

Design and construction of a grain mill with a photovoltaic solar energy system for Arequipa, Perú

D.Y. Cabrera-Choccata, MSc¹, D.R. Arisaca-Morales, E.J. Figueroa-Berroa, M.A. Llayque-Yucra, D.R. Mamani-Huaynacho, and A. Payano-Rosas

¹Universidad Tecnológica del Perú, Arequipa, Perú, c20101@utp.edu.pe (D.Y.C.-CH), U21220264@utp.edu.pe (D.R.A.-M), U19206573@utp.edu.pe (E.J. F-B), 1629942@utp.edu.pe (M.A.LI-Y), U19206697@utp.edu.pe (D.R.M-H), U21203736@utp.edu.pe (A.P-R)

Abstract– This article describes the design, manufacture, and evaluation of a prototype grain mill powered by a solar photovoltaic energy system. The mechanical structure was constructed using square steel tubes, following cutting, beveling, and welding processes with 6011 electrodes to ensure rigidity and stability. The equipment integrates an adapted manual mill and a washing machine motor with pulley transmission, which was assembled taking into account alignment, fastening, and coupling using an intermediate shaft. The testing phase included measurements of voltage, current, and power both at no load and during grinding, using a multimeter and a wattmeter to corroborate the values provided by the inverter. The results showed that the prototype far exceeded the proposed capacity, grinding 4 kg of corn in less than 10 minutes with an energy consumption of 0.214 kW per hour, verifying that the photovoltaic system provides autonomy and operational stability and a return on investment of 4.38 years. In conclusion, the mill developed is technically, economically, and environmentally viable as a sustainable alternative to improve agricultural productivity in the Arequipa region.

Keywords– Grain mill, Solar energy, Photovoltaic system, Mechanical assembly, Performance evaluation.

Diseño y construcción de un molino de granos con un sistema de energía solar fotovoltaica para Arequipa, Perú

D.Y. Cabrera-Choccata, MSc¹, D.R. Arisaca-Morales, E.J. Figueroa-Berroa, M.A. Llayque-Yucra, D.R. Mamani-Huaynacho, and A. Payano-Rosas

¹Universidad Tecnológica del Perú, Arequipa, Perú, c20101@utp.edu.pe (D.Y.C.-CH), U21220264@utp.edu.pe (D.R.A.-M), U19206573@utp.edu.pe (E.J. F-B), 1629942@utp.edu.pe (M.A.LI-Y), U19206697@utp.edu.pe (D.R.M-H), U21203736@utp.edu.pe (A.P-R)

Resumen— Este artículo describe el diseño, la fabricación y la evaluación de un prototipo de molino de granos alimentado por un sistema de energía solar fotovoltaica. La estructura mecánica se construyó con tubos de acero cuadrados, siguiendo procesos de corte, biselado y soldadura con electrodos 6011 para garantizar la rigidez y la estabilidad. El equipo integra un molino manual adaptado y un motor de lavadora con transmisión por poleas, que se montó teniendo en cuenta la alineación, la fijación y el acoplamiento mediante un eje intermedio. La fase de pruebas incluyó mediciones de tensión, corriente y potencia tanto en vacío como durante la molienda, utilizando un multímetro y un vatímetro para corroborar los valores proporcionados por el inversor. Los resultados mostraron que el prototipo superó con creces la capacidad propuesta, moliendo 4 kg de maíz en menos de 10 minutos con un consumo de energía de 0,214 kW por hora, lo que verifica que el sistema fotovoltaico proporciona autonomía y estabilidad operativa y un retorno de la inversión de 4,38 años. En conclusión, el molino desarrollado es técnica, económica y medioambientalmente viable como alternativa sostenible para mejorar la productividad agrícola en las zonas de Arequipa.

Palabras clave— Molino de granos, Energía solar, Sistema fotovoltaico, Montaje mecánico, Evaluación del rendimiento.

I. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de la energía solar como fuente renovable ha tenido un crecimiento acelerado en los últimos años, alcanzando un incremento mundial del 13.9% en 2023, donde la energía fotovoltaica representó cerca del 75% del total de nuevas incorporaciones [1]. Este panorama sitúa a regiones como Arequipa en una posición estratégica para la implementación de tecnologías solares, ya que presenta niveles de radiación superiores a 6 kWh/m² diarios, convirtiéndola en una zona altamente favorable para sistemas fotovoltaicos autónomos [2].

Paralelamente, la región mantiene una importante actividad agrícola, con extensas superficies destinadas al cultivo, donde el maíz destaca como uno de los productos más sembrados y con mayor rendimiento económico y alimentario [3], alcanzando en 2025 un área cultivada de 1079 hectáreas y una productividad superior a 58000 “kilogramo por hectárea” [4].

En este contexto, surge la necesidad de contar con equipos que mejoren la eficiencia en el procesamiento del

maíz, siendo la molienda una de las actividades que aún se realiza de manera artesanal en muchas zonas rurales. La implementación de una moledora de granos autosostenible basada en energía solar representa una solución viable para reducir el esfuerzo físico, optimizar tiempos y promover el uso de energías limpias en zonas con acceso limitado a redes eléctricas tradicionales [5].

Desde el punto de vista mecánico, el sistema de molienda se apoya en tecnologías simples y ampliamente utilizadas como el tornillo sin fin, adecuado para el manejo continuo de granos por su eficiencia y bajo consumo energético [6]. Respecto al recurso energético, diversos estudios demuestran que Arequipa presenta una radiación estable y suficiente para garantizar el funcionamiento de sistemas fotovoltaicos durante todo el año [7], incluso en zonas con alta altitud y condiciones geográficas aseguran niveles similares [8]. Esto permite integrar de manera eficiente un sistema solar al proceso de molienda agrícola, fortaleciendo la autonomía energética del equipo.

A nivel productivo, la agroindustria del maíz en Arequipa mantiene un rol significativo tanto para el consumo humano como animal, aunque aún existen limitaciones tecnológicas que afectan la calidad y rapidez del procesamiento, especialmente en sectores rurales [9]. La propuesta de una moledora alimentada por energía solar fotovoltaica aporta una solución técnica que moderniza el proceso y reduce la dependencia de maquinaria costosa o fuentes de energía convencionales [10], ofreciendo así una herramienta accesible, sostenible y de bajo impacto ambiental.

Finalmente, el diseño del sistema requiere la consideración de parámetros mecánicos esenciales, como el cálculo del torque, potencia y velocidad del molino, así como la correcta selección del motor y transmisión para asegurar un funcionamiento eficiente [11]. De igual manera, la revisión de experiencias previas demuestra que las máquinas de molienda alimentadas por paneles solares no solo son viables, sino también rentables y capaces de mejorar significativamente la productividad agrícola en zonas rurales [12]. De esta manera, el presente proyecto se fundamenta en la integración de conocimientos mecánicos, eléctricos y energéticos para el

desarrollo de una solución sostenible, aplicable y de impacto social positivo en la región Arequipa.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología empleada siguió un enfoque cuantitativo, de tipo aplicativo, con nivel explicativo y diseño cuasiexperimental, ya que se construyó un prototipo para ser evaluado bajo condiciones reales de funcionamiento.

A. Componentes mecánicos del sistema

Para el desarrollo del prototipo se utilizaron los elementos mecánicos fundamentales que componen el sistema de molienda: el molino manual de tornillo sin fin, el eje de transmisión, la faja, las poleas y la estructura metálica de soporte. La matriz morfológica de la Tabla I hace referencia al uso de los materiales seleccionados, en el cual, se usó el tornillo sin fin; fue seleccionado debido a su capacidad para transportar y dosificar granos de manera continua con bajo consumo energético, siendo ampliamente empleado en sistemas agroindustriales a pequeña escala [6].

El sistema fotovoltaico se dimensionó considerando la energía diaria requerida por el motor, integrando un panel solar de 370 W, una batería de 60 V – 45 Ah, un controlador de carga MPPT y un inversor senoidal puro. La selección de estos componentes se realizó siguiendo los criterios de eficiencia, autonomía y pérdidas del sistema.

La matriz morfológica de la Tabla I, permite visualizar y comparar distintas alternativas tecnológicas para el diseño de un sistema de molienda accionado mediante diversas fuentes de energía. Esta ruta muestra que se ha elegido un panel solar como fuente de energía, un inversor de onda pura de 1kW, un motor de lavadora como actuador principal, un sistema de transmisión mediante poleas y faja, un molino manual adaptado con tornillo sin fin para la molienda, una estructura fabricada en base tubular de acero y protectores construidos en plástico. En conjunto, esta interpretación refleja la selección de una solución basada en energía solar.

B. Diagrama de flujo del desarrollo del prototipo

La fig. 1 brinda el esquema sintetizado de las etapas del proyecto desde su desarrollo hasta la validación final.

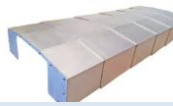
C. Pruebas experimentales

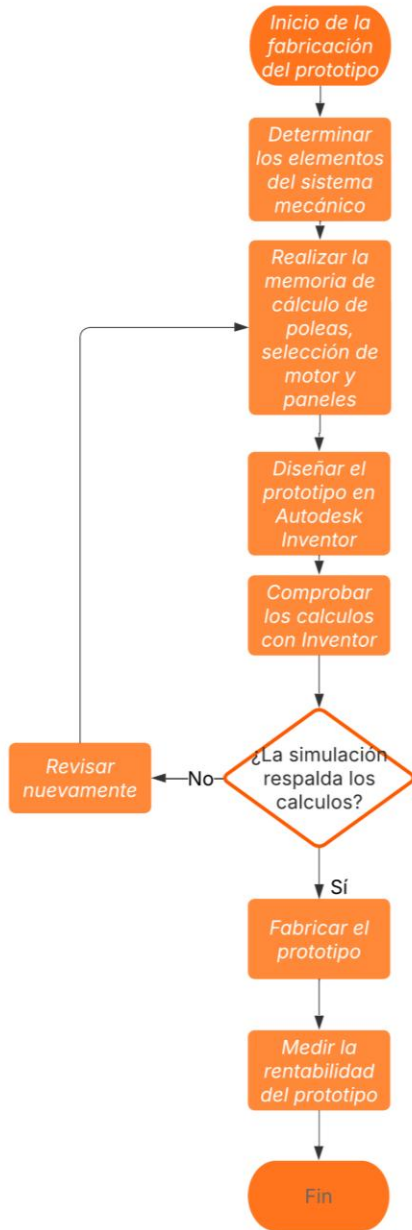
El sistema fue sometido a pruebas bajo condiciones reales de operación. Se midió el voltaje y corriente entregados por el inversor, tanto en vacío como durante la molienda del maíz. También se registró el tiempo necesario para procesar 4 kg de maíz seco, verificando el rendimiento del equipo frente a la capacidad planteada.

La corriente del sistema mostró incrementos durante la molienda debido a la mayor resistencia mecánica del grano.

Los datos de consumo energético y producción fueron registrados en hojas de cálculo para su posterior análisis.

TABLA I
MATRIZ MORFOLÓGICA

MATRIZ MORFOLOGICA		
Función	Opción 1	Opción 2
Fuente de energía	 Panel solar	 Energía convencional
Control eléctrico	 Controlador MPPT	 Inversor de onda pura 1 kW
Motor	 Motor de lavadora	 Motor monofásico 1 HP
Transmisión Mecánica	 Poleas + faja	 Cadena + piñones
Molienda	 Molino manual adaptado + tornillo sin fin	 Molino de discos
Estructura	 Base tubular de acero 1"	 Base de madera
Protección	 Guardas de plástico	 Guardas de metal



ig.1 Diagrama de flujo del desarrollo del prototipo

III. RESULTADOS

A. Memoria de cálculo: Torque del sistema de poleas

Se hizo la adaptación de un motor de lavadora, Las características y datos del motor de la lavadora se presentan en la tabla II.

El torque se calculó usando (1):

$$T = \frac{9550 \times P}{v} \quad (1)$$

Siendo:

T: Torque (N.m)

P: Potencia (kW)

v: Velocidad (rpm)

TABLA II
DATOS DE POLEA Y MOTOR DE LAVADORA

D _L : Polea mayor	107 mm
D _S : Polea conectada al motor	45 mm
L: Distancia entre poleas	130 mm
Voltaje	220 V (AC)
Potencia	0.3 hp (223.71 W)
Velocidad	1420 rpm

Donde se calculó:

- Torque del motor (T_m): 1.499 N.m

- Torque del eje (T_{eje}): 3.562 N.m

B. Cálculo del sistema fotovoltaico

Se usaron las siguientes ecuaciones para el sistema fotovoltaico [7].

$$Potencia\ maxima\ diaria = \frac{Potencia\ maxima\ diaria \times F_s}{eficiencia\ del\ inversor} \quad (2)$$

$$Energía\ real\ diaria = \frac{energía\ maxima\ diaria}{n\ inversor} \quad (3)$$

$$Corriente\ maxima\ diaria = \frac{energía\ maxima\ real\ diaria}{tensión\ del\ sistema} \quad (4)$$

$$numero\ de\ paneles = \frac{corriente\ maxima\ diaria}{HSP(horas\ solar\ pico) \times corriente\ nominal\ panel} \quad (5)$$

Primero se calculó el inversor, como se muestra en la Fig. 2 donde la eficiencia es de 95% y un factor de seguridad del 1.25 y esto se reemplaza en la ecuación (2), y se obtuvo 294.35 W.



Model	2000W	3000W	4000W
Continuous Power	1000W	1500W	2000W
Peak Power	2000W	3000W	4000W
Digital Display	Single Digital Display	Dual Digital Display	Dual Digital Display
Cooling Fan	Single Cooling Fan	Dual Cooling Fan	Dual Cooling Fan
Input Voltage	12V/24V/48/60	12V/24V/48/60	12V/24V/48/60
Output Voltage	220V	220V	220V
Output Frequency	50Hz/60Hz	50Hz/60Hz	50Hz/60Hz
Efficiency	95%	95%	95%
Net Weight	1.2 kg	1.92 kg	2.29 kg
Product Size	258 × 62 × 108 mm	233 × 72 × 150 mm	280 × 72 × 150 mm

Fig. 2 Eficiencia de un inversor de 2000 W / 3000 W / 4000 W [14]

Para el cálculo del número de paneles se usó la ecuación (3), y el dato de Fig. 3 que es 5.26. Donde se obtuvo 1177.42 W/h. Luego se usó la ecuación (4) donde se obtuvo 19.62. Con esto se calculó usando la ecuación (5), y se obtuvo 1 panel.

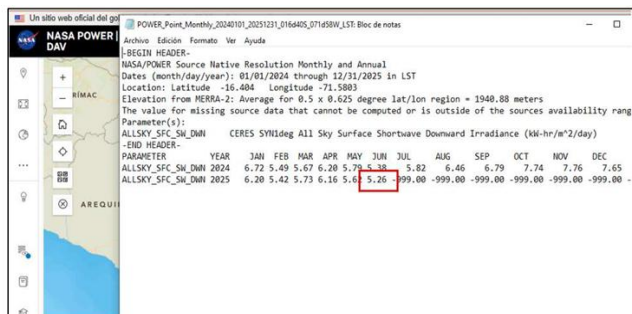


Fig. 3 HSP (hora solar pico) obtenida de NASA POWER DAV [15]

C. Simulación de la estructura

En la Fig. 4 se muestra la Simulación de Cargas, con tubos cuadrados de acero de $30 \times 30 \times 2$ mm de Acero estructural A36, que tiene un Límite de fluencia de 235 MPA como muestra la Referencia [16] y con el peso 60 kg (motor y mecanismo de molienda) la deformación máxima es de 0.1016 mm, valor inferior al límite admisible para elementos estructurales de acero.

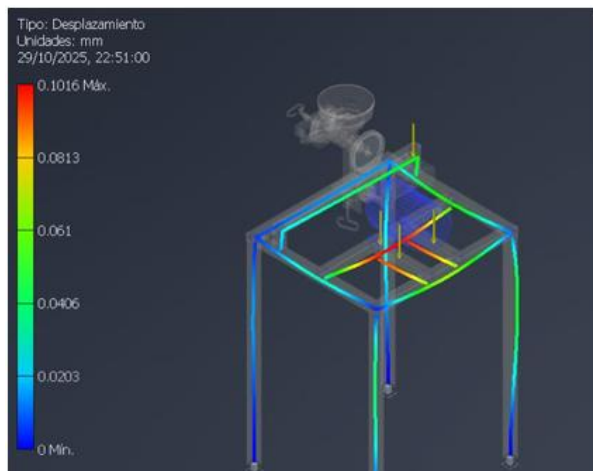


Fig. 4 Simulación de cargas

D. Construcción de la maquina moledora

Con el diseño verificado, se procedió a construir el prototipo real. La etapa de fabricación consistió en la construcción física del prototipo siguiendo el diseño previamente desarrollado. Se emplearon los materiales y herramientas seleccionados para realizar operaciones de corte, soldadura, montaje e integración de componentes. La estructura se elaboró con tubo cuadrado de 1 pulgada, basada en los planos. Después de cada corte, se eliminaron rebabas y se aplicó un ligero bisel con esmeril para evitar bordes cortantes y obtener superficies limpias para la soldadura.

Las uniones se realizaron con electrodos 6011, utilizando un rango de 70 a 90 amperios. Primero se ejecutaron puntos de

soldadura para asegurar la estructura y luego se aplicaron cordones completos en cada junta. En la Fig.5 se muestra el resultado las soldaduras que fueron desbastadas para retirar imperfecciones, y la estructura se limpió completamente antes de aplicar la pintura en spray amarillo.



Fig. 5 Resultado luego de soldar y pintar la estructura

El proceso de ensamble inició con dos componentes esenciales: el moedor manual, que llegó desarmado y se ensambló previamente, y el motor de lavadora, que incluía su sistema de transmisión por poleas y correa. El molino se fijó a la estructura mediante su prensa inferior y dos tornillos autoperforantes para mejorar su estabilidad como se muestra en la Fig. 6. El motor se montó en la parte posterior utilizando dos pernos de $10 \text{ mm} \times 1 \frac{1}{2}$ ", alineándolo con un tubo de unión que conecta el eje de transmisión con el molino como se observa en la Figura 7. Este tubo fue perforado lateralmente para permitir la colocación de los pernos de sujeción como se muestra en la Fig. 7.



Fig. 6 Montaje del moedor manual

Posteriormente en la Fig. 9 se instalaron los elementos de alimentación eléctrica: capacitor de arranque e interruptor, necesarios para garantizar un arranque estable y un control adecuado del motor. El resultado del prototipo se muestra en la Fig. 10.



Fig. 7 Montaje del motor

Finalmente, se procedió a integrar el sistema fotovoltaico, conectando el panel solar a la batería —previa adaptación de los conectores MC4— como se muestra en la Fig. 8, y el panel, la batería, la llave termomagnética y el inversor, como se muestra en la Fig. 11.



Fig. 8 Inversor, llave termomagnética e inversor



Fig. 9 Instalación del sistema eléctrico

E. Procedimiento de pruebas

La evaluación del desempeño se realizó mediante un conjunto de pruebas eléctricas y operativas orientadas a verificar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de carga. Inicialmente, se midió el voltaje entregado por el inversor, utilizando tanto la pantalla integrada

del propio equipo como instrumentos externos de verificación como se muestra en la Fig. 12.



Fig. 10 Prototipo final



Fig. 11 Prototipo final con panel, batería, inversor y molino

Estas mediciones se corroboraron con un multímetro y un vatímetro, lo que permitió validar la tensión disponible en corriente alterna y corriente continua durante la operación.



Fig. 12 Voltaje suministrado por el inversor

Posteriormente, se midió la corriente de operación del sistema, tanto en condición de funcionamiento sin carga (solo la máquina encendida) como durante la molienda de maíz, lo que permitió observar el incremento natural de corriente debido al esfuerzo mecánico requerido por el molino. Adicionalmente, en la Fig. 13 se registró la potencia

consumida durante el proceso, información clave para confirmar la compatibilidad del sistema con el dimensionamiento fotovoltaico y para validar la eficiencia del inversor durante la conversión energética.



Fig. 13 Medición de voltaje, corriente y potencia con vatímetro

Finalmente, se muestra en la Fig. 14 las pruebas operativas que se realizaron empleando maíz seco, con el fin de exigir al sistema una mayor resistencia mecánica. Esto permitió evaluar con mayor rigor el tiempo de molienda, la constancia del flujo de grano y el tamaño final del producto. El maíz fue alimentado de manera continua al molino, obteniéndose como resultado una harina fina Fig. 13 que permitió validar el desempeño del equipo bajo condiciones reales de uso.



Fig. 14 Moledora en funcionamiento

En la Fig. 15 con el vatímetro se midió la potencia de la moledora en funcionamiento.



Fig. 15 Medición de potencia mientras el equipo funciona en kW

F. Resultados del Maíz molido

En base a los experimentos realizados se determinó la producción estimada de maíz molido en un determinado tiempo, en base a la propuesta de obtener 4kg en una hora esta fue verificada obteniendo resultados favorables.

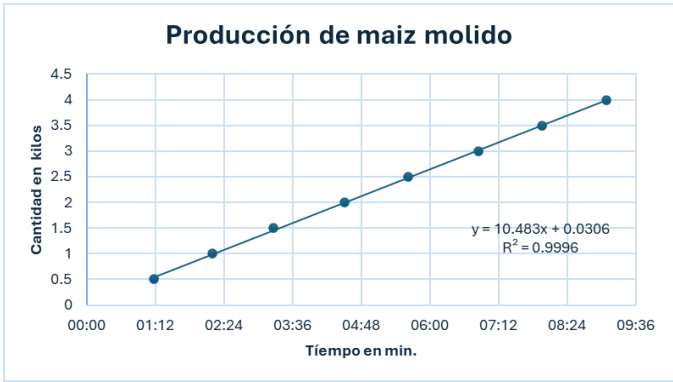


Fig. 16. Producción de maíz según propuesta determinada

En la Fig.16, se observa la producción de maíz con una cantidad máxima de 4 kg, donde se demuestra que se puede moler el maíz en menos de 10 minutos, lo cual es bueno en comparación al tiempo propuesto.

También se contempla la ecuación de la línea de tendencia donde se describe la relación que hay entre el tiempo y cantidad de maíz molido ,donde “y” representa la cantidad producida en kilos y “x” es el tiempo en minutos, además el valor de 10.483 representa cuantos kg se produce aproximadamente por minuto a eso también se le suma otro valor de 0.0306 que viene a ser la intersección con el eje “y” o lo que se produciría en el min 0 pero por un ajuste matemático se toma el valor mencionado y por último el R² coeficiente de determinación el cual indica que tan bien se ajusta la línea de los datos ,en la gráfica nos da un valor de 0.9996 esto quiere decir que la relación de tiempo con cantidad de maíz es casi perfecta ,donde los datos aumentan de manera uniforme con el pasar del tiempo.

En la Fig.17, se observa cómo varia la corriente bajo condiciones de trabajo.

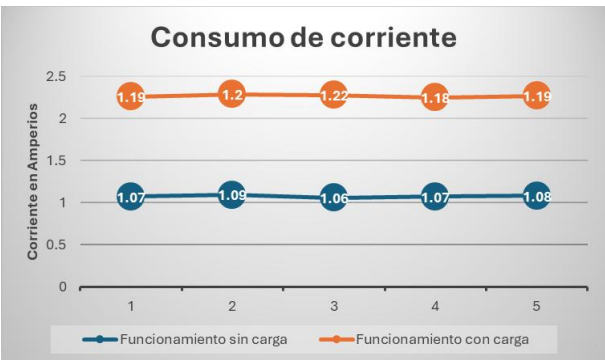


Fig. 17. Consumo de corriente con el equipo en funcionamiento bajo condiciones de trabajo

Esto por diferentes factores, las corrientes más bajas indica cuando el equipo este prendido sin realizar ningún trabajo. Las corrientes más altas indican cuando el equipo realiza el trabajo de molienda con el maíz, esto genera se incremente la corriente y por ende el consumo energético.

G. Rentabilidad del prototipo

Se calculó el consumo del prototipo a plena carga, siendo este 0.2749 kW.h. En la Tabla III, se muestra el tarifario de Arequipa, del pliego tarifario de SEAL [17] para las tarifas por kW.h.

Tabla III
TARIFARIO SEAL

	Arequipa	Islay	Camaná	Atico
Tarifa por kWh	S/. 0.5	S/. 0.286	S/. 0.5	S/. 0.147

Teniendo en cuenta el costo de todo el sistema, el cual el precio total fue de S/. 2,634.50. En la Tabla IV procederemos a calcular el número de horas de trabajo en el que recuperaremos nuestra inversión, así como también el tiempo en años, considerando que el sistema está hecho para que el sistema funcione por 12 horas diarias.

Tabla IV
TIEMPO DE RECUPERACIÓN

	Arequipa	Islay	Camaná	Atico
Tiempo (horas de trabajo)	19166,97	33508,69	19166,97	65193,77
Tiempo (años)	4,38	7,65	4,38	14,88

El tiempo calculado en años varía de acuerdo al lugar donde se instalará el prototipo, esto debido a que el precio por cada kWh varía, siendo el más bajo en Ático, y de la misma manera, en este lugar es donde más tiempo demorará en retornar la inversión inicial, sin embargo, tanto Arequipa como Camaná, son los lugares donde el retorno de la inversión será la más rápida, siendo esta de 19166.67 horas de trabajo, o 4,38 años teniendo en cuenta un uso de 12 horas diarias, el cual es el tiempo que la batería podrá brindar energía para que funcione el sistema de forma continua.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A. Elementos necesarios para todo el sistema mecánico de la molidora

En base a los resultados obtenidos se demuestra que la selección de los componentes mecánicos fue acertada, debido a que el funcionamiento del equipo fue constante y firme.

Dado que la combinación de motor con una transmisión por poleas y molino manual genero un aumento del torque de 1.49 N.m hasta alcanzar a 3.56 N.m, esto hace que se pueda validar también los requerimientos de esfuerzo mecánico necesarios, en el cual se asegura que en el proceso de molienda se realiza sin pérdidas de velocidad y sobrecargas eléctricas. Asimismo, la estructura también logro demostrar firmeza, soportando las cargas dinámicas y vibraciones sin mostrar alguna deformación.

Los resultados alcanzados concuerdan con lo indicado por Kumar, Pilaniya y Fageria [18] que resaltan el uso de configuraciones simples y asequibles en este tipo de sistemas de molienda [18], asimismo Naranjo [19] resalta que una adecuada selección de componentes mecánicos va a asegurar un rendimiento continuo [19]. Por ende, la demostración experimental corrobora técnicamente el conjunto elegido de componentes mecánicos, respaldando así el diseño implementado con el que se demostró que se cumple con los parámetros operativos, coincidiendo con otros autores relacionados con el mismo trabajo.

B. Memoria de cálculo y selección de materiales del sistema mecánico y fotovoltaico

Con la memoria de memoria de cálculo se pudo definir apropiadamente los componentes y materiales para la parte eléctrica como para la parte mecánica, obteniendo los capacidades y dimensionamientos de cada componente en el sistema fotovoltaico resultando un panel de 370 W, una batería de almacenamiento con una capacidad de 2700 Wh logrando suministrar energía por 12 h, además de los demás elementos como el controlador e inversor. Con este sistema fotovoltaico la alimentación de energía se mantuvo estable consiguiendo un motor sin fluctuaciones.

Respecto a los materiales mecánicos la estructura de acero evidencio una deformación máxima de 0.02464 mm, esta fue verificada en el simulador inventor demostrando su resistencia y estabilidad. Los resultados obtenidos difieren mucho de los obtenidos por Nayak [20] al cual, por el dimensionamiento de su sistema fotovoltaico, la capacidad de los componentes fue menor para un motor de CC de 80 W, donde se seleccionó un panel de 40 w, además la batería tenía un almacenamiento de energía para 192 W.h por lo que si encaso no hubiera radiación solar el tiempo que suministra de energía la batería sería muy bajo llegando a ser menos de 1 h. [20]

C. Diseño del prototipo en Autodesk Inventor

El diseño del prototipo de la molidora mediante el software Autodesk Inventor permitió desarrollar una representación tridimensional completa del equipo, integrando de forma adecuada la estructura, el sistema de transmisión y el conjunto de molienda. Este modelado facilitó la verificación del ensamblaje general y la correcta disposición de los componentes antes de la fabricación del prototipo físico.

La simulación estructural realizada sobre el bastidor mostró una deformación máxima de 0.02464 mm bajo una carga aproximada de 600 N, lo que evidencia un comportamiento estructural estable para las condiciones de operación previstas. Este resultado es consistente con lo reportado en trabajos similares, como el desarrollado por Sharma, Kothari, Panwar y Rathore en el 2020 [21] quienes señalan que la validación estructural previa mediante herramientas CAD contribuye a garantizar la seguridad y confiabilidad de equipos de molienda alimentados por energía solar. Asimismo, el uso de Autodesk Inventor permitió

verificar la alineación entre el motor, las poleas y el eje de transmisión, aspecto que coincide con lo señalado por otros estudios de diseño de molinos de pequeña escala, donde se destaca la importancia del modelado virtual para reducir errores constructivos y mejorar el desempeño mecánico del equipo. En el presente proyecto, esta etapa facilitó que el comportamiento del prototipo físico fuera coherente con lo planteado en el diseño digital.

En conjunto, los resultados obtenidos indican que el uso del software Autodesk Inventor fue una herramienta adecuada para el diseño del prototipo, permitiendo validar de manera preliminar la estabilidad estructural y la correcta integración de los componentes, en concordancia con metodologías empleadas en estudios previos de ingeniería mecánica.

D. Implementación del prototipo

Los resultados que se obtuvieron en los experimentos demuestran que el equipo de la moledora de maíz que funciona con un sistema fotovoltaico alcanza con buenos resultados el objetivo determinado en términos como eficiencia energética, su capacidad de producción y operatividad.

El equipo logra moler la cantidad de 4 kg de maíz seco, un tipo de grano relativamente duro y a pesar de eso lo pudo hacer en un tiempo corto de 10 minutos consumiendo una potencia de 0.214 kW, lo cual supera considerablemente la capacidad propuesta de 4kg/h, esto con consumos de corriente sin carga de 1.06 a 1.09 A y con carga de 1.18 a 1.22 A. Esto puede explicarse debido al torque generado del motor hacia el eje de transmisión donde la transmisión por poleas aprovecha adecuadamente el torque lo que implica que al moler el maíz la resistencia mecánica del maíz seco se reduce. Por consiguiente, obtienes un motor que no sufre al trabajar y un maíz molido con partículas finas resaltando también la viabilidad de este tipo de aplicaciones en situaciones donde no se cuente con la energía convencional.

Así mismo la capacidad de molienda con respecto a otros trabajos difieren por mucho, tal es el caso Sharma, Kothari, Panwar y Rathore (2020) su equipo que funciona también con energía fotovoltaica tiene índices de 8 a 10 kg/h [21] o el de Kumar, Pilaniya y Fageria (2025) da resultados de 1.5 kg en 15 a 20 min lo cual el equipo propuesto por el grupo es muy superior a ellos [18], además también podemos comparar los resultados de Gragasín M. A. Salapare I. V. El (2018) ellos trabajan con una escala mucho mayor, donde un motor de 60 hp puede hacer una producción de 940 a 1100 kg/h [22], lo cual en este caso su capacidad lo hace más eficaz al propuesto por nosotros.

E. Rentabilidad del prototipo

Al comparar nuestros resultados con [21], se observa que el tiempo en años de retorno es muy similar, sin embargo, en nuestra tasa de retorno solo hemos considerado lo que ahorramos en el no uso de la energía eléctrica convencional, al considerar montos de ganancia, la tasa de retorno se vería drásticamente reducida, en [21], el ahorro anual es de S/. 780

anuales aproximadamente, mientras que en nuestro proyecto es de S/. 613,2; sin embargo, en [21] el costo de la inversión inicial es de S/. 10570; mientras que nuestro prototipo cuesta S/. 2634,5; dándonos así un menor costo inicial, y una menor tasa de retorno considerando ganancias gracias a nuestro prototipo.

V. CONCLUSIONES

La presente investigación permitió evidenciar la viabilidad técnica del prototipo de moledora de granos de 4 kg/h con alimentación solar fotovoltaica, superando ampliamente la capacidad objetivo al procesar 4 kg de maíz en menos de 10 minutos con un consumo eficiente de 0.214 kW/h, validado mediante pruebas experimentales con multímetro y vatímetro. El sistema fotovoltaico dimensionado (paneles de 200 Wp, baterías, inversor y controlador MPPT) asegura autonomía operativa bajo irradiancia solar de Arequipa (6 kWh/m²/día), integrando una estructura mecánica robusta de acero soldado que resiste cargas dinámicas según simulaciones en Autodesk Inventor. Económicamente, el prototipo presenta un período de recuperación de 4.38 años con inversión inicial de S/ 2,634.5, generando ahorros anuales de S/ 613.2 en energía convencional y promoviendo rentabilidad para pequeños agricultores. Ambientalmente, reduce la huella de carbono al eliminar combustibles fósiles, alineándose con normativas peruanas como el D.L. 1002 y Ley 28611, fomentando sostenibilidad en la agroindustria arequipeña. Esta solución innovadora integra diseño mecánico, energías renovables y validación, constituyendo un modelo replicable para regiones rurales con alto recurso solar, contribuyendo al desarrollo tecnológico en ingeniería mecánica.

AGRADECIMIENTO

Se agradece la colaboración a la coordinación de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica del Perú, por las facilidades brindadas y a todas las personas que contribuyeron directa o indirectamente en el proceso de diseño, construcción y evaluación del prototipo.

REFERENCIAS

- [1] International Renewable Energy Agency (IRENA), "Renewable Capacity Statistics 2024," 2024.
- [2] OPS Perú, "Mapeo Solar del Perú: Descubre el potencial de tu ciudad," 4 de julio de 2025.
- [3] ADEPIA, "Arequipa históricamente agrícola," 7 de septiembre de 2017.
- [4] Cámara de Comercio e Industria de Arequipa, "A enero de 2025, la superficie sembrada de cultivos en Arequipa se redujo 8 % con respecto a enero de 2024," Boletín, 2025.
- [5] Naciones Unidas, "Objetivos de Desarrollo Sostenible: Energía asequible y no contaminante (ODS 7)," s. f.
- [6] Magri, "Molino tornillo sin-fin", ficha técnica. Consultado: el 16 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.magri.cl/tornillo-sin-fin-alimentador-elevador-controlva-inoxidable-de-granos-polvo-solidos-25m-220v-r3m>
- [7] "Infografía-Energía-Nuevas Oportunidades-Energía Solar Arequipa", Proyecto Apoyo al Cambio Climático, Infografía, 2020.

- [8] N. Vargas, “Mapeo solar del Perú: descubre el potencial de tu ciudad”, OPS Perú, jul. 2025, Consultado: el 16 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.opsperu.com/blog/mapeo-solar-del-peru-descubre-el-potencial-de-tu-ciudad>
- [9] S. Ramos Baldarrago y R. Yaraví, “CHIGUATA: Donde los fuertes se quedan para cosechar el alimento de la vida (part. 1)”.
- [10] Gobierno Regional de Arequipa. Gerencia Regional de Agricultura. Subgerencia de Promoción Agraria. (25 de septiembre de 2025). Disponible en: <https://www.agroarequipa.gob.pe/index.php/sub-gerencia-de-promocion-agraria>
- [11] R. G. Budynas y J. Keith Nisbett, “Shigley’s Mechanical Engineering Design 10th Edition”.
- [12] K. Sharma ,S. Kothari,N.Panwar y N. Rathore “Design and development of solar energy powered maize milling machine”, *International Journal of Ambient Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 1–12, 2020, doi: 10.1080/01430750.2020.1712241
- [13] M. Pareja Aparicio, “Energía solar fotovoltaica”, 3rd ed. Madrid, España: Ediciones Paraninfo, 2019.
- [14] “Inversor 2000 W / 3000 W – especificaciones,” AliExpress. [En línea]. Disponible: <https://es.aliexpress.com/item/1005001870262124.html?gatewayAdapt=glo2esp#nav-specification>
- [15] NASA POWER, “Data Access Viewer (DAV)”. [Online]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [16] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, 9.ª ed. México D.F., México: McGraw-Hill, 2011.
- [17] SEAL, “Pliego Tarifario 009-2025 – Tarifas para clientes finales,” Arequipa, Perú, sep. 2025. Disponible en: <https://www.seal.com.pe/clientes/TarifasSeal/Publicaci%C3%B3n%20Pliego%20Tarifario%20009-2025%20SEAL.pdf>
- [18] P. Kumar, A. Pilaniya y N. Fageria, “Solar powered grain crusher,” *International Journal of Agriculture and Food Science*, vol. 7, no. 4 , pp. 121–123, 2025, doi: 10.33545/2664844X.2025.v7.i4b.345
- [19] E. M. Naranjo Vargas, J. R. Moyano Arévalo, C. A. Padilla Padilla y C. J. Santillán Mariño, “Análisis y diseño de un molino eléctrico de granos económico para PYMES,” *Ciencia Digital*, vol. 3, no. 2, pp. 236–251, 2019, doi: 10.33262/cienciadigital.v9i2.387
- [20] D. S. Nayak y R. Shivarudraswamy, “Performance Analysis of a Standalone Photovoltaic Battery Based Mixer Grinder,” *Engineered Science*, vol. 18, pp. 253–262, 2022, doi: 10.30919/es8d667.
- [21] K. Sharma ,S. Kothari,N.Panwar y N. Rathore “Design and development of solar energy powered maize milling machine”, *International Journal of Ambient Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 1–12, 2020, doi: 10.1080/01430750.2020.1712241
- [22] J. N. Guizado Díaz, “Diseño y construcción de un prototipo de máquina moledora de choclo con capacidad de 25 kg/h “. Tesis de Título Profesional, Universidad de Ingeniería y Tecnología, Lima, Perú, 2019.