

Performance and Emissions Analysis of a Stationary Hydrogen-Hybrid Engine Using a Venturi System at 3830 m.a.s.l.

Franz Anthony Mamani Nina¹, Yamil Quispe Esperilla², Duverly Bladimir Quispe Calderon³

Leonidas Vilca Callata⁴, Omar Chayña Velasquez⁵, Rousell Dario Montes Apaza⁶

^{1,2,3,4,5}Universidad Nacional del Altiplano Puno, Perú, 76880069@est.unap.edu.pe, 49044726@est.unap.edu.pe, 74947772@est.unap.edu.pe, lvilca@unap.edu.pe, ochayna@unap.edu.pe

⁶Universidad Nacional de Juliaca, Perú, rd.montes@unaj.edu.pe

Abstract— *Agricultural mechanization in extreme high-altitude regions, such as the Peruvian Altiplano (3830 m a.s.l.), faces a critical thermodynamic limitation due to low air density, which hinders complete gasoline combustion, affects cold-start performance, and increases the emission of toxic pollutants that impact operator health. In response to this challenge, the present study evaluates the incorporation of hydrogen as a complementary energy vector in a utility engine (Toyaki TK-GX35). Unlike conventional conversions, a dual approach was adopted: first, an experimental validation of a hybrid HHO injection system generated in situ through solar electrolysis (based on Vilca Callata, 2024) was conducted; second, a theoretical analysis for a potential full conversion was developed. Experimental results demonstrate that hydrogen enrichment acts as an ignition enhancer, achieving rapid start-up (1.02 s) without the need for choke operation and improving environmental performance by reducing exhaust opacity by 93% and CO emissions by 66%. Although the theoretical model indicates that a 100% hydrogen cycle in naturally aspirated engines may result in a volumetric power loss of approximately 60%, the hybrid system represents a technically viable alternative to mitigate environmental and operational limitations in high-altitude agriculture.*

Keywords— *Hydrogen engine, solar electrolysis, engine adaptation, emission reduction, high-altitude agriculture.*

Análisis del Rendimiento y Emisiones de un Motor Estacionario Hibridado con Hidrógeno mediante Sistema Venturi a 3830 m.s.n.m.

Franz Anthony Mamani Nina¹, Yamil Quispe Esperilla², Duverly Bladimir Quispe Calderon³

Leonidas Vilca Callata⁴, Omar Chayña Velasquez⁵, Rousell Dario Montes Apaza⁶

^{1,2,3,4,5}Universidad Nacional del Altiplano Puno, Perú, 76880069@est.unap.edu.pe, 49044726@est.unap.edu.pe, 74947772@est.unap.edu.pe, lvilca@unap.edu.pe, ochayna@unap.edu.pe

⁶Universidad Nacional de Juliaca, Perú, rd.montes@unaj.edu.pe

Introducción— La mecanización agrícola en regiones de gran altitud, como el Altiplano peruano (3830 m s. n. m.), enfrenta una limitación termodinámica crítica debido a la baja densidad del aire, lo que dificulta la combustión completa de la gasolina, afecta el arranque en frío e incrementa la emisión de contaminantes tóxicos que impactan la salud del operador. En respuesta a esta problemática, el presente estudio evalúa la incorporación del hidrógeno como vector energético complementario en un motor utilitario (Toyaki TK-GX35). A diferencia de las conversiones convencionales, se adoptó un enfoque dual: primero, se realizó la validación experimental de un sistema híbrido de inyección de HHO generado in situ mediante electrólisis solar (basado en Vilca Callata, 2024); segundo, se desarrolló un análisis teórico para una posible conversión total. Los resultados experimentales demuestran que el enriquecimiento con hidrógeno actúa como potenciador de la ignición, logrando un arranque rápido (1.02 s) sin necesidad de estrangulador y mejorando el desempeño ambiental al reducir la opacidad de los gases en un 93% y las emisiones de CO en un 66%. Aunque el modelo teórico indica que un ciclo 100% hidrógeno en motores de aspiración natural puede generar una pérdida de potencia volumétrica de aproximadamente 60%, el sistema híbrido representa una alternativa técnicamente viable para mitigar las limitaciones ambientales y operativas en la agricultura de alta montaña.

Palabras clave— Motor de hidrógeno, electrólisis solar, adaptación de motor, reducción de emisiones, agricultura altoandina.

I. INTRODUCCIÓN

La operación de maquinaria agrícola en regiones de gran altitud representa un desafío técnico significativo debido a las condiciones atmosféricas adversas que afectan el desempeño de los motores de combustión interna. En la provincia de Puno, ubicada en la región de Puno, Perú, a una altitud superior a 3830 m s. n. m., como se muestra en la Fig. 1 [1], la reducción de la densidad del aire genera condiciones de operación exigentes que influyen directamente en los procesos de combustión.

En estas condiciones de baja disponibilidad de oxígeno, los motores de combustión interna pueden experimentar combustión incompleta, aun cuando el sistema de alimentación suministre la cantidad programada de combustible. Esta situación provoca un funcionamiento con mezclas ricas, lo que incrementa el consumo de combustible y reduce la potencia disponible. Además, la combustión incompleta genera emisiones visibles y gases contaminantes, principalmente monóxido de carbono y material particulado, los cuales pueden afectar la calidad del aire en el entorno inmediato del operador

y representar un riesgo acumulativo para la salud durante jornadas prolongadas de trabajo agrícola.

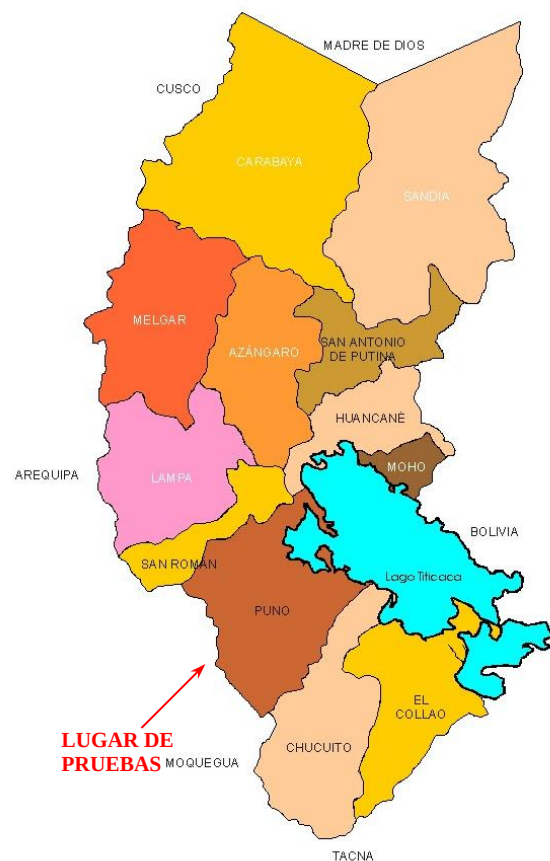


Fig. 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio y experimentación: Región de Puno, Provincia de Puno, Perú (3830 m.s.n.m.). (Fuente: Google Maps [1]).

Estudios recientes en salud ocupacional indican que los trabajadores expuestos a emisiones provenientes de motores de combustión interna constituyen un grupo de riesgo significativo [2]. Investigaciones desarrolladas en actividades relacionadas con paisajismo y agricultura han evidenciado que los controles actuales resultan limitados para reducir la exposición directa a contaminantes [3], especialmente en herramientas manuales como motosierras y desbrozadoras, donde el sistema de escape se

encuentra a menos de un metro de las vías respiratorias del operador [4]. Esta condición se intensifica durante los arranques en frío, etapa en la que se genera una mayor cantidad de emisiones contaminantes [5]. Asimismo, las condiciones atmosféricas propias de regiones de gran altitud reducen la eficiencia térmica de los motores, lo que hace necesaria la optimización de la combustión y de la carga del motor [6].

En este contexto, el hidrógeno ha sido estudiado como un combustible complementario capaz de mejorar las condiciones de combustión en motores de combustión interna. En la presente investigación se plantea la implementación de una estrategia de enriquecimiento de mezcla mediante la generación de hidrógeno *in situ* a través de electrólisis del agua utilizando energía solar, siguiendo parámetros previamente evaluados para condiciones regionales similares [7]. El gas generado es suministrado al sistema de admisión de un motor utilitario con el propósito de favorecer el proceso de combustión. En este sentido, el objetivo del presente artículo es evaluar el efecto del enriquecimiento con hidrógeno sobre el desempeño térmico del motor y sobre la reducción de emisiones contaminantes en condiciones de operación propias del Altiplano peruano.

II. MARCO TEÓRICO

El funcionamiento de los motores de combustión interna permite el uso de diferentes tipos de combustibles, siempre que estos presenten propiedades fisicoquímicas adecuadas para los procesos de ignición y combustión. En este contexto, el hidrógeno ha sido ampliamente estudiado como combustible alternativo debido a su amplio rango de inflamabilidad, alta velocidad de propagación de llama y baja energía mínima de ignición, características que favorecen una combustión más eficiente [8]. Estas propiedades permiten que motores originalmente diseñados para gasolina puedan operar con mezclas enriquecidas con hidrógeno, siempre que se realicen adaptaciones en el sistema de alimentación y en el control de la combustión.

A. Dinámica de la Combustión del Hidrógeno

La combustión del hidrógeno en motores de combustión interna está determinada principalmente por su alta velocidad de propagación de llama laminar y su baja energía de ignición. Estas características permiten un proceso de combustión más rápido en comparación con combustibles convencionales. Estudios experimentales y numéricos, como los reportados por Mohammed y Ali [9], indican que el enriquecimiento con hidrógeno mejora el desempeño térmico del motor y favorece una combustión más completa bajo condiciones de baja disponibilidad de oxígeno. Este comportamiento resulta especialmente relevante en regiones de gran altitud, donde la reducción de la densidad del aire limita la disponibilidad de oxígeno.

B. Tecnologías de Inyección: Directa vs. Indirecta

La incorporación de hidrógeno en motores de combustión interna puede realizarse mediante inyección directa o inyección indirecta. Investigaciones como las de Molina et al. [10] han evaluado la inyección directa de hidrógeno a media presión, reportando mejoras en la eficiencia térmica y en la potencia del

motor bajo condiciones controladas. Sin embargo, la implementación de este tipo de sistemas requiere componentes electrónicos y tecnología especializada. En contraste, la inyección indirecta mediante aspiración natural constituye una alternativa viable para motores utilitarios de baja potencia, debido a su menor complejidad mecánica y facilidad de integración en sistemas existentes. Esta configuración exige un control adecuado del flujo de gas y la aplicación de medidas de seguridad para evitar el retroceso de llama.

C. Efecto de la Altitud en la Combustión

La operación de motores de combustión interna en regiones de gran altitud se ve afectada por la disminución de la presión atmosférica y la densidad del aire, lo que reduce la disponibilidad de oxígeno durante la combustión. Esto genera mezclas aire-combustible menos eficientes, provocando combustión incompleta, incremento de emisiones contaminantes y dificultades en el arranque en frío del motor.

Diversos estudios han demostrado que la reducción de la densidad del aire en altitudes superiores a 3000 m s. n. m. afecta significativamente el desempeño térmico del motor, disminuyendo la potencia efectiva y aumentando la formación de monóxido de carbono y material particulado [11], [12]. En este contexto, el uso de combustibles gaseosos con alta velocidad de propagación de llama, como el hidrógeno, se presenta como una alternativa viable para mitigar las limitaciones asociadas a la baja disponibilidad de oxígeno.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Sistema de Generación de Hidrógeno

El hidrógeno utilizado en el presente estudio fue generado mediante un sistema de electrólisis alcalina tipo celda seca, evitando el uso de hidrógeno comercial. El diseño del reactor, la configuración de las placas y la concentración del electrolito (hidróxido de sodio, NaOH al 20%) se basaron en parámetros previamente validados experimentalmente por Vilca Callata [7] para condiciones de alta radiación solar características de la región de Puno.

El sistema fue alimentado mediante energía fotovoltaica, permitiendo la separación electroquímica de la molécula de agua para la producción de hidrógeno gaseoso. Durante la operación, el sistema trabajó con un voltaje promedio de 12 V y una corriente entre 8 y 12 A, obteniéndose un caudal estimado de 0.6 a 1.0 L/min.

El gas generado fue sometido a un proceso de filtrado previo a su utilización inmediata en el sistema experimental. El hidrógeno producido fue almacenado temporalmente en un tanque pulmón con presión operativa controlada entre 0.15 y 0.25 bar antes de su suministro hacia el sistema de admisión.

La disposición física del sistema de electrólisis se presenta en la Fig. 2.



Fig. 2. Prototipo experimental de electrólisis alcalina para la producción de hidrógeno, basado en el diseño propuesto por Vilca Callata [7].

B. Motor de Prueba:

El sistema experimental se implementó utilizando un motor de combustión interna de uso agrícola. Se empleó un motor monocilíndrico de cuatro tiempos modelo Toyaki TK-GX35, con una cilindrada de 35.8 cc y refrigeración por aire, ampliamente utilizado en equipos agrícolas como desbrozadoras y fumigadoras.

La selección de este tipo de motor responde a su alta disponibilidad en aplicaciones rurales y a su compatibilidad con estrategias de adaptación tecnológica para el uso de combustibles alternativos, tal como se ha reportado en estudios previos sobre conversión de motores convencionales a combustibles basados en hidrógeno [12].

Las especificaciones técnicas principales del motor empleado se presentan en la Tabla I, incluyendo parámetros como configuración del motor, cilindrada, sistema de refrigeración, sistema de ignición y tipo de arranque.

TABLA I
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MOTOR BASAL (PLATAFORMA GX35)

Parámetro	Especificación Técnica
Configuración	Monocilíndrico, 4 Tiempos, OHC
Cilindrada	35.8 cc
Potencia nominal	1.6 hp
Velocidad nominal	7000 rpm
Sistema de Refrigeración	Aire forzado
Punto de Embrague	Centrífugo (Enganche a ~4,200 rpm)
Sistema de Ignición	Transistorizado (magneto)
Sistema de arranque	Manual (recoil starter)
Combustible Original	Gasolina de 86 octanos o superior



Fig. 3. Vista del motor utilitario Toyaki TK-GX35 usado para la prueba.

C. Adaptación del Sistema de Admisión

La incorporación de hidrógeno gaseoso en un motor originalmente diseñado para combustibles líquidos requirió la modificación del sistema de admisión con el fin de permitir una mezcla adecuada de aire e hidrógeno sin alterar significativamente la arquitectura del motor.

Se descartaron configuraciones basadas en inyección electrónica programada y sistemas de inyección directa a alta presión debido a su mayor complejidad estructural, requerimientos electrónicos especializados y elevados costos de implementación, como se ha reportado en la literatura [13].

En su lugar, se implementó un sistema mecánico de suministro gaseoso basado en un dispositivo tipo Venturi instalado en la línea de admisión del motor, permitiendo la aspiración pasiva del hidrógeno mediante diferencias de presión generadas por el flujo de aire.

1. Preservación del Sistema Basal

El sistema original de alimentación con gasolina fue mantenido operativo, conservando el tanque y el carburador originales del motor. Esta configuración permitió garantizar la estabilidad operativa del motor durante las pruebas experimentales y mantener condiciones funcionales comparables con el modo de operación convencional.

Asimismo, esta estrategia permitió mantener la compatibilidad mecánica del sistema, reduciendo la necesidad de modificaciones irreversibles en componentes críticos del motor, tales como la culata o el sistema de admisión original.

2. Diseño y Manufactura del Inyector Venturi

El sistema de admisión fue modificado mediante la incorporación de un inyector mecánico tipo Venturi de diseño propio. El dispositivo fue fabricado mediante tecnología de impresión tridimensional (3D) utilizando material polietileno tereftalato glicol (PETG), seleccionado por su adecuada resistencia térmica, estabilidad química y facilidad de manufactura en aplicaciones experimentales.

La geometría interna del dispositivo corresponde a un perfil convergente-divergente, diseñado para condiciones operativas correspondientes a un motor monocilíndrico de 35.8 cc, operando a una altitud aproximada de 3830 m s.n.m., donde la densidad del aire es inferior a condiciones estándar a nivel del mar.

La Fig. 4 presenta el modelo tridimensional del dispositivo desarrollado y su configuración geométrica interna.

La garganta crítica del dispositivo fue dimensionada con un

diámetro interno de 8.5 mm, generando una reducción controlada del área transversal de flujo con el propósito de incrementar la velocidad del aire en la zona de estrangulamiento y producir una presión negativa suficiente para inducir la succión autónoma del hidrógeno gaseoso desde el sistema generador.

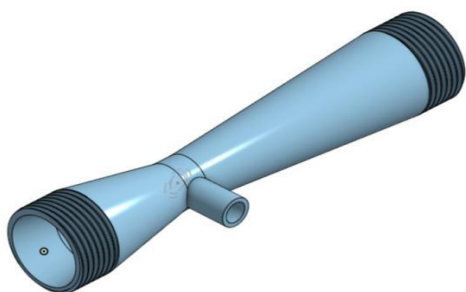
El puerto de inyección de hidrógeno fue diseñado con un diámetro interno de 3.0 mm, ubicado perpendicularmente al flujo principal en la región de máxima velocidad axial ($x = 20$ mm), con el objetivo de favorecer la mezcla turbulenta del gas con el flujo de aire antes de su ingreso al cilindro del motor.

El principio de funcionamiento del sistema se basa en la generación de una diferencia de presión asociada a la reducción del área de flujo ($D_2 < D_1$), permitiendo la auto-dosificación del hidrógeno gaseoso sin requerir sistemas activos de presurización externa.

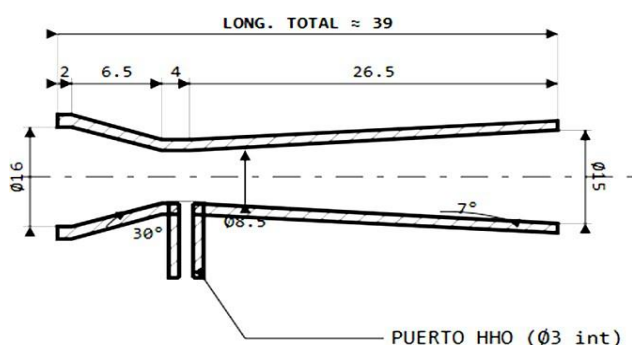
El comportamiento del flujo dentro del dispositivo se fundamenta en la conservación de energía mecánica del fluido, descrita mediante la ecuación de Bernoulli:

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{constante}$$

La aplicación de este principio permite explicar el incremento de la velocidad del fluido en la garganta del Venturi y la consecuente reducción de presión estática, condición necesaria para la aspiración del hidrógeno hacia la corriente principal de aire.



(a)



(b)

Fig. 4. Modelado computacional del inyector Venturi. (a) Vista isométrica del prototipo en PETG. (b) Vista en estructura detallando la garganta de 8.5 mm y la intersección del inyector de 3.0 mm.

D. Protocolo Experimental

Las pruebas experimentales se realizaron siguiendo

criterios metodológicos para la caracterización de motores de pequeña potencia descritos en estudios previos [13].

Con el propósito de garantizar la reproducibilidad experimental, se implementó el banco de pruebas mostrado en la Fig. 5, el cual permitió la integración controlada del sistema de suministro de hidrógeno con el sistema de admisión del motor sin modificar su configuración mecánica original.



Fig. 5. Montaje experimental final utilizado durante los ensayos, incluyendo el sistema de suministro de hidrógeno con regulación de presión y su conexión al motor monocilíndrico dentro de un entorno controlado.

Previo al inicio de las pruebas, los instrumentos utilizados fueron verificados según especificaciones del fabricante. El tacómetro digital presentó una precisión de ± 10 rpm, el manómetro analógico una precisión de ± 0.01 bar y el termómetro digital una precisión de ± 0.5 °C.

El protocolo experimental fue estructurado en tres fases operativas consecutivas, diseñadas para evaluar el efecto del suministro de hidrógeno durante el arranque y operación inicial del motor en condiciones de altitud elevada.

1) Fase de Carga (Generación de Hidrógeno)

En esta etapa, el sistema de electrólisis fue operado hasta alcanzar la acumulación de hidrógeno en el tanque pulmón previamente instalado en la línea de suministro.

El almacenamiento previo permitió establecer una presión de suministro estable antes del inicio del ensayo, garantizando la continuidad del flujo hacia el sistema Venturi durante la fase de arranque.

La presión del gas fue regulada mediante un regulador manual instalado en la línea de suministro, permitiendo controlar el flujo de hidrógeno hacia el sistema de admisión.

2) Fase de Arranque Asistido

Durante esta fase, el encendido del motor fue realizado mediante el sistema de ignición convencional, mientras se suministraba simultáneamente hidrógeno hacia el sistema de admisión mediante el dispositivo Venturi previamente descrito.

El flujo de hidrógeno fue introducido con la válvula de admisión abierta y sin utilizar el estrangulador del carburador, permitiendo evaluar el efecto del enriquecimiento gaseoso durante el arranque en frío [13], [14].

3) Fase de Monitoreo y Registro de Variables

Posteriormente al arranque del motor, se realizó el monitoreo de variables operativas mediante instrumentación básica.

Las mediciones fueron realizadas utilizando los siguientes instrumentos:

- Tacómetro digital, utilizado para la medición de la velocidad de rotación del motor (rpm).
- Manómetro analógico, empleado para la medición de la presión del hidrógeno en la línea de suministro.
- Termómetro digital, utilizado para el monitoreo de la temperatura ambiente durante las pruebas.
- Opacidad relativa de gases de escape, evaluada mediante observación visual comparativa durante el arranque

El registro de estas variables permitió evaluar la estabilidad del régimen de ralentí del motor y comparar el comportamiento operativo entre el arranque convencional y el arranque asistido con hidrógeno, considerando los principios de combustión limpia asociados al uso de hidrógeno descritos en la literatura [15].

Los datos fueron registrados manualmente durante cada ensayo para su análisis comparativo entre condiciones de operación.

E. Control de Variables y Repetibilidad Experimental

Con el fin de garantizar la comparabilidad entre los ensayos realizados, se mantuvieron constantes las condiciones operativas principales durante cada prueba experimental. Entre las variables controladas se incluyeron la velocidad de rotación del motor en régimen de ralentí, el tipo de combustible utilizado y las condiciones generales de operación del sistema.

Las pruebas fueron repetidas bajo las mismas condiciones operativas para verificar la consistencia de los resultados obtenidos y reducir la variabilidad asociada a factores externos. Los datos fueron registrados manualmente durante cada ensayo, permitiendo identificar tendencias consistentes en el comportamiento del sistema.

Debido a la naturaleza exploratoria del estudio y a las condiciones de operación en entorno real, se priorizó un análisis descriptivo de los resultados experimentales, el cual permitió evaluar el desempeño del sistema bajo condiciones convencionales y asistidas con hidrógeno.

Durante los ensayos se mantuvieron constantes variables críticas como la temperatura ambiente promedio ($8 \pm 2^\circ\text{C}$), la altitud de operación (3830 m.s.n.m.) y el tipo de combustible base empleado en cada condición experimental. Cada condición fue repetida un total de 10 veces, permitiendo obtener un conjunto representativo de mediciones para el análisis comparativo.

La repetibilidad del procedimiento fue verificada mediante la ejecución de ensayos consecutivos bajo las mismas condiciones operativas, registrándose un total de 120 mediciones de velocidad de rotación (rpm). Las variaciones observadas entre repeticiones se mantuvieron dentro de márgenes inferiores al 5%, lo cual permitió validar la consistencia experimental y la confiabilidad de los datos obtenidos.

F. Medidas de Seguridad del Sistema

Durante la ejecución de los ensayos se implementaron medidas de seguridad para minimizar los riesgos asociados al uso de hidrógeno. El gas fue generado mediante electrólisis y almacenado temporalmente en un tanque pulmón operando a presión moderada, con suministro regulado mediante válvula manual para asegurar condiciones estables de operación.

El sistema experimental se instaló dentro de una campana de laboratorio con ventilación adecuada, permitiendo la dispersión de posibles acumulaciones de gas y reduciendo el riesgo de formación de mezclas inflamables, en concordancia con prácticas reportadas en la literatura [16], [17].

Previo a cada ensayo, se verificaron las conexiones del sistema mediante inspección visual y pruebas de estanqueidad básica para detectar posibles fugas. Asimismo, se consideró el riesgo de retroceso de llama, manteniendo supervisión continua del sistema durante la operación experimental y aplicando configuración de admisión de baja presión según el diseño del sistema Venturi, de acuerdo con recomendaciones reportadas en estudios previos [18], [19].

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los ensayos experimentales se realizaron a una altitud de 3830 m.s.n.m. (Puno), con una temperatura ambiente promedio de 8°C .

El régimen de giro del motor fue medido mediante un tacómetro digital inductivo, registrándose 120 muestras durante un intervalo de 60 segundos para cada condición de operación. Asimismo, los gases de escape fueron monitoreados mediante un analizador portátil, y los datos obtenidos fueron procesados mediante estadística descriptiva con el fin de evaluar el impacto del enriquecimiento con hidrógeno en la estabilidad operativa del motor.

A. Estabilidad del Régimen de Giro (Análisis de Ralentí)

Para evaluar la estabilidad del régimen de giro, se utilizó el Coeficiente de Variación del régimen de giro (COV_{RPM}), calculado a partir de 120 mediciones consecutivas.

$$\text{COV} = \frac{\sigma}{\mu} \times 100$$

Donde σ es la desviación estándar del régimen de giro y μ la media aritmética del régimen de giro. El número total de muestras ($n = 120$) fue obtenido durante un periodo continuo de 60 s bajo condiciones estables de ralentí.

Los resultados obtenidos se presentan en la *Tabla II*.

El motor operando únicamente con gasolina presentó un COV de 2.51 %, mientras que el sistema híbrido con hidrógeno registró un COV de 1.03 %, indicando una reducción en la dispersión relativa del régimen de giro bajo la condición híbrida.

La desviación estándar registrada en el modo gasolina fue de 74 rpm, mientras que en el modo híbrido fue de 32 rpm, evidenciando una menor variabilidad en la operación del motor cuando se utilizó el sistema de enriquecimiento con hidrógeno.

TABLA II
ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DEL RÉGIMEN DE GIRO (N = 120 MUESTRAS,
T = 60 s)

Parámetro Estadístico	Símbolo	Gasolina (Estándar)	Híbrido (H ₂)	Interpretación
Media Aritmética	μ	2,950 rpm	3,120 rpm	Punto de operación
Desviación Estándar	σ	74 rpm	32 rpm	Dispersión de datos
Mínimo Registrado	<i>Min</i>	2,790 rpm	3,060 rpm	Descensos del régimen
Máximo Registrado	<i>Max</i>	3,230 rpm	3,185 rpm	Variabilidad operativa
Rango (Amplitud)	Δ	610 rpm	125 rpm	Reducción significativa
Coef. Variación	<i>COV</i>	2.51 %	1.03 %	Estabilidad relativa
Error Estándar	<i>SE</i>	6.8 rpm	2.9 rpm	Precisión de la muestra
Intervalo Confianza (95%)	<i>CI</i>	[2937 - 2963]	[3114 - 3126]	Certeza estadística

B. Análisis Cronológico del Régimen de Giro

Para analizar la evolución temporal del régimen de giro, se registraron datos durante un intervalo continuo de 60 s en condiciones de ralentí.

Los resultados se presentan en la Tabla III.

Durante la operación con gasolina, se observaron fluctuaciones del régimen de giro superiores a 200 rpm en distintos intervalos, mientras que en el modo híbrido las variaciones se mantuvieron generalmente por debajo de 25 rpm.

En el instante $t = 40$ s, el régimen de giro en condición gasolina alcanzó un mínimo puntual de 2790 rpm.

Estos resultados son consistentes con la reducción observada en el coeficiente de variación (Tabla II), evidenciando una mayor estabilidad dinámica del sistema en condición híbrida.

TABLA III
EVOLUCIÓN TEMPORAL DE RPM Y EVENTOS CRÍTICOS (MUESTREO A 3830 M.S.N.M)

Tiempo (s)	RPM (Gasolina)	RPM (Híbrido H ₂)	Observación técnica
0	2920	3105	Inicio de medición
5	2950	3110	Operación estable
10	3030	3116	Variación moderada
15	2885	3113	Descenso parcial
20	2840	3121	Variación del régimen
25	2975	3119	Recuperación gradual
30	3005	3122	Estabilidad parcial
35	2915	3120	Operación continua
40	2790	3118	Descenso notable en gasolina
45	2960	3121	Recuperación progresiva
50	3050	3125	Operación estable
55	2940	3123	Variación menor
60	2965	3124	Fin del ensayo

Interpretación de la Dinámica Temporal El análisis de la Tabla III muestra una diferencia clara en la estabilidad del

régimen de giro entre ambas configuraciones.

El sistema operando con gasolina presenta mayor dispersión temporal del régimen de giro, mientras que la condición híbrida con hidrógeno mantiene un comportamiento más uniforme durante el intervalo de medición.

Esta reducción en la variabilidad puede asociarse a una combustión más estable en régimen de ralentí, atribuida a la mayor velocidad de propagación de llama del hidrógeno, lo que reduce fluctuaciones cíclicas en el proceso de combustión.

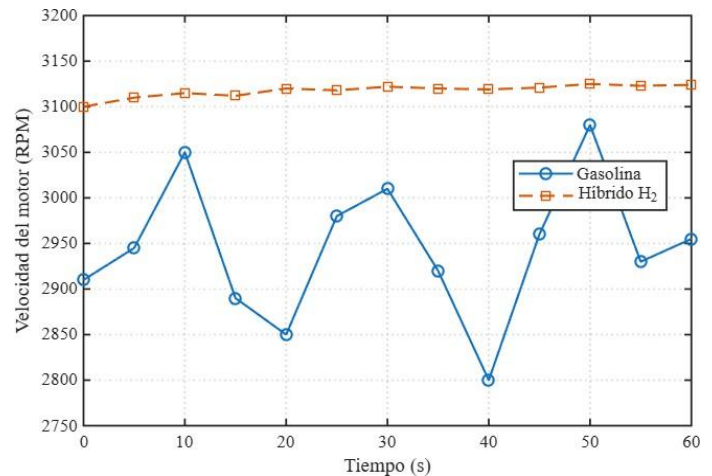


Fig. 6. Comparativa de estabilidad temporal. Nótese la volatilidad de la gasolina (azul) frente al régimen isócrono logrado con el sistema híbrido (naranja).

Interpretación de la Figura 6 La Figura 6 evidencia el contraste dinámico entre ambas condiciones de operación. El sistema operando con gasolina presenta fluctuaciones más pronunciadas del régimen de giro, con variaciones puntuales y una caída significativa en $t = 40$ s (≈ 2790 rpm), lo que sugiere una inestabilidad transitoria de la combustión bajo condiciones de baja disponibilidad de oxígeno.

En contraste, el sistema híbrido gasolina-hidrógeno mantiene un comportamiento más estable, con variaciones menores alrededor de 3100 rpm durante todo el intervalo de medición.

Este comportamiento indica una mejora en la estabilidad del régimen de combustión en ralentí, asociada a la alta velocidad de propagación de llama del hidrógeno, lo que favorece una combustión más uniforme y reduce fluctuaciones cíclicas del motor en condiciones de altura.

C. Eficiencia de Combustión y Emisiones

El análisis de gases de escape (Tabla IV) evidencia cambios significativos en los productos de combustión bajo condición híbrida. Como se observa en la Figura 7, la incorporación de hidrógeno modifica la cinética de oxidación dentro de la cámara de combustión.

Se registró una reducción del 93% en la opacidad y del 66.98% en monóxido de carbono (CO), lo que sugiere una mejora en la calidad de la combustión y una mayor oxidación de los productos intermedios de combustión.

Asimismo, la disminución de hidrocarburos no quemados (70%) indica una combustión más completa, posiblemente

asociada a la mayor velocidad de propagación de llama del hidrógeno, que favorece la oxidación de zonas de mezcla pobre o parcialmente quemada.

El incremento observado en CO₂ debe interpretarse como un cambio en la distribución de productos de combustión hacia estados más oxidados del carbono, aunque su análisis completo requiere considerar también el consumo de combustible y la energía liberada.

TABLA IV
COMPARATIVA DE EMISIONES DE ESCAPE

Parámetro	Gasolina (Base)	Híbrido (H ₂)	Variación
Monóxido de Carbono (CO)	4.85 %	1.65 %	-66.98%
Hidrocarburos (HC)	380 ppm	115 ppm	-70%
Opacidad (Humo)	75 %	5 %	-93%
Dióxido de Carbono (CO ₂)	8.2 %	11.5 %	+ 40%

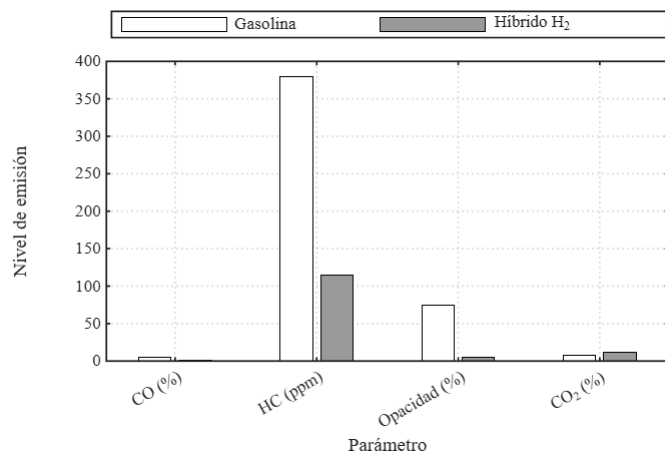


Fig. 7. Reducción porcentual de contaminantes. Nótese la drástica caída en CO y Opacidad frente al aumento de eficiencia en CO₂.

Interpretación de la Tabla IV

La Tabla IV presenta la comparación de emisiones de escape entre la condición de operación con gasolina y la condición híbrida gasolina–hidrógeno. Se observa una reducción significativa en los contaminantes asociados a combustión incompleta.

El monóxido de carbono (CO) disminuye en un 66%, mientras que los hidrocarburos no quemados (HC) presentan una reducción del 70%, lo que indica una mejora en el grado de oxidación de los productos de combustión.

Asimismo, la opacidad del humo se reduce en un 93%, evidenciando una disminución considerable en la formación de partículas carbonosas durante el proceso de combustión.

Por otro lado, el incremento del CO₂ en un 40% sugiere un desplazamiento de los productos de combustión hacia estados más oxidados del carbono, lo cual es consistente con una combustión más completa bajo condición de enriquecimiento con hidrógeno. Sin embargo, este comportamiento debe interpretarse considerando que el sistema no es de control de consumo específico de combustible.

D. Respuesta Transitoria (Aceleración)

Se evaluó la respuesta transitoria del motor mediante la medición del tiempo requerido para alcanzar el régimen de 7000 rpm bajo condiciones de carga variable. Los resultados se presentan en la Tabla V.

Se observa que la condición híbrida gasolina–hidrógeno reduce significativamente el tiempo de respuesta del sistema, pasando de 1.90 s en operación con gasolina a 1.02 s en condición híbrida, lo que representa una reducción aproximada del 46.3%.

Este comportamiento indica una mejora en la dinámica de aceleración del motor, asociada a una combustión más rápida y estable del mezclado aire–combustible enriquecido con hidrógeno.

TABLA V
TIEMPO DE RESPUESTA PROMEDIO (N=10 INTENTOS)

Configuración	Tiempo Promedio (t _{avg})	Desviación (σ)	Mejora Porcentual
Gasolina (Estándar)	1.90 s	± 0.20 s	---
Híbrido (H ₂)	1.02 s	± 0.05 s	reducción del 46.3 %

La reducción del tiempo en un 46.3% indica una mejora en la respuesta dinámica del motor bajo condiciones de operación en altitud.

E. Discusión y Validación con la Literatura

Los resultados obtenidos muestran consistencia con estudios previos sobre el uso de hidrógeno en motores de combustión interna. En particular, se observa concordancia con Mohammed y Ali [9], quienes reportan reducciones significativas en emisiones contaminantes bajo condiciones de enriquecimiento con hidrógeno.

Asimismo, aunque los sistemas de inyección directa propuestos por Molina et al. [10] presentan mayores niveles de control sobre la mezcla, los resultados del presente estudio evidencian que un sistema de admisión pasiva tipo Venturi puede generar mejoras relevantes en el desempeño del motor, manteniendo una menor complejidad estructural.

En este contexto, el sistema propuesto representa una alternativa de baja complejidad adecuada para aplicaciones rurales en condiciones de altitud, donde la simplicidad operativa y la facilidad de implementación son factores determinantes.

V.CONCLUSIONES

1. Se evidenció experimentalmente que la implementación de un sistema híbrido de hidrógeno *in situ*, mediante un inyector Venturi pasivo, mitiga los efectos de la baja densidad del aire en altitudes de 3830 m s. n. m. La estabilidad operativa del motor Toyaki TK-GX35 mostró una mejora, reduciendo el Coeficiente de Variación del régimen de giro (COVRPM) de 2.51% a 1.03%, lo cual respalda la capacidad del hidrógeno para estabilizar la combustión en condiciones de baja presión barométrica.

2. El enriquecimiento de la mezcla con hidrógeno permitió optimizar el proceso de ignición en frío, logrando tiempos de arranque promedio de 1.02 s sin requerir el uso del estrangulador. Esto representa una mejora del 46.3% en la respuesta transitoria

del motor respecto a la configuración estándar de gasolina, lo que sugiere una mejora en la operatividad del sistema en entornos altoandinos.

3. En términos de desempeño ambiental, se comprobó una reducción significativa de contaminantes en los gases de escape. La opacidad de las emisiones disminuyó en un 93%, mientras que el monóxido de carbono (CO) presentó una reducción del 66.98%. Estos resultados indican que las propiedades fisicoquímicas del hidrógeno favorecen una cinética de oxidación más completa, reduciendo la formación de productos asociados a combustión incompleta.

4. El análisis experimental confirma que, aunque una conversión total a hidrógeno (100%) proyecta teóricamente una pérdida de potencia volumétrica del 60% en motores de aspiración natural, el enriquecimiento híbrido constituye una alternativa técnica viable a escala experimental. Este método permite mejorar la estabilidad de operación y el desempeño global del sistema sin requerir modificaciones estructurales complejas.

REFERENCIAS

- [1] Google Maps, "Ubicación geográfica de la zona de estudio: Región de Puno, Perú," Datos del mapa ©2026 Google LLC. [En línea]. Disponible: <https://www.google.com/maps> [Accedido: Ene. 2026].
- [2] M. G. MacMurdo et al., "Occupational Exposure to Ambient Air Pollution: At-Risk Worker Groups, Regulatory and Research Needs," *Annals of the American Thoracic Society*, vol. 22, no. 11, 2025.
- [3] B. M. Alexander et al., "Hazardous exposures and engineering controls in the landscaping services industry," *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 21, no. 3, pp. 189–202, 2024.
- [4] P. D'Antonio, F. Toscano, N. Moretti, N. De Iorio, and C. Fiorentino, "Analysis of Chainsaw Emissions during Chestnut Wood Operations and Their Health Implications," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 6, p. 2496, 2024.
- [5] M. S. Wooldridge, R. Singh, L. G. Gutierrez, and S. Clancy, "Survey of strategies to reduce cold-start particulate, CO, NOx, and hydrocarbon emissions from direct-injection spark-ignition engines," *International Journal of Engine Research*, vol. 24, no. 2, pp. 456–480, 2023.
- [6] Z. Yue et al., "Prediction and Optimization of Thermal Load Performance in Hydrogen Engines for Power Generation Under Plateau Conditions," *SSRN Electronic Journal*, 2024.
- [7] L. Vilca Callata, "Electrólisis del agua para la generación de hidrógeno mediante un sistema fotovoltaico en Puno," Ph.D. dissertation, Escuela de Posgrado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú, 2024.
- [8] A. Boretti, "Hydrogen combustion engines: A practical and scalable pathway for sustainable mobility," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 52, pp. 924–932, 2024.
- [9] A. J. Mohammed and O. M. Ali, "Experimental and numerical study of hydrogen and oxy-hydrogen enrichment from PEM electrolysis on spark-ignition engine performance," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 59, pp. 654–668, 2024.
- [10] S. Molina, R. Novella, J. Gómez-Soriano, and M. Olcina-Girona, "Impact of medium-pressure direct injection in a spark-ignition engine fueled by hydrogen," *Fuel*, vol. 360, p. 130618, 2024.
- [11] S. Gupta, S. Kanchan, R. Kaur, and S. S. Sandhu, "Investigation of performance and emission characteristics using ethanol-blended gasoline fuel as a flex-fuel," *Clean Energy*, vol. 8, no. 3, pp. 174–193, 2024.
- [12] S. T. P. Purayil, S. A. B. Al-Omari, and E. Elnajjar, "Experimental investigation of the effect of CO₂ dilution on the performance and hydrogen knock limit," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 68, pp. 410–427, 2024.
- [13] N. Balakrishnan, P. Chelladorai, and Y. H. Teoh, "A Review on Hydroxy Gas Enrichment for Internal Combustion Engines," *SAE International Journal of Engines*, vol. 16, no. 6, pp. 777–798, 2023.
- [14] M. Koike et al., "Cold-start performance of an ammonia-fueled spark ignition engine with an on-board fuel reformer," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 50, pp. 25689–25698, 2021.
- [15] L. M. Das, "Hydrogen Engine: Fundamentals and Applications," in *Alternative Fuels for Transportation*, CRC Press, 2023, pp. 120–145.
- [16] J. Jayaprabakar, M. Karthickeyan, and S. Karthickeyan, "Prospectus of hydrogen enrichment in internal combustion engines," *Fuel*, vol. 363, p. 131034, 2024.
- [17] Y. Wang, H. Wang, and Z. Liu, "Performance Analysis of a Hydrogen-Doped High-Efficiency Hybrid Cycle Rotary Engine in High-Altitude Environments Based on a Single-Zone Model," *Energies*, vol. 15, no. 21, p. 7948, 2022.
- [18] S. S. Al-Rejالي, A. Al-Sammarraie, and M. A. Al-Najjar, "Hydrogen Supplementation in SI Engines: Enhancing Efficiency and Reducing Emissions," *Machines*, vol. 13, no. 7, 2024.
- [19] M. G. Masi, F. Rossi, and L. Bianchi, "Analysis of Hydrogen Combustion in a Spark Ignition Research Engine with a Barrier Discharge Igniter," *Energies*, vol. 17, no. 7, p. 1739, 2024.