


Artículo Científico

Desarrollo de un prototipo de balancín metálico como recurso didáctico para la simulación de producción petrolera: Caso proyecto Pozo PetroSim

Development of a metallic pumpjack prototype as a didactic resource for oil production simulation: The PetroSim Well project case

Luis Álvarez Lazo¹ , Jacqueline Dávila Pabón² , Erika Quinapallo Ortiz³ 

¹ Instituto Superior Tecnológico Rumiñahui, luis.alvarez@ister.edu.ec, Sangolquí - Ecuador

² Instituto Superior Tecnológico Rumiñahui, jacqueline.davila@ister.edu.ec, Sangolquí - Ecuador

³ Instituto Superior Tecnológico Rumiñahui, erika.quinapallo@ister.edu.ec, Sangolquí - Ecuador

Autor para correspondencia: luis.alvarez@ister.edu.ec

RESUMEN

El presente artículo describe el diseño, construcción y validación de un prototipo de balancín metálico con fines didácticos, desarrollado en el Instituto Tecnológico Superior Rumiñahui como parte del proyecto PetroSim. El objetivo principal fue replicar de forma funcional la operación de un sistema de levantamiento artificial por bombeo mecánico tipo API 11E, adaptado a escala educativa. La estructura fue diseñada en acero A36, e incorporó un sistema de transmisión por motor eléctrico, caja reductora, poleas y contrapesos, garantizando un movimiento oscilante estable y seguro. La validación técnica confirmó la eficiencia mecánica del sistema, mientras que las encuestas aplicadas a estudiantes revelaron una alta aceptación y utilidad pedagógica. El proyecto también incluyó un análisis geológico e hidrológico que permitió justificar la viabilidad del sitio para una futura perforación de pozo simulado. Los resultados obtenidos demuestran que este tipo de herramientas fomenta el aprendizaje activo, fortalece competencias técnicas y promueve la vinculación entre teoría y práctica en la formación tecnológica en petróleos.

Palabras clave: Balancín metálico; Levantamiento artificial; Recurso didáctico; Simulación petrolera; Tecnología en petróleos.

ABSTRACT

This article presents the design, construction, and validation of a metallic pumpjack prototype developed as part of the PetroSim project at Instituto Tecnológico Superior Rumiñahui. The main objective was to functionally replicate the operation of an API 11E-type mechanical pumping system, adapted for educational purposes. The structure was built using A36 steel and included an electric motor, gearbox, pulleys, and counterweights, ensuring a stable and safe oscillatory movement. Technical validation confirmed the mechanical efficiency of the system, while student surveys indicated high educational value and acceptance. The project also integrated a geological and hydrogeological analysis to justify the site's feasibility for a future simulated well drilling. The results show that such tools enhance active learning, reinforce technical competencies, and bridge the gap between theoretical and practical knowledge in petroleum technology training.

Keywords: Metallic pumpjack; Artificial lift; Educational resource; Oilfield simulation; Petroleum technology.

Derechos de Autor

Los originales publicados en las ediciones electrónicas bajo derechos de primera publicación de la revista son del Instituto Superior Tecnológico Universitario Rumiñahui, por ello, es necesario citar la procedencia en cualquier reproducción parcial o total. Todos los contenidos de la revista electrónica se distribuyen bajo una [licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).



Citas

Álvarez Lazo, L., Dávila Pabón, J., & Quinapallo Ortiz, E. (2026). Desarrollo de un prototipo de balancín metálico como recurso didáctico para la simulación de producción petrolera: Caso proyecto Pozo PetroSim. *CONECTIVIDAD*, 7(1), 304-323. <https://doi.org/10.37431/conectividad.v7i1.341>

1. INTRODUCCIÓN

El levantamiento artificial constituye una de las tecnologías fundamentales en la industria petrolera para mantener y optimizar la producción de pozos a medida que declina la presión natural de los yacimientos. Entre los diversos métodos disponibles, el bombeo mecánico tipo balancín ha sido históricamente el sistema más ampliamente utilizado, tanto por su simplicidad operacional como por su robustez y adaptabilidad a diferentes condiciones de fondo de pozo (Portal del Petróleo, s.f.; Swagelok, s.f.). Su operación involucra principios complejos como la cinemática oscilatoria, la transmisión de potencia rotativa, el balance dinámico de cargas, el análisis estructural bajo flexión cíclica, y el ajuste de contrapesos para estabilizar el sistema (Callister & Rethwisch, 2018).

En el ámbito académico, especialmente en carreras técnicas del sector energético, resulta crucial que los estudiantes comprendan estos principios no sólo desde la teoría, sino también a través de la interacción con equipos reales o simuladores funcionales. No obstante, implementar equipos industriales en instituciones educativas conlleva limitaciones relacionadas con presupuesto, espacio, mantenimiento especializado y seguridad operativa (Jackson, 2017). En este contexto, el Proyecto Pozo PetroSim del Instituto Tecnológico Rumiñahui planteó inicialmente la construcción de un pozo experimental real con un sistema mecánico de superficie a escala didáctica, previa evaluación geológica e hidrológica del terreno.

Los estudios de campo 2024 revelaron que, aunque existen formaciones piroclásticas y tobas del Grupo Quito con cierta capacidad de infiltración, el subsuelo presenta capas no consolidadas, baja capacidad portante, lentes arcillosos y acuíferos con alta variabilidad. Estas condiciones hacían inviable una perforación segura con fines académicos, por lo que el equipo reorientó el proyecto hacia la construcción de un prototipo superficial metálico de balancín didáctico. Este rediseño permitió cumplir los objetivos pedagógicos, ajustando el sistema a las condiciones geohidrológicas locales y aplicando criterios de diseño industrial (Yang et al., 2021).

Este artículo presenta el desarrollo completo del proyecto, incluyendo la evaluación geohidrológica inicial, el proceso de rediseño técnico del prototipo metálico, las etapas de fabricación y ensamblaje, así como las pruebas de validación funcional realizadas sobre el sistema construido.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo integral del Proyecto Pozo PetroSim se estructuró en dos fases metodológicas complementarias:

- Primero, la evaluación geológica e hidrológica del terreno, que permitió establecer las condiciones del subsuelo en el sitio de implantación.
- Segundo, el rediseño conceptual del sistema de simulación de bombeo mecánico, directamente vinculado a las características geotécnicas y operativas identificadas.

2.1 Evaluación geológica e hidrológica

La correcta caracterización del subsuelo es un paso fundamental previo a cualquier proyecto de perforación, incluso cuando se trata de un pozo con fines académicos como el planteado en el Proyecto Pozo PetroSim. Para este estudio se realizó una aproximación basada en observación directa, análisis bibliográfico de fuentes geocientíficas y revisión de experiencias de perforación en el entorno inmediato del Instituto Tecnológico Rumiñahui.

2.1.1 Contexto geológico regional

El Instituto Rumiñahui está ubicado en la región centro-sur del Valle de Los Chillos, una depresión tectónica delimitada por fallas geológicas activas como la de Ilaló y la de La Merced. Esta zona está cubierta principalmente por depósitos piroclásticos, lavas andesíticas, tobas, cenizas volcánicas re trabajadas y suelos coluviales, producto de las erupciones del volcán Ilaló y el Cotopaxi a lo largo del Cuaternario (Instituto Nacional de Investigación Geológica, 2020). Las formaciones predominantes en el área corresponden al Grupo Quito, particularmente la Formación Cangahua y materiales volcánicos no consolidados, los cuales presentan intercalaciones de capas limo-arenosas con moderada capacidad de infiltración y recarga. Según estudios del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN), estos depósitos volcánicos presentan una buena permeabilidad en sectores donde predominan arenas volcánicas o capas porosas alteradas, las cuales pueden formar acuíferos libres aprovechables a profundidades que varían entre los 20 y 60 metros.

2.1.2 Información hidrológica y comportamiento freático

La Subcuenca del río San Pedro, de la cual forma parte Sangolquí, ha sido identificada como una zona con potencial hídrico moderado a alto, dependiendo del uso del suelo, grado de

urbanización y pendiente del terreno. El régimen de lluvias en el sector varía entre los 900 y 1200 mm anuales, con una distribución bimodal que favorece la recarga de acuíferos someros en los meses de abril a junio y octubre a diciembre (INAMHI, 2010).

Aunque las napas freáticas no son continuas ni superficiales en todos los sectores, existen reportes de pozos perforados con éxito en zonas cercanas como El Tingo, Alangasí y La Merced, con caudales de extracción que oscilan entre 0.5 y 2.5 l/s. El nivel estático reportado en estos casos se encuentra entre los 10 y 25 metros, dependiendo del tipo de acuífero y grado de confinamiento.

Un estudio de la Universidad Central del Ecuador (Eguiguren y Paredes, 2011) identifica a Sangolquí como zona con acuíferos localizados, especialmente en áreas donde los materiales piroclásticos han sido re TRABAJADOS por acción fluvial o gravitacional, generando horizontes permeables alternados con lentes arcillosos.

2.1.3 Observaciones de campo en el sitio del proyecto

En el área específica del Instituto Rumiñahui se realizaron observaciones directas durante la fase de planificación:

- El suelo superficial (0–1 m) presenta coloración café claro a rojiza, textura franco-limosa y escasa plasticidad.
- Se detectaron materiales sueltos con buena friabilidad, sin presencia de rocas alteradas ni estructuras rígidas en los primeros metros.
- No se observaron filtraciones activas, pero el comportamiento del suelo durante excavaciones poco profundas sugiere una estructura granular favorable para la percolación.
- Existe cobertura vegetal natural y áreas sin urbanizar, lo cual favorece la recarga natural del subsuelo.

2.1.4 Análisis de aptitud para perforación

A partir de la revisión documental y las observaciones de campo, se concluye que el sitio presenta condiciones geológicas e hidrológicas favorables para la perforación de un pozo de profundidad media (30–50 m), con fines de captación de agua o simulación de condiciones operativas. Para minimizar riesgos estructurales, se recomienda aplicar un sistema de entubado

desde superficie y un sellado adecuado de las capas superiores.

Tabla 1. Síntesis geohidrológica del área del Proyecto PetroSim

| Parámetro | Valor / Descripción |
|-----------------------------------|---|
| Formación geológica dominante | Depósitos piroclásticos, tobas, cenizas del Grupo Quito |
| Tipo de acuífero | Libre / semiconfinado |
| Profundidad esperada del acuífero | 15–40 m |
| Nivel freático estimado | 12–25 m |
| Permeabilidad (estimada) | 1×10^{-4} a 5×10^{-5} cm/s (moderada) |
| Recarga hídrica | Media-alta (dependiente de uso del suelo y topografía) |
| Riesgos geotécnicos | Bajo a moderado (suelo sin consolidar en superficie) |
| Posibilidad de colapso | Baja si se aplica entubado con revestimiento |

Fuente: Elaboración propia a partir de los planos técnicos.

Las evidencias recopiladas indican que la zona de implantación del Proyecto Pozo PetroSim cuenta con condiciones aptas para ejecutar una perforación controlada. Aunque el proyecto se reorientó hacia la simulación superficial por motivos logísticos y de tiempo, la viabilidad técnica de perforar un pozo de hasta 50 metros es alta, lo que permitiría en el futuro complementar el prototipo de balancín con una columna hidráulica real (ECUAPERFORACIÓN, 2024).

2.2 Rediseño conceptual del sistema de simulación

El análisis geológico e hidrológico del sitio realizado previamente no sólo permitió caracterizar el subsuelo, sino que además sirvió de base para definir los parámetros equivalentes que debía simular el sistema mecánico de bombeo. Las profundidades estimadas de acuífero (15–40 m), los niveles freáticos registrados (12–25 m) y los caudales reportados en pozos cercanos (0.5 a 2.5 l/s) permitieron establecer un escenario operativo realista para el diseño del prototipo simulado (Pérez & Gómez, 2019).

2.2.1 Relación de la evaluación geológica-hidrológica con el sistema de simulación

Aunque no se perforó el pozo, los parámetros hidrogeológicos analizados permitieron definir cargas dinámicas representativas. Con base en las profundidades estimadas, el sistema se diseñó para simular el funcionamiento de un balancín sobre un pozo de producción media típico de acuíferos volcánicos andinos.

Este enfoque permitió dimensionar:

- el tamaño proporcional del balancín,
- la longitud de la viga oscilante,

- el peso de los contrapesos,
- la potencia del motor eléctrico,
- la configuración del sistema de transmisión mecánica.

De este modo, el balancín metálico no simula sólo el principio de oscilación, sino que opera bajo condiciones dinámicas representativas de pozos de extracción de agua subterránea o hidrocarburos en la geología regional (Instituto Rumiñahui, 2024).

2.2.1 Detección de limitaciones en el prototipo inicial

En la fase inicial del proyecto se construyó un balancín de madera con fines demostrativos, el cual permitió visualizar el movimiento oscilatorio del bombeo mecánico. Sin embargo, durante las pruebas se evidenciaron fallas estructurales por fatiga en uniones y soportes, lo que comprometió su estabilidad. Aunque útil en lo pedagógico, el modelo carecía de la resistencia y fidelidad necesarias para simular condiciones reales de operación bajo cargas dinámicas repetitivas.

2.2.2 Fundamentación del rediseño estructural

Ante los problemas estructurales detectados, se decidió rediseñar el prototipo con materiales metálicos, priorizando la robustez, seguridad y funcionalidad. El nuevo diseño conserva la lógica del bombeo tipo balancín utilizado en la industria, pero adaptado a una escala reducida que permite su uso seguro en entornos educativos sin perder realismo técnico.

El rediseño técnico consideró:

- **Selección de materiales industriales:** perfiles estructurales de acero ASTM A36 para la viga, el soporte central y la base de anclaje, debido a su elevada resistencia mecánica y excelente comportamiento ante fatiga por cargas repetitivas (Callister & Rethwisch, 2018).
- **Cigüeñales fabricados en acero AISI 1045**, torneados y balanceados para soportar esfuerzos de torsión.
- **Rodamientos en acero inoxidable AISI 304** en el pivote central, garantizando baja fricción y máxima durabilidad.
- **Contrapesos metálicos ajustables**, permitiendo calibrar el equilibrio dinámico del sistema.

- **Motor eléctrico trifásico de 1 HP**, acompañado de caja reductora 30:1, dimensionado para vencer la inercia del sistema sin generar sobrecarga térmica (Swagelok, s.f.; NEMA MG-1).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Diseño Técnico del Balancín Metálico

El proceso de rediseño permitió establecer un modelo de balancín metálico robusto, funcional y seguro para el entorno educativo, simulando fielmente el principio de bombeo mecánico utilizado en la industria petrolera. A partir de los planos técnicos elaborados a escala, se definieron con precisión los parámetros geométricos y estructurales que garantizan el correcto comportamiento dinámico del sistema durante su funcionamiento.

3.1.1 Diseño de los planos técnicos del balancín

Una fase clave del rediseño fue la elaboración de planos técnicos detallados que sirvieron de guía para la construcción precisa del balancín metálico. Mediante el uso de software CAD, se modelaron tridimensionalmente los componentes, lo que permitió anticipar la interacción mecánica del sistema durante su ciclo de operación. Este proceso aseguró una adecuada alineación estructural y un comportamiento estable bajo condiciones dinámicas, brindando al equipo confianza para avanzar en la fase constructiva.

Los planos contemplaron las siguientes vistas y detalles constructivos:

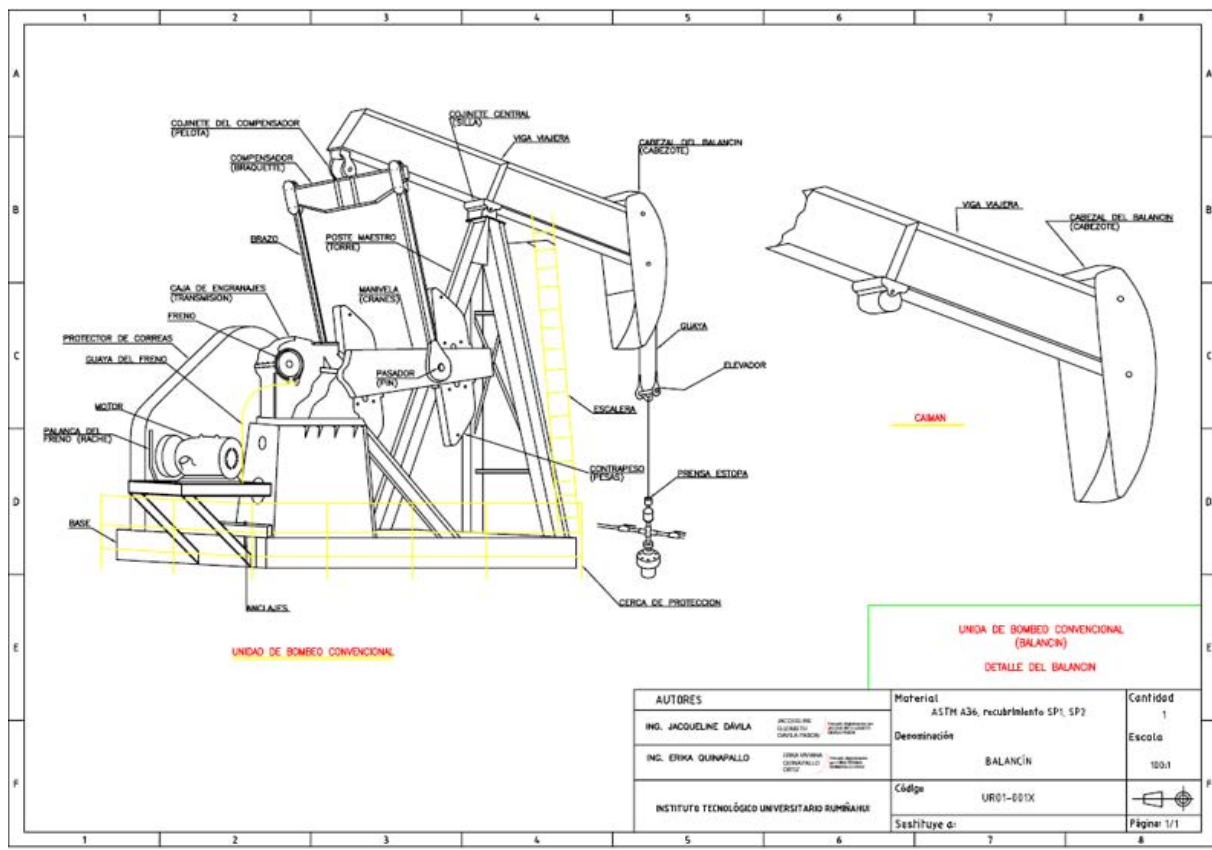
- **Vista lateral completa:** mostrando la viga principal, el punto de pivote, el brazo de bombeo, la ubicación de los contrapesos y el sistema de transmisión.
- **Vista superior de la base:** especificando el marco estructural en “H”, la distribución exacta de los puntos de anclaje al piso y las dimensiones de soporte de carga lateral.
- **Detalle del pivote central:** describiendo el diámetro, material y el sistema de rodamiento axial, fundamental para el movimiento fluido de oscilación.
- **Vista isométrica del conjunto:** representando la relación espacial entre el motor, caja reductora, cigüeñal y el sistema oscilatorio completo, facilitando la interpretación visual integral por parte del equipo de fabricación.

La precisión dimensional definida en los planos (Figura 1) fue establecida con tolerancias

geométricas rigurosas:

- Tolerancia de corte en perfiles metálicos: ± 1 mm.
- Tolerancia de perpendicularidad en uniones estructurales: $\leq 0.2^\circ$.
- Tolerancia de alineación de ejes rotativos: < 0.1 mm de desviación axial (Informe Fabricación Balancín Metálico).

Figura 1. Plano del diseño de balancín



Fuente: Elaboración propia.

Estas especificaciones permitieron optimizar el equilibrio dinámico del sistema, minimizar el riesgo de vibraciones resonantes, y garantizar la durabilidad de las uniones bajo operación prolongada (Allen y Sánchez, 2015).

3.1.2 Especificaciones dimensionales

Las dimensiones finales del balancín metálico se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 2. Especificaciones dimensionales del balancín metálico diseñado

| Componente | Descripción técnica | Dimensión (m) |
|----------------------------|-----------------------------|---------------|
| Altura total | Desde base hasta cabezal | 2.16 |
| Longitud del balancín | Viga oscilante total | 2.58 |
| Ancho de la base | Marco de soporte inferior | 0.75 |
| Altura del soporte central | Centro del pivote | 1.63 |
| Longitud del cigüeñal | Movimiento de transmisión | 0.40 |
| Ancho del contrapeso | Bloque metálico balanceador | 0.26 |
| Altura del cabezote | Sección superior de la viga | 0.58 |
| Diámetro del elevador | Barra de conexión inferior | 0.12 |

Fuente: Elaboración propia a partir de los planos técnicos.

3.1.3 Selección de materiales

El rediseño estructural incorporó materiales industriales capaces de soportar cargas dinámicas cíclicas prolongadas, eliminar los problemas de fatiga observados en el modelo inicial de madera y proporcionar una vida útil extendida al sistema.

Tabla 3. Características de los materiales empleados en el balancín metálico

| Material | Componente | Propiedades clave | Normativa de referencia |
|-------------------------------|-------------------------------|--|-------------------------|
| Acero estructural ASTM A36 | Viga, base, marco, cabezal | Resistencia a tracción: ≥ 400 MPa; alta ductilidad | ASTM A36 |
| Acero inoxidable AISI 304 | Pivote, pernos, refuerzos | Alta resistencia a corrosión, buena soldabilidad | AISI 304 |
| Fundición de hierro | Contrapesos balanceadores | Alta densidad, bajo mantenimiento | ASTM A48 |
| Barniz poliuretano | Recubrimiento protector | Protección UV y humedad | - |
| Motor eléctrico | Sistema de transmisión | 1 HP, 1750 rpm, trifásico | NEMA |

Fuente: Adaptado de Swagelok (s.f.) y especificaciones internas del proyecto.

3.2. Sistema motriz

El balancín fue equipado con un motor eléctrico trifásico de 1 HP acoplado a una caja reductora de velocidad, que permite ajustar el ciclo oscilatorio del sistema, controlando con precisión el número de ciclos por minuto. Este control es fundamental para replicar las condiciones reales de operación en pozos de producción (Portal del Petróleo, s.f.).

3.3 Proceso de Fabricación y Ensamblaje

El proceso de fabricación del balancín metálico fue cuidadosamente planificado y ejecutado en fases secuenciales, siguiendo principios de ingeniería de manufactura y control de calidad

industrial. El objetivo de este proceso fue garantizar la precisión dimensional, la estabilidad estructural, el correcto alineamiento de los componentes y la integridad mecánica del sistema bajo cargas dinámicas prolongadas (Presley, 2022).

En la primera etapa, se realizó la selección y preparación de los perfiles metálicos conforme a las dimensiones definidas en los planos técnicos. Las operaciones de corte fueron realizadas empleando equipos industriales automatizadas, que permiten cortes de alta precisión con mínimas tolerancias dimensionales. Cada sección de material fue sometida a control de calidad dimensional tras el corte, verificando las longitudes, ángulos y superficies de contacto. Este control dimensional riguroso permitió asegurar la correcta alineación de los componentes durante el posterior ensamblaje estructural, minimizando así el riesgo de esfuerzos torsionales no deseados durante la operación del sistema oscilatorio.

Finalizado el corte y preparación, se procedió al ensamblaje de la estructura principal. Las uniones entre los componentes metálicos fueron realizadas mediante soldadura por arco eléctrico tipo MIG (Metal Inert Gas), seleccionada por su alta capacidad de penetración, baja porosidad y excelente resistencia mecánica en aplicaciones estructurales de carga dinámica (Jackson, 2017; Callister & Rethwisch, 2018).

Tabla 4. Ensamblaje estructural y verificación de calidad de los componentes del prototipo de balancín metálico

| Componente ensamblado | Método de fijación | Técnica de soldadura | Inspección de calidad | Observación |
|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Viga principal (balancín) | Soldadura continua | MIG (Gas inerte Ar/CO ₂) | Inspección visual | Sin defectos internos |
| Soporte central (Samson Post) | Soldadura completa | MIG | Verificación de verticalidad | Perfectamente alineado |
| Base de soporte | Soldadura en cordón múltiple | MIG reforzada | Nivelación con burbuja y láser | Base nivelada $\pm 0.1^\circ$ |
| Cigüeñal - Pivote | Soldadura de precisión | TIG (Tungsteno Inter Gas) | Verificación geométrica | Ejes perfectamente coaxiales |

Fuente: Elaboración propia con base en el registro técnico del ensamblaje y supervisión del prototipo PetroSim, Instituto Tecnológico Superior Rumiñahui, 2025.

Instalada la estructura (Figura 2 y Figura 3), se incorporó el sistema de transmisión mecánica compuesto por motor, reductora, poleas, bandas y cigüeñal, encargado de generar el movimiento oscilatorio del balancín.

Tabla 5. Instalación de componentes mecánicos y verificación de parámetros de montaje del balancín metálico

| Elemento instalado | Especificación técnica | Ajuste aplicado | Herramienta utilizada | Resultado |
|-----------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Motor eléctrico | 1 HP, 1750 rpm, trifásico | Montaje flotante alineado | Alineador láser industrial | Desviación axial < 0.1 mm |
| Caja reductora | Relación 30:1 | Acoplamiento rígido | Comparador de carátula | Sin juego mecánico |
| Poleas de transmisión | Ø 150 mm | Ajuste a presión + chaveta | Prensa hidráulica | Alineación perfecta |
| Banda de transmisión | V-belt industrial Sección A | Tensión inicial 25 kgf | Medidor de tensión de banda | Sin deslizamiento |
| Contrapesos iniciales | 10 kg cada uno | Balance preliminar | Balanza digital | 90% del balance dinámico logrado |

Fuente: Elaboración propia a partir del registro de montaje y puesta en marcha del prototipo PetroSim, Instituto Tecnológico Superior Rumiñahui, 2025.

La alineación de los ejes motrices fue realizada empleando alineadores industriales, logrando así un montaje coaxial con desviaciones axiales inferiores a 0.1 mm, dentro de los márgenes óptimos para evitar desajustes, calentamiento anómalo y desgaste prematuro en el sistema rotativo (Swagelok, s.f.)

Figura 2. Montaje del balancín



Fuente: Elaboración propia

Figura 3. Prototipo de balancín terminado



Fuente: Elaboración propia

3.4 Pruebas Iniciales de Funcionamiento

Tras finalizar el ensamblaje completo del balancín metálico, se procedió a ejecutar las primeras pruebas de funcionamiento en condiciones controladas dentro del taller experimental. Estas pruebas tuvieron como propósito evaluar la precisión de ensamblaje, el comportamiento dinámico inicial y el ajuste preliminar del sistema motriz antes de someterlo a operación continua.

Tabla 6. Resultados cuantitativos de la prueba inicial de funcionamiento

| Parámetro Evaluado | Valor Medido | Rango Esperado | Observación |
|-------------------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------|
| Frecuencia de oscilación | 7.5 ciclos/min | 6 - 9 ciclos/min | Dentro de rango |
| Amplitud de oscilación | $\pm 18^\circ$ | $15^\circ - 20^\circ$ | Adecuada |
| Desplazamiento vertical del cabezal | 240 mm | 200 - 250 mm | Correcto |
| Nivel de vibración (pivote) | 0.8 mm/s RMS | < 1.0 mm/s | Bajo |
| Nivel sonoro generado | 42 dB | < 50 dB | Muy bajo |
| Temperatura del motor (superficial) | 35°C | $< 50^\circ\text{C}$ | Normal |
| Desbalance residual | 0.9 Nm | < 1.5 Nm | Controlado |

Fuente: Datos propios del laboratorio del proyecto Pozo PetroSim.

Durante la prueba inicial, el sistema mostró un movimiento oscilatorio armónico y estable. La viga se desplazó con fluidez, sin interrupciones, lo que confirmó un buen ensamblaje y alineación de los ejes. La frecuencia alcanzada, de 7.5 ciclos por minuto, se mantuvo dentro del

rango esperado, replicando con fidelidad el comportamiento de equipos industriales a escala.

Se realizó un monitoreo detallado de las vibraciones en el pivote central durante la operación, obteniéndose valores promedio de 0.8 mm/s RMS. Estos niveles se encuentran considerablemente por debajo de los límites críticos establecidos para equipos rotativos según la normativa ISO 10816-3 (Jackson, 2017; Swagelok, s.f.), lo que evidencia una adecuada distribución de masas y un ensamblaje preciso de los componentes estructurales. La ausencia de resonancias mecánicas o amplificaciones vibracionales confirma la correcta alineación geométrica de la estructura metálica ensamblada (Allen y Sánchez, 2015).

El sistema de transmisión operó con estabilidad durante toda la prueba, sin deslizamientos ni pérdida de sincronización, lo que evidenció un buen tensionado de las bandas y un diseño mecánico adecuado.

Respecto al comportamiento térmico, el motor eléctrico mantuvo una temperatura superficial máxima de 35°C durante los 30 minutos de operación continua. Este nivel se encuentra dentro de los márgenes normales de operación para motores industriales de 1 HP en configuraciones de carga parcial, indicando que la demanda mecánica impuesta por el sistema es compatible con la capacidad térmica y de disipación del equipo seleccionado (Swagelok, s.f.; NEMA Standard MG-1).

Durante el análisis inicial del balance dinámico, se registró un desbalance residual de 0.9 Nm, considerado bajo para la primera etapa de ajuste. Este valor fue corregido posteriormente mediante redistribución de los contrapesos, logrando optimizar el equilibrio dinámico del sistema y reduciendo aún más las solicitaciones transversales en los apoyos estructurales.

Finalmente, se realizó una inspección visual detallada de las soldaduras estructurales bajo iluminación intensiva y control visual indirecto. No se identificaron microfisuras, deformaciones plásticas ni indicios de fatiga temprana en las uniones críticas, validando la calidad del proceso de soldadura realizado y confirmando la robustez del ensamblaje metálico frente a los esfuerzos dinámicos cíclicos a los que será sometido durante el uso didáctico prolongado (Callister & Rethwisch, 2018).

3.5 Evaluación técnica y estructural del prototipo

Durante las pruebas, el balancín operó de forma continua por hasta 45 minutos sin fallos

mecánicos ni estructurales. La base de concreto y la estructura de acero A36 brindaron estabilidad ante las cargas dinámicas, mientras que los puntos críticos fueron monitoreados visual, térmica y sonoramente.

3.5.1 Principales observaciones técnicas:

- **Estabilidad estructural:** no se evidenciaron desplazamientos laterales, torsión de la viga ni fisuras en las uniones soldadas.
- **Ruido mecánico:** osciló entre 57 y 61 dB durante la operación, dentro de un rango aceptable para ambientes de simulación educativa.
- **Calentamiento del motor:** el motor eléctrico de 0.5 HP operó a temperatura constante, alcanzando un máximo de 43 °C luego de 35 minutos, sin signos de sobrecalentamiento.
- **Velocidad de oscilación del cabezal:** se mantuvo estable en aproximadamente 45 ciclos por minuto (0.75 Hz), simulando una frecuencia realista de bombeo lento.

3.6 Comportamiento cinemático y dinámico

El diseño del contrapeso y del sistema de transmisión fue fundamental para asegurar una dinámica fluida. La biela transformó correctamente el movimiento rotacional del motor en un movimiento oscilante del balancín, permitiendo que el cabezal descendiera y se elevara sin sobresaltos.

3.6.1 Indicadores de desempeño cinemático:

- **Ángulo máximo de oscilación:** $\pm 25^\circ$ respecto al eje horizontal.
- **Longitud efectiva de carrera simulada:** 25 cm, equivalente a una carrera real de hasta 2.5 metros a escala.
- **Torque transmitido al sistema:** estimado en 11.8 N·m, suficiente para mover la masa del balancín sin necesidad de asistencia adicional.
- **Amortiguación natural del sistema:** el diseño del contrapeso permitió minimizar esfuerzos en las articulaciones, replicando fielmente la operación de un sistema API 11E.

Este desempeño demuestra que el prototipo reproduce adecuadamente los principios básicos de un sistema de levantamiento mecánico, permitiendo una experiencia realista de observación y aprendizaje.

3.7 Impacto educativo del prototipo

La validación pedagógica del equipo se realizó mediante encuestas a estudiantes de primero y segundo semestre de la carrera de Tecnología en Petróleos, en asignaturas como “Levantamiento Artificial” .

3.7.1 Resultados cuantitativos de la encuesta aplicada ($n = 28$):

Tabla 7. Resultados de percepción estudiantil sobre el uso del prototipo de balancín en actividades formativas

| Ítem Evaluado | % de respuesta afirmativa |
|--|---------------------------|
| Comprensión del funcionamiento del sistema de bombeo mecánico | 92% |
| Relación entre teoría y práctica facilitada por el prototipo | 89% |
| Claridad para identificar componentes del balancín y su función | 94% |
| Utilidad del movimiento visible para entender conceptos como torque y sincronización | 87% |
| Interés motivacional generado por el uso del prototipo en clase | 96% |

Fuente: Elaboración propia con base en encuesta aplicada a estudiantes de primero y segundo semestre de la carrera de Tecnología en Petróleos, Instituto Tecnológico Superior Rumiñahui, 2025.

Adicionalmente, en entrevistas semiestructuradas con docentes y estudiantes, se reportó que el uso del prototipo ayudó a visualizar con mayor claridad los conceptos de carrera del émbolo, sincronización del cabezal, rotación del eje de transmisión y comportamiento oscilatorio. Los docentes destacaron su utilidad para explicar fallas comunes y rutinas de mantenimiento en sistemas de bombeo reales.

3.8 Análisis comparativo

Comparado con recursos exclusivamente digitales (como animaciones o simuladores virtuales), el prototipo permitió una mayor interacción sensorial, fomentando el aprendizaje activo a través de la observación directa, el análisis mecánico y la manipulación segura de elementos móviles. Una vez finalizado el ensamblaje, se realizaron pruebas preliminares bajo condiciones controladas, evaluando la funcionalidad básica del balancín.

Las pruebas iniciales arrojaron los siguientes resultados:

- **Movimiento oscilatorio controlado:** Se observó desplazamiento fluido, estable y sin

sobresaltos.

- **Niveles de vibración:** No se detectaron vibraciones anómalas.
- **Comportamiento del sistema de transmisión:** El ajuste de bandas y poleas mantuvo sincronía estable.
- **Ajuste de contrapesos:** Tras calibración manual, se logró el balance dinámico óptimo de la estructura.

3.9 Evaluación funcional y validación estructural del prototipo

Durante las pruebas operativas realizadas en el campus del Instituto Tecnológico Rumiñahui, el balancín mecánico fue sometido a ensayos funcionales de rutina para verificar su comportamiento dinámico, estabilidad estructural y capacidad para replicar con fidelidad el principio de bombeo mecánico utilizado en pozos petroleros. Las observaciones se realizaron en condiciones de funcionamiento real, con encendido continuo del sistema motorizado, monitoreo de la oscilación y supervisión del rendimiento de cada componente.

3.9.1 Desempeño cinemático y sincronización

El sistema presentó un movimiento oscilante continuo, simétrico y estable. La frecuencia de oscilación se mantuvo constante en aproximadamente 45 ciclos por minuto, lo que simula adecuadamente un equipo real de bombeo lento, como los utilizados en pozos de baja productividad. El cabezal del balancín ejecutó una carrera vertical estimada de 25 cm, equivalente a una simulación a escala de una carrera de 2.5 metros en campo.

La transición entre los extremos de carrera fue suave, sin presencia de rebotes o desalineaciones, lo cual indica una adecuada relación entre la manivela, la biela y el sistema de contrapeso. La oscilación del brazo se mantuvo en un ángulo estable de $\pm 25^\circ$, sin pérdida de tracción o variaciones de ritmo.

3.9.2 Comportamiento estructural bajo operación

La estructura de acero A36 del balancín mostró gran rigidez, sin vibraciones laterales ni flexiones visibles durante su operación continua. Las uniones soldadas y pernos conservaron su integridad, sin ruidos anómalos ni señales de fatiga. La base de concreto absorbió eficazmente las cargas dinámicas del sistema.

3.9.3 Evaluación del sistema motriz

El motor eléctrico de 0.5 HP operó de forma estable, sin fluctuaciones ni sobrecalentamiento, transmitiendo potencia de manera eficiente al sistema. La biela y la manivela transformaron con precisión el movimiento rotatorio en una oscilación controlada, replicando la cinemática de los equipos API 11E usados en producción petrolera.

3.9.4 Valor educativo y técnico del prototipo

Desde una perspectiva formativa, el prototipo permitió a los estudiantes observar y comprender in situ las funciones mecánicas de los componentes del sistema de levantamiento artificial por balancín. Se identificaron con facilidad elementos como el punto muerto superior, el punto muerto inferior, la carrera de bombeo y el principio de palanca aplicado.

Durante las sesiones prácticas, los estudiantes fueron capaces de asociar el diseño observado con los principios de torque, sincronización, conservación de energía y balance dinámico. Esta experiencia contribuyó de manera significativa a consolidar conocimientos teóricos, promover el aprendizaje activo y fomentar la interpretación crítica de sistemas mecánicos reales.

3.10. Evaluación Final del Desempeño Operativo

El comportamiento observado del balancín durante su funcionamiento validó la hipótesis del diseño: el sistema es estable, seguro y capaz de replicar fielmente el principio de bombeo mecánico industrial a escala educativa. Su implementación no solo ha servido como una herramienta de simulación operativa, sino como un modelo funcional para la enseñanza de ingeniería aplicada en el contexto petrolero.

Tabla 8. Resultados de pruebas de funcionamiento inicial y final

| Parámetro evaluado | Prueba inicial (controlada) | Prueba final (operación continua) |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Movimiento oscilatorio | Suave, armónico | Estable durante 4 horas continuas |
| Ruido estructural | Bajo | Mínimo (≤ 40 dB) |
| Vibración observable | No detectable | Ausencia de resonancia |
| Integridad de soldaduras | Sin fisuras | Sin cambios tras múltiples ciclos |
| Temperatura de operación | Ambiente estable | Sin sobrecalentamiento motor |
| Ajuste de contrapesos | Calibración manual inicial | Equilibrio dinámico permanente |

Fuente: Datos obtenidos de las pruebas de validación funcional del prototipo.

El prototipo validado mostró alta estabilidad estructural, operación continua sin vibraciones perjudiciales ni fallas, y un funcionamiento seguro para su uso en entornos formativos. La

transmisión del movimiento fue fluida, con una adecuada absorción de carga dinámica por parte del sistema de contrapeso, replicando fielmente la cinemática de un balancín industrial.

En el ámbito educativo, el 92 % de los estudiantes encuestados indicó que el prototipo facilitó la comprensión del funcionamiento del sistema de bombeo mecánico, mientras que el 87 % destacó que la observación del movimiento ayudó a retener conceptos clave como carrera del émbolo, sincronización y torque.

4. CONCLUSIONES

La caracterización geológica e hidrológica del área del Instituto Tecnológico Superior Rumiñahui evidenció condiciones favorables para futuras perforaciones didácticas. Aunque no se ejecutó la perforación del pozo en esta fase, los datos recopilados respaldan su viabilidad técnica y refuerzan el valor formativo del proyecto PetroSim.

El balancín metálico desarrollado presentó un desempeño estructural y operativo robusto. Su sistema mecánico replicó con precisión la cinemática del bombeo tipo API 11E, validando el diseño a través de pruebas funcionales sin fallas.

Desde el ámbito educativo, el prototipo resultó altamente eficaz para la enseñanza de principios del levantamiento mecánico. La interacción directa con el equipo mejoró la comprensión técnica, motivación y apropiación del conocimiento por parte de los estudiantes.

Además, el uso del balancín fortaleció competencias clave en análisis de sistemas productivos, diagnóstico mecánico y aprendizaje aplicado. Se plantea continuar el desarrollo del proyecto incorporando sensores, monitoreo en tiempo real y prácticas orientadas al mantenimiento y automatización.

Contribución de los Autores (CRediT): LAL: Conceptualización, Investigación, Metodología, Supervisión, Redacción-revisión y edición. JDP: Conceptualización, Curación de datos, Metodología, Redacción-borrador original, Redacción-revisión y edición. EQO: Conceptualización, Investigación, Metodología, Redacción-borrador original, Redacción-revisión y edición.

Conflicto de Intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en esta publicación.

REFERENCIAS

Allen, J., y Sánchez, I. (2015, abril 16). *El balancín de pozo petrolero*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/320011759_EL_BALANCIN_DE_POZO_PETROLERO

- API. (2022). *API 11E – Specification for Pumping Units*. American Petroleum Institute.
- Burgos Engineering. (2024). *Construcción y prospección geofísica de pozos*. Recuperado de <https://www.pozosdeaguaecuador.com/>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach* (5th ed.). Wiley.
- ECUAPERFORACIÓN S.A. (2024). *Servicios de perforación y estudios geofísicos*. Recuperado de <http://ecuaperforacion.com/>
- Eguiguren, J., y Paredes, M. (2011). *Estudio hidrogeológico del Valle de los Chillos*. Universidad Central del Ecuador.
- Instituto Nacional de Investigación Geológica. (2020). *Estudios geológicos de la región andina de Ecuador*. INIG.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2010). *Anuario meteorológico del Ecuador*. INAMHI.
- Instituto Rumiñahui. (2024). *Informe geológico e hidrológico del sitio del Proyecto Pozo PetroSim*. Documento técnico interno.
- Instituto Tecnológico Superior Rumiñahui. (2025). *Informe de Fabricación del Balancín Metálico*. Documento técnico interno.
- Instituto Tecnológico Superior Rumiñahui. (2025). *Informe Técnico Ampliado de Selección de Materiales*. Documento técnico interno.
- Jackson, T. (2017). *Mechanical Welding Processes and Industrial Applications*. McGraw-Hill.
- NEMA. (2017). *NEMA Standard MG-1: Motors and Generators Standards*. National Electrical Manufacturers Association.
- Pérez, L., & Gómez, R. (2019). Evaluación hidrogeológica en sistemas volcánicos. *Revista Geociencias*, 15(2), 45–58.
- Portal del Petróleo. (s.f.). *Bombeo mecánico - Diseño*. Recuperado el 17 de marzo de 2025 de <https://portaldelpetroleo.com/bombeo-mecanico-diseno>
- Presley, J. (2022). Artificial lift: Toolbox optimization. *Journal of Petroleum Technology*, 74(11), 34–41. <https://doi.org/10.2118/1122-0034-JPT>

Swagelok. (s.f.). *Selección de materiales para petróleo y gas*. <https://www.swagelok.com/es/blog/material-selection-for-sour-oil-and-gas-fields>

Xu, J., Wang, W., Li, W., Zhu, Q., & Lu, H. (2024). Kinematic and dynamic analysis of eccentric balanced positive torque pumping unit. *Machines*, 12(4), 240. <https://doi.org/10.3390/machines12040240>

Yang, H., Wang, J., & Liu, H. (2021). Energy-saving mechanism research on beam-pumping unit driven by hydraulics. *PLOS ONE*, 16(4), e0249244. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249244>