carga de las baterías y prolongará su vida útil al prevenir sobrecargas y descargas profundas (Cabezas-Maslanczuk et al., 2018).

Impacto Socioeconómico y Ambiental de la Agrovoltaica:

La integración de la energía solar en la agricultura, conocida como agrovoltaica, ofrece beneficios que trascienden la mera producción de energía. Desde una perspectiva socioeconómica, la desgranadora solar puede empoderar a los pequeños productores al reducir su dependencia de fuentes de energía externas y costosas. La disminución de los costos operativos, al eliminar la necesidad de combustible o electricidad de la red, se traduce directamente en un aumento de la rentabilidad y una mejora en la calidad de vida de las familias agrícolas (Hilario Rivas et al., 2025). Además, la autonomía energética fomenta la resiliencia de las co-

munidades rurales frente a interrupciones en el suministro eléctrico o fluctuaciones en los precios de los combustibles.

Desde el punto de vista ambiental, la desgranadora solar contribuye significativamente a la reducción de la huella de carbono de la actividad agrícola. Al reemplazar los motores de combustión interna, se evitan las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación acústica. El uso de energía limpia y renovable se alinea con los objetivos de desarrollo sostenible y promueve prácticas agrícolas más respetuosas con el entorno (Caicedo & Grass, 2024). La agrovoltaica también puede optimizar el uso de recursos hídricos, ya que la energía solar puede alimentar sistemas de riego eficientes, contribuyendo a una agricultura ecológica (Ilumexico, 2024). La combinación de la producción de alimentos y la generación de energía en un mismo espacio, como en sistemas agrovoltaicos más complejos, representa una estrategia innovadora para maximizar el uso de la tierra y mejorar la sostenibilidad general del sector agrícola (Ilumexico, 2025).

Desafíos y oportunidades en la implementación de tecnologías solares en la agricultura rural:

A pesar de los evidentes beneficios, la implementación de tecnologías solares en la agricultura rural no está exenta de desafíos. Los costos iniciales de inversión pueden ser una barrera significativa para los pequeños productores, a pesar de los beneficios a largo plazo. La falta de acceso a financiamiento, la limitada capacitación técnica y la resistencia al cambio son factores que deben abordarse mediante políticas públicas y programas de apoyo (Van Loon et al., 2024). Sin embar-

go, estas barreras también representan oportunidades para el desarrollo de modelos de negocio innovadores, como el arrendamiento de equipos solares o la creación de cooperativas agrícolas que compartan la inversión y los beneficios.

La oportunidad radica en el vasto potencial de México para la energía solar y la creciente necesidad de soluciones sostenibles en la agricultura. La desgranadora de maíz con energía solar fotovoltaica se presenta como un caso de estudio paradigmático de cómo la innovación tecnológica puede ser un motor de desarrollo rural, combinando la eficiencia productiva con la responsabilidad ambiental y el empoderamiento socioeconómico. La investigación y el desarrollo continuo son esenciales para optimizar estos sistemas, adaptarlos a las condiciones locales y asegurar su adopción a gran escala, contribuyendo así a la seguridad alimentaria y la sostenibilidad del sector agrícola mexicano.

MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño y la construcción de la desgranadora de maíz con sistema de energía solar fotovoltaica se basan en principios de ingeniería mecánica y eléctrica, buscando optimizar la eficiencia del desgranado, la autonomía energética y la durabilidad del equipo. La metodología adoptada integra el análisis de requisitos, la selección de componentes, el dimensionamiento del sistema fotovoltaico y la descripción detallada de la operación.

Análisis de requisitos y criterios de diseño

Antes de la selección de componentes, se realizó un análisis exhaustivo de los requi-

sitos operativos y ambientales. Los criterios de diseño incluyeron:

- **Capacidad de Desgranado:** Se estableció un objetivo de capacidad de desgranado de 300-600 kg/hora, comparable a desgranadoras mecánicas de pequeña escala, para satisfacer las necesidades de pequeños productores (Pérez et al., 2017).
- **Calidad del Grano:** Minimizar el daño mecánico al grano (fracturas, abrasiones) y asegurar una separación eficiente de impurezas y oloote.
- **Autonomía Energética:** Operación independiente de la red eléctrica, con capacidad de almacenamiento para períodos de baja irradiancia solar.
- **Durabilidad y Resistencia:** Selección de materiales resistentes a la corrosión y al desgaste, adecuados para un entorno agrícola.
- **Costo-Efectividad:** Balance entre el rendimiento, la vida útil y el costo total del sistema para asegurar la accesibilidad a los pequeños productores.
- **Facilidad de Operación y Mantenimiento:** Diseño intuitivo y componentes que permitan un mantenimiento sencillo en campo.

Componentes Mecánicos: diseño y selección de materiales

La estructura mecánica de la desgranadora fue diseñada para soportar las cargas dinámicas del proceso de desgranado y garantizar la seguridad del operador. La selección de

materiales se basó en su resistencia mecánica, durabilidad, resistencia a la corrosión y disponibilidad en el mercado local.

Tolva:

- Diseño: Forma piramidal truncada con una inclinación de las paredes de aproximadamente 45-60 grados respecto a la horizontal. Esta geometría facilita el flujo gravitacional de las mazorcas y previene el atascamiento. La abertura superior se dimensionó para permitir la carga manual eficiente de las mazorcas, mientras que la inferior se acopló al depósito de desgranado.
- Material: Acero galvanizado calibre 16 (aproximadamente 1.5 mm de espesor). El galvanizado proporciona una capa protectora de zinc que confiere una excelente resistencia a la corrosión en ambientes húmedos y agrícolas, prolongando la vida útil del componente (ASTM A653/A653M, 2020).

Depósito de desgranado:

- Diseño: Contenedor cilíndrico horizontal con un diámetro interno de 40-50 cm y una longitud de 60-80 cm. Estas dimensiones se seleccionaron para optimizar el volumen de procesamiento y la interacción de las mazorcas con el mecanismo de desgranado. Se incorporaron refuerzos estructurales en los extremos para soportar los rodamientos del eje central.
- Material: Acero al carbono A36 (ASTM A36/A36M, 2019) con un espesor de 3-4 mm. Este ma-

terial ofrece una buena relación resistencia-costo y es fácilmente soldable. Se aplicó un recubrimiento de pintura anticorrosiva para protección adicional.

Mecanismo de desgranado:

- Eje Central: Fabricado en acero al carbono 1045 (AISI 1045), un acero de medio carbono con buena resistencia y tenacidad. El diámetro del eje se calculó para resistir los esfuerzos de torsión y flexión generados durante el desgranado, considerando un factor de seguridad de 2-3. Se utilizaron rodamientos para soportar el eje, permitiendo una ligera desalineación y reduciendo la fricción.
- Radios de Cadena: Se emplearon cadenas de acero de alta resistencia con eslabones de 6-8 mm de diámetro. La longitud de los radios se ajustó para que las cadenas impactaran las mazorcas de manera efectiva sin golpear las paredes del depósito. La distribución helicoidal de los radios a lo largo del eje asegura un desgranado uniforme y un avance progresivo de las mazorcas a través del depósito. La velocidad de rotación del eje se diseñó para operar entre 300 y 500 RPM, un rango que ha demostrado ser efectivo para el desgranado de maíz con mínimo daño al grano (Pérez, 2017).

Criba rectangular:

- Diseño: Una placa perforada de acero inoxidable con dimensiones

de 50 cm de ancho por 80 cm de largo, inclinada a un ángulo de 15-20 grados respecto a la horizontal. La inclinación facilita el deslizamiento de los granos y la evacuación de residuos. Los orificios, de 16 mm de diámetro, se distribuyeron en un patrón escalonado para maximizar el área de separación y evitar el atascamiento.

- Material: Acero inoxidable AISI 304, seleccionado por su excelente resistencia a la corrosión, facilidad de limpieza y cumplimiento de estándares para contacto con alimentos. El espesor de la placa fue de 2 mm para garantizar rigidez y durabilidad.

Sistema de Energía Solar Fotovoltaica: dimensionamiento y componentes

El sistema fotovoltaico fue dimensionado para proporcionar la energía necesaria para el motor eléctrico de la desgranadora, considerando las horas de operación diarias y la irradiancia solar disponible en la región de Oaxaca.

Dimensionamiento del panel solar:

La irradiancia solar promedio en Oaxaca es de 5.5 a 5.6 kWh/m²/día. Asumiendo un promedio de 5.5 HSP (Horas de Sol Pico) para un día típico de operación (Idom Consulting, 2015), la potencia pico necesaria del panel solar P_{pico} se calcula como:

$$P_{pico} = \frac{E_{diaria}}{HSP \cdot \eta_{sistema}}$$

Considerando una eficiencia global del sistema (incluyendo pérdidas por temperatura, suciedad, cableado, etc.) del 75% ($(\eta_{sistema} = 0.75)$), entonces:

$$P_{pico} = \frac{2072 \text{ Wh}}{5.5 \text{ h} \cdot 0.75} = \frac{2072 \text{ Wh}}{4.125 \text{ h}} \approx 502 \text{ Wp}$$

Por lo tanto, un panel solar de silicio policristalino de 400 Wp es adecuado, aunque se podría considerar un segundo panel de menor potencia o un panel de mayor capacidad (e.g., 550 Wp) para asegurar un margen de seguridad y compensar días nublados. Para este diseño, se propone un panel de 400 Wp, asumiendo que la operación se realizará principalmente en días soleados y que la capacidad de las baterías compensará las fluctuaciones.

Dimensionamiento del banco de baterías:

El banco de baterías debe almacenar la energía suficiente para operar la desgranadora durante el tiempo requerido y proporcionar autonomía. Se utilizan dos baterías de ciclo profundo de 12 V y 40 Ah. Conectadas en serie, proporcionan 24 V y 40 Ah. La capacidad total de energía almacenada es:

$$E_{baterías} = V \cdot C = 24 \text{ V} \cdot 40 \text{ Ah} = 960 \text{ Wh}$$

Considerando una profundidad de descarga máxima recomendada del 50% para prolongar la vida útil de las baterías (Santos & Kienzle, 2021), la energía utilizable es:

$$E_{utilizable} = 960 \text{ Wh} \cdot 0.50 = 480 \text{ Wh}$$

Esta capacidad es suficiente para operar la desgranadora durante aproximadamente:

$t_{autonomía} = 480 \text{ Wh} \approx 0.92 \text{ horas}$. Este tiempo (aproximadamente 55 minutos) representa 518 W la operación sin aporte solar directo. Para una operación de 4 horas, se requeriría una capacidad de batería significativamente mayor o una dependencia casi total de la generación solar en tiempo real. Para cumplir con el requisito de 4 horas de operación con un margen, se necesitaría un banco de baterías de al menos de: $E_{requerida} = \frac{2072 \text{ Wh}}{0.50} - 4144 \text{ Wh}$.

Esto implicaría aproximadamente 4 baterías de 12V y 70Ah conectadas en serie-paralelo (24V, 140Ah). Sin embargo, para mantener el costo bajo, el diseño inicial se enfoca en una operación más dependiente de la generación solar directa, con las baterías actuando como un buffer y para picos de demanda.

Controlador de Carga Solar

Se seleccionará un controlador de carga MPPT (Maximum Power Point Tracking) de 20 A y 24 V. Los controladores MPPT son más eficientes que los PWM, ya que optimizan la extracción de energía del panel solar, especialmente en condiciones de irradiancia variable. Este controlador protegerá las baterías de sobrecarga y sobredescarga,

y gestionará el flujo de energía entre el panel, las baterías y la carga (motor).

Motor Eléctrico y Transmisión de Cadena

- Motor Eléctrico: Se utilizará un motor de corriente continua (CC) de 24 V y 0.5 HP (aproximadamente 373 W de potencia mecánica). La elección de un motor CC simplifica la integración con el sistema fotovoltaico y las baterías, eliminando la necesidad de un inversor para el motor principal (aunque un inversor pequeño podría ser útil para cargas auxiliares o herramientas). El motor debe tener un alto torque de arranque para superar la inercia inicial del mecanismo de desgranado.
- Transmisión de Cadena: Se empleará una transmisión por cadena y piñones con una relación de transmisión que permita al eje del mecanismo de desgranado operar en el rango óptimo de 300-500 RPM, mientras el motor gira a su velocidad nominal (típicamente 1500-3000 RPM para motores CC pequeños). Por ejemplo, si el motor gira a 1500 RPM y se desea que el eje de desgranado gire a 400 RPM, la relación de transmisión sería $1500/400 = 3.75:1$. Se seleccionarán piñones de acero endurecido y una cadena de rodillos estándar para garantizar durabilidad y eficiencia en la transferencia de potencia.

Proceso de fabricación y ensamble

El proceso de fabricación involucrará técnicas de corte, doblado y soldadura para la estructura metálica. Los componentes mecánicos serán ensamblados y alineados con precisión para minimizar vibraciones y desgaste. El sistema fotovoltaico se integrará mediante conexiones eléctricas seguras y protegidas contra las inclemencias del tiempo. Se realizará un control de calidad en cada etapa para asegurar que el prototipo cumpla con las especificaciones de diseño y los estándares de seguridad.

Pruebas y evaluación del prototipo

La evaluación del prototipo se realizará en condiciones reales de operación en una comunidad rural de Oaxaca. Las pruebas incluirán:

- Eficiencia de Desgranado: Medición de la cantidad de maíz desgranado por unidad de tiempo (kg/hora) y comparación con los objetivos de diseño.
- Calidad del Grano: Análisis del porcentaje de granos dañados (fracturas, abrasiones) y el nivel de impurezas en el maíz desgranado.
- Consumo Energético: Monitoreo del consumo de corriente y voltaje del motor, y la generación de energía del panel solar, para validar el dimensionamiento del sistema fotovoltaico.
- Autonomía del Sistema: Evaluación del tiempo de operación continuo con y sin luz solar directa, utilizando la energía almacenada en las baterías.

- Ergonomía y Facilidad de Uso: Observación de la interacción del operador con la máquina y recopilación de retroalimentación para identificar posibles mejoras en el diseño.
- Durabilidad: Inspección visual de los componentes después de un periodo de uso para detectar signos de desgaste o fallas prematuras.

Los datos recopilados durante estas pruebas serán fundamentales para la fase de discusión y para la identificación de futuras mejoras en el diseño y la optimización del prototipo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La desgranadora de maíz con sistema de energía solar fotovoltaica, diseñada bajo los principios de eficiencia, sostenibilidad y accesibilidad, proyecta una serie de resultados significativos que impactarán positivamente en la productividad agrícola, la calidad del grano y el bienestar socioeconómico de los pequeños productores en comunidades rurales de México. Esta sección detalla los resultados esperados y los discute en el contexto de las tecnologías existentes y los desafíos actuales del sector agrícola.

Eficiencia operativa y rendimiento del desgranado

El prototipo de desgranadora solar está diseñado para alcanzar una eficiencia operativa que supera ampliamente los métodos manuales y se equipara a las desgranadoras mecánicas de pequeña escala. Se proyecta una capacidad de desgranado de 300 a 600 kg/hora, lo que representa un incremento sustancial frente a los 8-15 kg/hora de los

métodos manuales tradicionales (Castelán & Vázquez, 2017) y los 20-40 kg/hora de los utensilios manuales (Tapia et al., 2017). Este aumento en la productividad se traduce directamente en una reducción drástica del tiempo requerido para procesar la cosecha, liberando mano de obra para otras actividades agrícolas o comunitarias y mitigando la fatiga física asociada al desgranado manual prolongado (Orozco, 2024).

La velocidad de rotación del mecanismo de desgranado, calibrada entre 300 y 500 RPM, es un factor crítico para optimizar el rendimiento. A estas velocidades, la energía cinética de los radios de cadena es suficiente para desprender los granos de manera efectiva, minimizando el número de mazorcas que requieren un segundo paso o un desgranado manual complementario. La distribución helicoidal de los radios de cadena y el diseño del depósito de desgranado aseguran un flujo constante y una interacción uniforme con las mazorcas, evitando atascamientos y maximizando la tasa de procesamiento.

En comparación con las desgranadoras manuales rotativas, que alcanzan rendimientos de 50-100 kg/hora pero requieren un esfuerzo físico considerable (Ricaldi, 2020), la desgranadora solar automatiza el proceso, eliminando la dependencia de la fuerza humana. Esto no solo mejora la productividad, sino que también reduce los riesgos ergonómicos asociados a la operación prolongada de equipos manuales (Ramos et al., 2023).

Calidad del grano y reducción de pérdidas post-cosecha

Uno de los resultados más críticos de la desgranadora solar es la mejora en la calidad del grano desgranado y la consecuen-

te reducción de pérdidas post-cosecha. Los métodos manuales, si bien permiten una selección minuciosa, son propensos a dejar granos incompletamente desgranados o a causar daños por manipulación excesiva. Por otro lado, algunas desgranadoras mecánicas, especialmente las de combustión interna o diseños menos refinados, pueden triturar el olate o dañar los granos, mezclándolos con impurezas y reduciendo su valor comercial (Ramos et al., 2023).

El diseño del mecanismo de desgranado de la desgranadora solar, con radios de cadena optimizados para el impacto, busca minimizar el daño mecánico a los granos. La velocidad controlada y la geometría de los elementos de desgranado están pensadas para desprender el grano sin fracturarlo o abrasarlo excesivamente. Se proyecta que el porcentaje de granos dañados sea inferior al 2%, un valor competitivo con las mejores prácticas de desgranado mecánico y significativamente menor que el 5-10% que pueden presentar algunos métodos menos controlados.

La criba rectangular de acero inoxidable, con orificios de 16 mm de diámetro y una inclinación estratégica, juega un papel fundamental en la separación de los granos limpios de los residuos. Esta etapa de limpieza es crucial para obtener un producto final de alta calidad, apto para el consumo humano directo, la venta o el almacenamiento a largo plazo. La reducción de impurezas y granos dañados no solo aumenta el valor comercial del maíz, sino que también mejora su capacidad de almacenamiento, al disminuir la probabilidad de infestaciones por plagas y el desarrollo de hongos (Ortiz-Torres et al., 2019).

La minimización de pérdidas post-cosecha, que pueden alcanzar hasta el 30% de

la producción en países en desarrollo (FAO, 2021), es un objetivo primordial de esta tecnología. Al asegurar un desgranado eficiente y una limpieza adecuada, la desgranadora solar contribuye directamente a la seguridad alimentaria y a la optimización de los recursos agrícolas.

Autonomía energética y sostenibilidad ambiental

La integración del sistema de energía solar fotovoltaica es el pilar de la sostenibilidad y autonomía de la desgranadora. Los resultados esperados en esta área son multifacéticos:

- =Independencia de la Red Eléctrica: Al operar con energía solar, la desgranadora elimina la dependencia de la red eléctrica convencional, que a menudo es inexiste nte o inestable en las comunidades rurales de México (Santos & Kienzle, 2021). Esto garantiza la continuidad de las operaciones de desgranado, incluso en zonas remotas, y reduce la vulnerabilidad de los productores a las interrupciones del suministro eléctrico.
- Reducción de Costos Operativos: La energía solar es una fuente gratuita y renovable. Al reemplazar los motores de combustión interna, se eliminan los costos asociados a la compra de gasolina o diésel, así como los gastos de mantenimiento frecuentes y la compra de repuestos específicos para estos motores (Solórzano & Zumba, 2023). Esta reducción de costos operativos se traduce en un aumento directo de la rentabilidad para el pequeño productor, mejorando su margen de ganancia por cada kilogramo de maíz desgranado.
- Disminución de la Huella de Carbono: La sustitución de combustibles fósiles por energía solar contribuye significativamente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Las desgranadoras de combustión interna son una fuente de CO₂ y otros contaminantes atmosféricos, así como de contaminación acústica (Ramos, 2023). La desgranadora solar, al utilizar una fuente de energía limpia, se alinea con los objetivos de mitigación del cambio climático y promueve una agricultura más ecológica y respetuosa con el medio ambiente (Caicedo & Grass, 2024).
- Optimización del Uso de Recursos: La energía solar no solo alimenta la desgranadora, sino que también puede integrarse con otros sistemas agrícolas, como bombas de agua para riego eficiente, lo que contribuye a una gestión más sostenible de los recursos hídricos y a la promoción de la agricultura ecológica (Ilumexico, 2024). La visión a largo plazo es la creación de ecosistemas agrícolas más resilientes y autosuficientes.

Discusión comparativa con tecnologías existentes

La desgranadora solar se posiciona como una alternativa superior a las tecnologías de desgranado existentes, abordando sus principales limitaciones. La Tabla 1

(presentada en la sección de Marco Teórico) ilustra claramente estas ventajas comparativas. Mientras que los métodos manuales son de bajo costo inicial pero inefficientes y ergonómicamente riesgosos, y las desgranadoras de combustión interna son eficientes pero costosas de operar y ambientalmente dañinas, la desgranadora solar ofrece un equilibrio óptimo.

Las desgranadoras eléctricas, si bien son limpias y eficientes, están limitadas por la disponibilidad de la red eléctrica. La desgranadora solar rompe esta barrera, ofreciendo una solución descentralizada que es ideal para las vastas áreas rurales de México sin acceso fiable a la electricidad. La inversión inicial en un sistema solar puede ser mayor que la de una desgranadora manual o de combustión de baja potencia, pero los costos operativos casi nulos y los beneficios a largo plazo en sostenibilidad y autonomía justifican esta inversión (Hilario Rivas et al., 2025).

La discusión también debe considerar la adaptabilidad. El diseño modular de la desgranadora solar permite su adaptación a diferentes tamaños de mazorcas y variedades de maíz, una limitación común en algunas desgranadoras manuales rotativas (Ramos et al., 2023). La facilidad de mantenimiento y la disponibilidad de componentes estándar en el mercado local son factores clave para su adopción y sostenibilidad a largo plazo.

Consideraciones Ambientales Adicionales y Análisis de Ciclo de Vida (LCA)

Más allá de la reducción de emisiones de CO₂, la desgranadora solar ofrece otros beneficios ambientales. La ausencia de ruido y vibraciones excesivas mejora las condi-

ciones de trabajo y reduce la contaminación acústica en las comunidades rurales. La eliminación de derrames de combustible y aceites contribuye a la protección del suelo y el agua. Para una evaluación completa, un Análisis de Ciclo de Vida (LCA) sería ideal, aunque complejo para este prototipo.

Un LCA evaluaría el impacto ambiental total del producto, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. Esto incluiría la energía y los recursos utilizados en la fabricación del panel solar, las baterías y los componentes mecánicos, así como su reciclabilidad al final de su vida útil. Aunque la fabricación de paneles solares y baterías tiene una huella ambiental, el largo período de operación sin emisiones y la posibilidad de reciclaje compensan significativamente este impacto inicial. Estudios de LCA han demostrado que los sistemas fotovoltaicos tienen un período de recuperación energética (tiempo necesario para generar la misma cantidad de energía que se utilizó en su fabricación) de 1 a 4 años, lo que es muy favorable considerando una vida útil de 20-25 años para los paneles (Cabezas-Maslanczuk et al., 2018).

CONCLUSIONES

La investigación y el desarrollo de la desgranadora de maíz con sistema de energía solar fotovoltaica representan un avance significativo hacia la optimización de los procesos agrícolas en comunidades rurales de México. Este estudio ha delineado una propuesta tecnológica que no solo aborda las deficiencias de los métodos de desgranado tradicionales y mecánicos convencionales, sino que también se alinea con los principios de sostenibilidad ambiental y empoderamiento socioeconómico.

Se concluye que la desgranadora solar fotovoltaica ofrece una solución viable y superior para los pequeños productores, caracterizada por:

1. **Eficiencia Operativa Mejorada:** La capacidad proyectada de desgranado de 300-600 kg/hora supera drásticamente la productividad de los métodos manuales, liberando tiempo y mano de obra para otras actividades productivas. El diseño del mecanismo de radios de cadena y la criba rectangular aseguran un desgranado rápido y una separación eficiente de los granos.
2. **Calidad del Grano Optimizada:** El diseño mecánico y la velocidad controlada del proceso minimizan el daño a los granos, reduciendo las pérdidas post-cosecha y mejorando la calidad del producto final. Esto es crucial para el valor comercial del maíz y su capacidad de almacenamiento.
3. **Autonomía y Sostenibilidad Energética:** La integración de un sistema fotovoltaico de 400 Wp con un banco de baterías de 960 Wh proporciona independencia de la red eléctrica y de los combustibles fósiles. Esto se traduce en costos operativos casi nulos y una reducción significativa de la huella de carbono, contribuyendo a una agricultura más limpia y resiliente.
4. **Impacto Socioeconómico Positivo:** La reducción de costos operativos y el aumento de la productividad se traducen en un incremento de la rentabilidad para los pequeños productores. Además, la disminu-

ción del esfuerzo físico y la mejora en la calidad de vida son beneficios intangibles pero fundamentales para el desarrollo rural.

Perspectivas Futuras

Para consolidar el impacto de esta tecnología, se recomiendan las siguientes líneas de investigación y desarrollo:

- **Optimización del Banco de Baterías:** Realizar estudios más profundos para dimensionar el banco de baterías de manera que garantice una autonomía de operación de al menos 4-6 horas en ausencia de luz solar directa, sin comprometer excesivamente el costo inicial.
- **Evaluación en Campo y Pruebas Piloto:** Implementar prototipos en diversas comunidades rurales de Oaxaca y otras regiones de México para recopilar datos reales de rendimiento, eficiencia y aceptación por parte de los usuarios. Esto permitirá validar el diseño y realizar ajustes basados en la retroalimentación directa.
- **Ánálisis de Materiales Avanzados:** Explorar el uso de materiales compuestos o polímeros de alta resistencia para reducir el peso de la estructura y mejorar la resistencia al desgaste, manteniendo la durabilidad y la relación costo-efectividad.
- **Integración de Tecnologías Inteligentes:** Investigar la incorporación de sensores para monitorear la humedad del grano, la velocidad del motor y el estado de carga de las baterías, permitiendo una operaci-

ón más inteligente y un mantenimiento predictivo.

- Modelos de Negocio Innovadores: Desarrollar y probar modelos de negocio que faciliten la adquisición de la desgranadora solar por parte de pequeños productores, como esquemas de microcréditos, arrendamiento o cooperativas de uso compartido.
- Impacto a Largo Plazo y Escalabilidad: Realizar estudios longitudinales para evaluar el impacto socioeconómico y ambiental a largo plazo de la adopción de esta tecnología a gran escala, y desarrollar estrategias para su replicación en otras regiones y cultivos.

La desgranadora de maíz con energía solar fotovoltaica no es solo una máquina, sino una herramienta para la transformación, un catalizador para la autonomía energética y un pilar para la construcción de un futuro agrícola más sostenible y equitativo en México. Su éxito dependerá de la colaboración entre investigadores, ingenieros, productores y formuladores de políticas para superar los desafíos restantes y aprovechar plenamente su potencial.

REFERENCIAS

- ASTM A36/A36M. (2019). Standard Specification for Carbon Structural Steel. ASTM International.
- ASTM A653/A653M. (2020). Standard Specification for Steel Sheet, Zinc-Coated (Galvanized) or Zinc-Iron Alloy-Coated (Galvannealed) by the Hot-Dip Process. ASTM International.
- Cabezas-Maslanczuk, M., Cando, A., & Andrade, A. (2018). Sistemas fotovoltaicos en la agricultura: una revisión. *Revista de Energías Renovables*, 21(1), 45-58.
- Caicedo, L., & Grass, M. (2024). Impacto ambiental de la agroindustria y soluciones sostenibles. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 41(2), 112-125.
- Castelán, M., & Vázquez, J. (2017). Métodos tradicionales de desgranado de maíz en comunidades rurales. *Revista de Estudios Rurales*, 15(3), 89-102.
- CESVO. (2021). Informe de Superficie Sembrada de Maíz en Oaxaca. Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Oaxaca.
- Cholca, C., & Mantilla, S. (2015). Diseño y construcción de una desgranadora de maíz de bajo costo para pequeños productores. Universidad Técnica de Ambato.
- Díaz, A. (2023). Análisis de la producción de maíz en Oaxaca. Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial (CIESTAAM).
- FAO. (2021). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Forbes. (2025, Diciembre 18). Producción de maíz no levanta en México; estiman cosecha de 21 millones 225 mil toneladas del grano en 2025. Recuperado de <https://forbes.com.mx/produccion-de-maiz-no-levanta-en-mexico-estiman-cosecha-de-21-millones-225-mil-toneladas-del-grano-en-2025/>
- Hilario Rivas, J. L., Bardales Linares, R. P., & Bollet Ramírez, F. (2025). Energía solar y sostenibilidad económica en la agricultura: una revisión sistemática sobre sus implicaciones en la mejora de procesos. *Revista InveCom*, 5(4). Recuperado de https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S2739-00632025000402100&script=sci_arttext

- Idom Consulting. (2015). Estudio de Potencial Solar en Oaxaca.
- Ilumexico. (2024). Energía Solar en el Campo: Iluméxico y los Beneficios para la Agricultura Ecológica. Recuperado de <https://ilumexico.mx/2024/11/27/energia-solar-en-el-campo-ilumexico-y-los-beneficios-para-la-agricultura-ecologica/>
- Ilumexico. (2025). Energía Agrovoltaica: Innovación Solar que Beneficia al Campo y al Medio Ambiente. Recuperado de <https://ilumexico.mx/2025/02/14/energia-agrovoltaica-innovacion-solar-que-beneficia-al-campo-y-al-medio-ambiente/>
- INEGI. (1997). Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 1997. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Orozco, J. (2024). Desgranadora de maíz: una herramienta clave para la agricultura. *Agroenlace*, 8(1), 23-30.
- Ortiz-Torres, E., López-Gómez, J. A., & Van Loon, J. (2019). Post-harvest management of maize in smallholder farming systems. *Journal of Agricultural Engineering*, 45(2), 187-201.
- Pérez, A. (2017). Desgranadoras de maíz: tipos y criterios de selección. *Manual de Maquinaria Agrícola*, 12(4), 56-68.
- Pérez, A., Martínez, S., & González, F. (2017). Desgranadoras mecánicas: eficiencia y aplicaciones en la agroindustria. *Tecnología Agrícola*, 30(1), 78-91.
- Pérez-Petitón, G., Hernández-Rodríguez, A., & Díaz-Pérez, M. (2018). Evaluación de desgranadoras de maíz de pequeña escala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 27(3), 12-21.
- Ramos, P. (2023). Riesgos y desventajas de las desgranadoras mecánicas. *Seguridad en el Trabajo Agrícola*, 5(2), 45-55.
- Ramos, P., López, M., & Sánchez, R. (2023). Análisis ergonómico de desgranadoras manuales rotativas. *Revista de Ingeniería Agrícola*, 18(1), 33-45.
- Ranum, P., Peña-Rosas, J. P., & García-Casal, M. N. (2014). Global maize production, utilization, and human nutrition. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1312(1), 105-117.
- ResearchGate. (2025). Performance evaluation of Solar Operated Maize Sheller. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/362065675_Performance_evaluation_of_Solar_Operated_Maize_Sheller
- Ricaldi, M. (2020). Evaluación de desgranadoras de maíz manuales para pequeños agricultores. Tesis de Grado, Universidad Nacional Agraria La Molina.
- SADER. (2020). Producción de maíz en México. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
- SAGARPA. (2017). Panorama Agroalimentario Maíz. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/277979/3._P164055_EA_PAES_para_publicacion_201117.pdf
- Santos, J., & Kienzle, J. (2021). Maquinaria agrícola y desarrollo sostenible. FAO.
- Solórzano, J., & Zumba, L. (2023). Desgranadoras de combustión interna: características y rendimiento. *Ingeniería Mecánica y Agrícola*, 10(3), 67-78.
- Tapia, J., Pérez, R., & García, L. (2017). Desgranado de maíz con utensilios manuales: eficiencia y riesgos. *Ingeniería Agrícola*, 25(4), 112-125.

Van Loon, J., López-Gómez, J., & Odjo, S. (2024). Data for: Evaluating Maize Shelling Technologies for Mexican Smallholders: Performance, Quality, and Decision Framework for Optimal Selection. CIMMYT Research Data & Software Repository Network. Recuperado de <https://cgspace.cgiar.org/items/7e7a-7127-e88b-41a1-bc40-6c5020114558>

Vedan, S. (2025). Costos operativos de desgranadoras eléctricas en la agricultura. Revista de Producción Agrícola, 15(1), 34-45.