South American Publishing

SAP Engineering and Industry. 2025; 1:19
doi: 10.62486/ei202519

ORIGINAL

Design and Development of a Prototype Venturi Vacuum System for a Hospital Medical Gas Plant

Diseño y Desarrollo de un Prototipo de Sistema de Vacío por Venturi para una Central de Gases Medicinales Hospitalarios

Brian Arauco Paniagua[1], Rodrigo Martinez Severich[1], Eynar Calle Viles[1], Maria Rene Ledezma Flores[1]

[1]Universidad Privada del Valle – UNIVALLE. Bolivia.

Cite as
Arauco Paniagua B, Martinez Severich R, Calle Viles E, Ledezma Flores. Design and Development of a Prototype Venturi Vacuum System for a Hospital Medical Gas Plant. SAP Engineering and Industry. 2025; 1:19. https://doi.org/10.62486/ei202519

Publication History
Submitted: 19-05-2025
Revised: 28-07-2025
Accepted: 24-09-2025
Published: 25-09-2025

Corresponding Author
Brian Arauco Paniagua

ABSTRACT

This study presents the design and development of a vacuum system based on the Venturi effect for hospital medical gas centers. The developed system employs a 3/4" (20 mm) Venturi Mazzei injector with an 8,8 mm throat, driven by a Truper BQAP-1/2-250 pump with a maximum capacity of 45 L/min to generate the required flow rate. System monitoring is carried out using MPX2200GP sensors for pressure, FS300A for flow, and a level sensor, all managed by an ESP32 microcontroller. The acquired data is transmitted in real time via the MQTT protocol to a remote server with a dedicated web interface for monitoring and control. The results indicate that this system represents a viable and cost-effective alternative to conventional methods, providing an efficient solution with lower operational and maintenance costs.

Keywords: Flow; Pressure; Medical Vacuum; Venturi.

RESUMEN

Este estudio presenta el diseño y el desarrollo de un sistema de vacío basado en el efecto Venturi para centros de gases medicinales hospitalarios. El sistema desarrollado utiliza un inyector Venturi Mazzei de 3/4" (20 mm) con una garganta de 8,8 mm, accionado por una bomba Truper BQAP-1/2-250 con una capacidad máxima de 45 l/min para generar el caudal requerido. La monitorización del sistema se lleva a cabo mediante sensores MPX2200GP para la presión, FS300A para el caudal y un sensor de nivel, todos ellos gestionados por un microcontrolador ESP32. Los datos adquiridos se transmiten en tiempo real a través del protocolo MQTT a un servidor remoto con una interfaz web dedicada para la monitorización y el control. Los resultados indican que este sistema representa una alternativa viable y rentable a los métodos convencionales, proporcionando una solución eficiente con menores costes operativos y de mantenimiento.

Palabras clave: Flujo; Presión; Vacío Medicinal; Venturi.

© 2025; The Authors. This Open access article is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

INTRODUCCIÓN

El vacío medicinal desempeña un papel fundamental en diversos procedimientos clínicos, incluyendo intervenciones quirúrgicas, terapia respiratoria y succión de fluidos.[1,2,3,4,5,6,7,8,9] Las soluciones tradicionales, como las bombas de vacío de anillo líquido, implican altos costos de adquisición, consumo energético y mantenimiento continuo.[10,11,12,13,14,15,16,17,18] Este trabajo presenta una propuesta basada en el efecto Venturi, proporcionando un método innovador, económico y eficiente para generar vacío medicinal en hospitales.

El vacío medicinal es esencial en la infraestructura sanitaria moderna,[19,20,21,22] especialmente en hospitales,[23,24,25,26] siendo utilizado en diversas aplicaciones clínicas como cirugía, terapia respiratoria y procesos de aspiración de fluidos.[27,28,29,30] En estos contextos, las soluciones convencionales, como bombas eléctricas o sistemas de anillo líquido, representan desafíos importantes debido a sus altos costos operativos, considerable consumo energético y necesidad constante de mantenimiento preventivo y correctivo.[1]

En respuesta a estas limitaciones técnicas y económicas, este estudio se centra en una alternativa basada en el efecto Venturi.[31,32,33,34] El efecto Venturi utiliza principios fundamentales de la dinámica de fluidos para generar vacío mediante la disminución de la presión del fluido al aumentar su velocidad en una sección más estrecha del tubo.[35,36,37] Esta técnica permite una reducción significativa en los costos de mantenimiento y operación debido a la ausencia de partes móviles y al menor desgaste del sistema.[2]

Además, la integración de sensores avanzados para monitoreo remoto en tiempo real proporciona mejoras sustanciales en la supervisión del sistema, aumentando la eficiencia y permitiendo un mantenimiento predictivo más eficaz.[38,39,40] Este enfoque no solo reduce costos, sino que también mejora la seguridad y confiabilidad del sistema global, garantizando así un desempeño constante y seguro en aplicaciones médicas sensibles.[41,42,43]

DEVELOPMENT

Principio de funcionamiento

El sistema propuesto utiliza el principio del efecto Venturi, descrito por la ecuación de Bernoulli. Esta ecuación establece que, en un flujo incomprensible, la suma de la presión estática, presión dinámica y presión potencial permanece constante a lo largo de cualquier línea de corriente:[3]

$$P+1/2(\rho v^2)+\rho gh=\text{constante} \quad (1)$$

Donde:

P es la presión del fluido.
ρ es la densidad del fluido.
v es la velocidad del fluido.
g es la aceleración de la gravedad.
h es la altura del fluido con respecto a un punto de referencia.

A medida que el fluido pasa por una sección estrecha, su velocidad aumenta, lo que resulta en una reducción de la presión y la generación de vacío.

De acuerdo con (4), la ecuación puede expresarse como:

$$P_1+1/2(\rho v_1^2)+\rho gh_1 = P_2+1/2(\rho v_2^2)+\rho gh_2 \quad (2)$$

Según el principio de la ecuación de continuidad [5], la conservación de la masa puede representarse matemáticamente como:

$$A_1 \times v_1=A_2 \times v_2 \quad (3)$$

Estas ecuaciones permiten analizar el comportamiento del fluido en el sistema Venturi, estableciendo la relación entre presión, velocidad y caudal en cada sección del conducto. Aplicando el principio de continuidad a la ecuación (3) de Bernoulli (2) se obtiene:

$$P_1+1/2(\rho v_1^2) = P_2+1/2(\rho v_2^2) \quad (4)$$

Desarrollo del hardware

El hardware del sistema fue desarrollado sobre una placa de circuito impreso (PCB), diseñada utilizando el software Proteus (figura 1 y 2). La selección de los componentes electrónicos fue realizada con el objetivo de garantizar la eficiencia y precisión del sistema.

Circuito de Potencia y Control

El circuito de potencia proporciona tensiones específicas y estables necesarias para el funcionamiento adecuado de los sensores y actuadores del prototipo. Este circuito está compuesto por los siguientes elementos.

- Transformador de 220V AC a 12V AC.
- Regulador de tensión L7805 para alimentar el microcontrolador ESP32.
- Reguladores L7808 y L7908 para alimentar el amplificador de instrumentación AD620 y el amplificador operacional

https://doi.org/10.62486/ei202519

AO741.

- Regulador L7810 para alimentar el sensor de presión MPX2200GP.

La placa de control incluye una conexión con un relé de estado sólido SSR-25 utilizado para controlar la activación y desactivación segura de la bomba de agua y las electroválvulas. Para amplificar la señal del sensor de presión MPX2200GP se utilizaron amplificadores operacionales AD620 y UA741. El sistema también procesa las lecturas del sensor de nivel y del sensor de flujo, siendo todos gestionados por el ESP32.

El sensor de presión MPX2200GP monitorea la presión negativa generada, mientras que un vacuómetro conectado al sistema muestra los valores en kilopascales directamente en el panel de control. El sensor de flujo FS300A, con capacidad para medir hasta 60 L/min, opera dentro del rango ideal para monitorear el flujo de agua a través del Venturi. El sensor de nivel supervisa constantemente la cantidad de agua disponible en el reservorio.

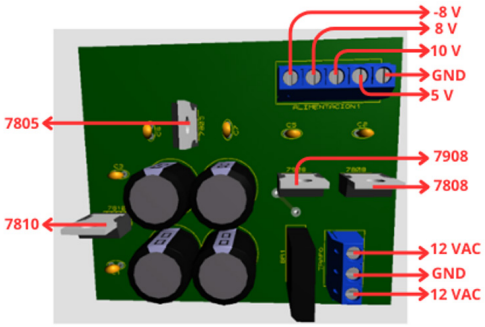

Figura 1. Desarrollo de la placa de Fuente

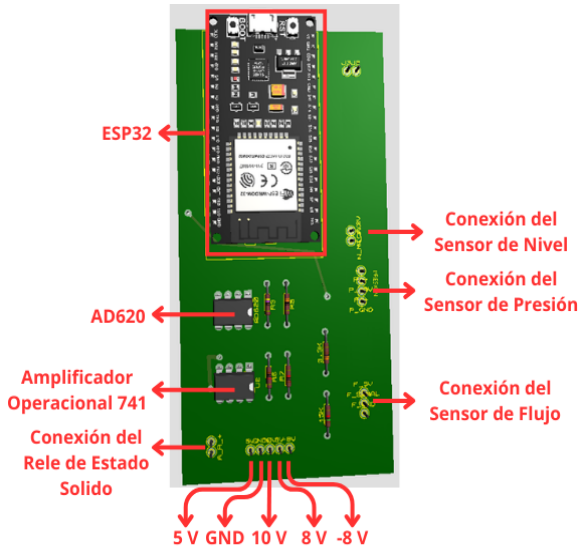

Figura 2. Desarrollo de la placa de Control

El procedimiento del sistema inicia en el reservorio de agua, que tiene una capacidad de hasta 8 litros. El volumen de agua es regulado por el sensor de nivel, garantizando un flujo adecuado. El agua es impulsada a través de un adaptador de ¾", conectado a la entrada de la bomba periférica, y dirigida al sensor de flujo FS300A antes de ingresar al inyector Venturi por su boquilla de entrada.

Al pasar por la sección convergente del Venturi, el fluido experimenta un aumento de velocidad y una reducción de presión, generando un efecto de succión en la boquilla central. Este fenómeno crea el vacío en el recipiente de presión, permitiendo su utilización en el sistema. La presión generada es regulada por electroválvulas, que permanecen cerradas al ser des energizadas, garantizando la conservación del vacío. Por último, el agua retorna al reservorio, completando el ciclo operacional.

El microcontrolador ESP32 es responsable de la lectura y procesamiento de los sensores, así como del accionamiento de las electroválvulas y de la bomba periférica. Además, debido a su conectividad Wi-Fi integrada, transmite los datos en tiempo real a una plataforma web dedicada.

Projeto 3D:

Utilizando el software Fusion 360, fue proyectada una estructura robusta para alojar el circuito de control y un panel frontal que garantiza el posicionamiento adecuado de los componentes, como vacuómetro, interruptores, indicadores visuales y acceso seguro al control electrónico interno del equipo (figura 3).

https://doi.org/10.62486/ei202519

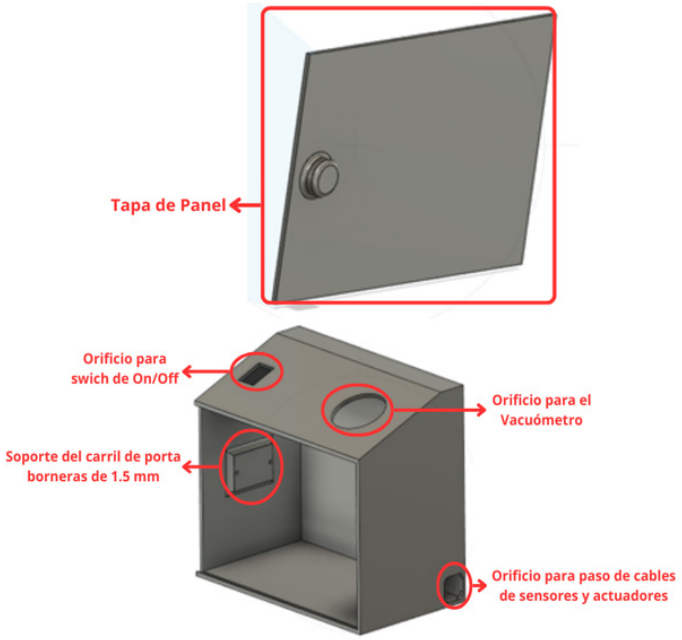

Figura 3. Prototipo de Panel de Control

Integración y Montaje

Conforme mostrado en la figura 4, el sistema integra un panel de control con las placas de potencia y control. Fueron incorporadas borneras de 1,5 mm para una distribución ordenada de la alimentación eléctrica al transformador de voltaje, bomba de agua y relé de estado sólido SSR-25. El ESP32 controla la activación de las electroválvulas (220 VAC) y de la bomba de agua. La activación y desactivación del sistema se realizan por medio de un interruptor principal. principal.

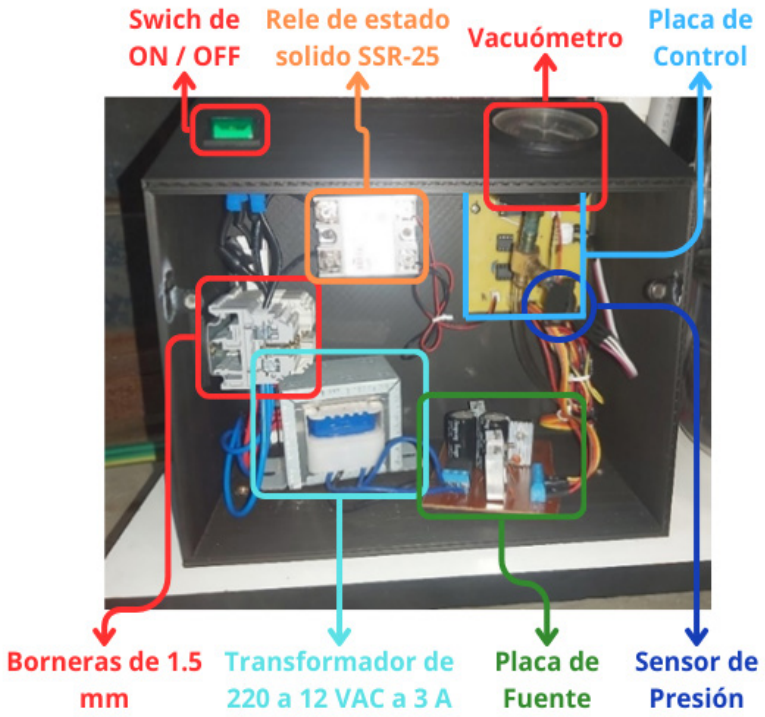

Figura 4. Montage del Panel de Controle

Todos los componentes fueron integrados en una base de melamina resistente, equipada con ruedas para facilitar el transporte y manejo del sistema (figura 5). La disposición optimizada de los componentes, incluyendo el reservorio de agua, bomba, recipiente de presión y panel de control, resultó en un prototipo funcional, robusto y eficiente, listo para pruebas en condiciones reales de operación.

https://doi.org/10.62486/ei202519

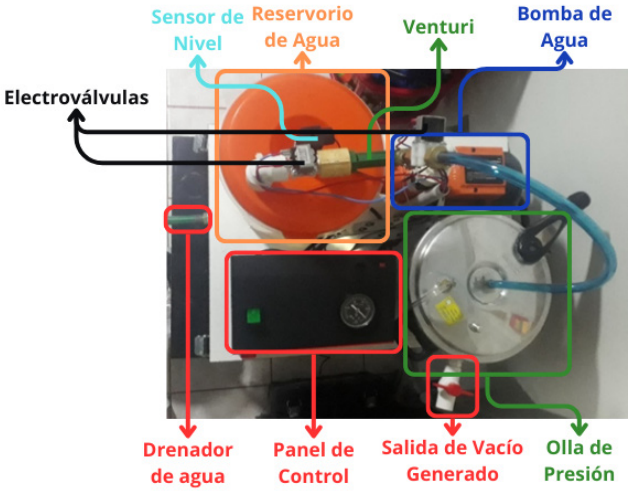

Figura 5. Partes del prototipo final del Panel de Control

Desarrollo del software

La plataforma web desarrollada emplea tecnologías como PHP, HTML, JavaScript y MySQL para la gestión y visualización de los datos obtenidos por el sistema. Su interfaz gráfica fue proyectada para permitir el monitoreo en tiempo real de los parámetros medidos, además del control remoto de los actuadores, incluyendo la bomba y las electroválvulas. Adicionalmente, el banco de datos almacena continuamente las lecturas de los sensores, facilitando el análisis de tendencias históricas y el mantenimiento predictivo del sistema.

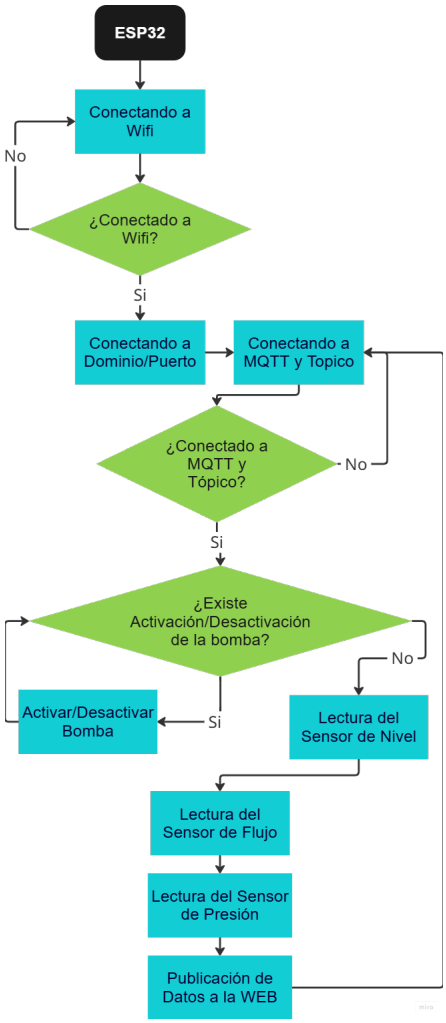

Figura 6. Diagrama de flujo del ESP32

El desarrollo del software fue enfocado en garantizar una supervisión eficiente y en tiempo real de la operación del sistema de vacío. Para ello, fue implementado un microcontrolador ESP32, seleccionado por sus capacidades avanzadas de conectividad

https://doi.org/10.62486/ei202519

inalámbrica y procesamiento simultáneo de múltiples señales. La comunicación de los datos se realiza por medio del protocolo MQTT, permitiendo la transmisión eficiente de las informaciones hacia un servidor en la nube alojado en AWS.

El flujo operacional del ESP32 sigue la siguiente secuencia (figura 6):

- Conexión a la red Wi-Fi: Establece la comunicación con la infraestructura de red.
- Establecimiento de la conexión con el servidor MQTT: El ESP32 se suscribe a los tópicos correspondientes para recibir comandos y enviar datos del sistema.
- Verificación de comandos: Supervisa la existencia de órdenes para activación o desactivación de la bomba.
- Adquisición de datos: Registra las lecturas de los sensores de presión (MPX2200GP), flujo (FS300A) y nivel de agua.
- Transmisión de datos: Los valores capturados son enviados en tiempo real al servidor web vía MQTT.
- Monitoreo y control iterativo: La conexión con el servidor y el estado de la bomba son continuamente verificados, repitiendo el ciclo hasta alcanzar el nivel de vacío necesario.

Este esquema de control garantiza una respuesta rápida a las variaciones del sistema, aumentando la eficiencia operacional y facilitando la supervisión remota por medio de la plataforma web.

Cálculo de flujo de vacío generado

Para Para realizar los cálculos del sistema, fue aplicada la ecuación de Bernoulli (4). El caudal máximo de la bomba Truper BQAP-1/2-250 es de 45 L/min (0,00075 m³/s). De acuerdo con[6], existe una tabla equivalente para la densidad del agua. Habitualmente, en Cochabamba, la temperatura varía entre 29 y 33 °C, con una presión atmosférica de 74140 Pa, por lo tanto, fue adoptado un valor medio de 1000 kg/m³.

Los datos iniciales utilizados en los cálculos fueron los siguientes:

- Diámetro interno de entrada: 20 mm
- Diámetro interno de la garganta: 8.8 mm
- Caudal de la bomba Truper: 45 L/min = 0.00075 m³/s
- Densidad del agua: 1000 kg/m³
- Presión atmosférica en Cochabamba: 74140 Pa

El área transversal de la entrada del Venturi es determinada por:

$$A=\pi \times (d/2)^2 \quad (5)$$
$$A_{entrada}=\pi \times ((20\ mm)/2)^2=314{,}16\ mm^2$$

Convirtiendo de mm² para m²:

$$314{,}16\ mm^2=3{,}1416 \times 10^{-4}\ m^2$$

El área de la garganta del Venturi es:

$$Area_{Garganta}=\pi \times ((8{,}8\ mm)/2)^2 = 60{,}82\ mm^2$$

Convirtiendo de mm² para m²:

$$60{,}82\ mm^2 = 6{,}082 \times 10^{-5}\ m^2$$

Con estos valores, las velocidades son determinadas por:

$$Velocidad_{entrada} = Vazão / (Area_{entrada}) \quad (6)$$

$$Velocidad_{entrada} = (0{,}00075\ m^3/s) / (3{,}1416 \times 10^{-4}\ m^2) \approx 2{,}387\ m/s$$

$$Velocidad_{garganta}=(0{,}00075\ m^3/s) / (6{,}082 \times 10^{-5}\ m^2) \approx 12{,}331\ m/s$$

Utilizando la ecuación de Bernoulli (4) y considerando la densidad del agua (ρ = 1000 kg/m³) y la presión atmosférica (Patm = 74140 Pa), se obtiene la presión en la garganta:

$$P_{garganta}=P_{entrada} + (1/2 \times \rho \times (v^2_{entrada} - v^2_{garganta}) \quad (7)$$

Sustituyendo los valores:

$$P_{garganta} = 74140\ Pa + (1/2 \times 1\ 000\ kg/m^3) \times ((2{,}387\ m/s)^2 - (12{,}331\ m/s)^2) = 962{,}104\ Pa$$

https://doi.org/10.62486/ei202519

El vacío generado en kPa es aproximadamente:

$$Va'cuo\ Gerado = P_{entrada} - P_{garganta} \quad (8)$$
$$Va'cuo\ Gerado = 74140\ Pa - 962{,}104\ Pa = 73177\ Pa$$

Lo que equivale aproximadamente a:

$$73177\ Pa \approx 73{,}177\ kPa$$

Este valor teórico demuestra un potencial significativo del Venturi para generar vacío de manera eficiente.

Resultados experimentales

El prototipo implementado consiguió generar un vacío real medido de aproximadamente 33 kPa. Este resultado se debe a restricciones prácticas del sistema, como pérdidas de carga y limitaciones en la bomba utilizada. A pesar de estas limitaciones, el sistema atendió las expectativas funcionales y los parámetros clínicos requeridos, proporcionando datos en tiempo real por medio de una interfaz web accesible tanto para usuarios técnicos como no técnicos.

Los resultados obtenidos del prototipo son representados gráficamente en la figura 7, demostrando claramente el comportamiento del sistema a 33 kPa. En la plataforma web, son exhibidas figuras representativas de las lecturas de los sensores de flujo y presión, permitiendo analizar el desempeño del sistema durante las pruebas experimentales y compararlo con los cálculos teóricos.

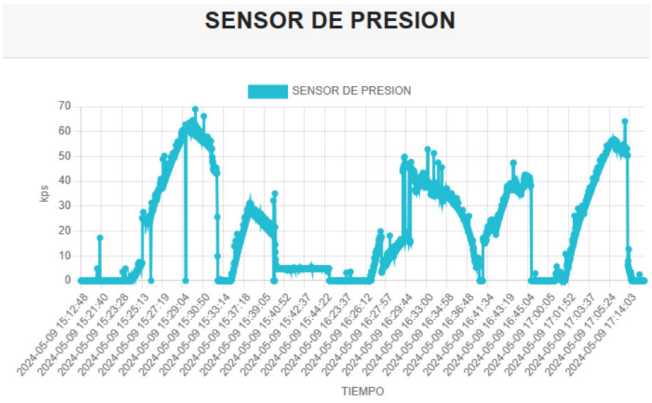

Figura 7. Gráfico de lectura del sensor de Presión MPX2200GP

CONCLUSIONES

El sistema propuesto demostró ser una alternativa eficiente y económica en comparación con los métodos convencionales de generación de vacío medicinal. La implementación del monitoreo remoto por medio de sensores y transmisión vía MQTT facilitó significativamente la gestión y supervisión del sistema. Se recomienda que estudios futuros se concentren en optimizar el diseño del Venturi para maximizar el nivel de vacío alcanzado y validar el sistema en ambientes clínicos reales.

El sistema desarrollado representa una alternativa efectiva, económica y viable en relación con los sistemas convencionales. Sin embargo, existen consideraciones técnicas relevantes que justifican por qué el sistema no alcanza los 73 kPa teóricos calculados, alcanzando apenas cerca de 33 kPa. Estas limitaciones prácticas incluyen pérdidas por fricción en las tuberías, turbulencias internas, reducción real del caudal de la bomba en relación con sus especificaciones nominales, pequeñas fugas en el reservorio utilizado (olla de presión) y diferencias entre los diámetros reales y nominales del Venturi. Estas consideraciones son fundamentales para futuras mejoras del prototipo.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

FINANCIACIÓN

Los autores no recibieron financiación para el desarrollo de esta investigación.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Brian Arauco Paniagua: conceptualización, investigación, análisis formal, redacción del borrador original, revisión y edición.

Rodrigo Martínez Severich: conceptualización, investigación, análisis formal, redacción del borrador original, revisión y edición.

Eynar Calle Viles: conceptualización, investigación, análisis formal, redacción del borrador original, revisión y edición.

María René Ledezma Flores: conceptualización, investigación, análisis formal, redacción del borrador original, revisión y edición.

REFERENCIAS

1. Ohio Medical. Los principios del vacío y la aplicación clínica en el entorno del hospital. Hospitecnia; 2023. https://hospitecnia.com/documentacion/vacio-aplicacion-clinica-entorno-hospital/

2. COVAL. Generación de vacío: Venturi, bomba de vacío y generadores de vacío VR, CIL, GVP, LEM, LEMAX, GVMAX. COVAL Ibérica; 2023. https://www.coval-iberica.com/la-tecnologia-de-vacio/guia-de-la-manipulacion-por-vacio/generacion-de-vacio/

3. Planas O. Ecuación y principio de Bernoulli: aplicaciones y ejemplos. Energía Nuclear; 2025. https://energia-nuclear.net/fisica/mecanica-de-fluidos/ecuacion-de-bernouilli

4. Noguera IB. ¿Qué es la ecuación de Bernoulli?. Ingeniería Química Reviews; 2025. https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/10/ecuacion-de-bernoulli.html

5. Zapata F. Ecuación de continuidad: fórmula, aplicaciones, ejercicios resueltos. Lifeder; 2025. https://www.lifeder.com/ecuacion-de-continuidad/

6. Bardales EHJ. Densidad del agua líquida entre 0 °C y 100 °C, 1 atm. Academia.edu; 2025. https://www.academia.edu/11323057/Densidad_del_agua_l%C3%ADquida_entre_0_C_y_100_C_1atm

7. Buratto L, Brint SF, Sorce R. Pumps of newer machines. Cataract surgery with phaco and femtophaco techniques. 2024:99-116. https://doi.org/10.1201/9781003522911-9

8. Čech J, Sťahel P, Prokeš L, Trunec D, Horňák R, Rudolf P, et al. Glow discharge in water cavitation cloud with improved efficiency for hydrogen peroxide production. Plasma Sources Sci Technol. 2025;34. https://doi.org/10.1088/1361-6595/addf79

9. Scott RA, Holtmeyer CJ, Parker TM, Willis JK, Scott WJ, Olson RJ. Efficiency of venturi vs peristaltic-based phacoemulsification in femtosecond laser cataract surgery. J Cataract Refract Surg. 2025;51:382-387. https://doi.org/10.1097/j.jcrs.0000000000001618

10. Sharifi F, Jash A, Abbaspourrad A, Rizvi SSH. Generation of ironized and multivitamin-loaded liposomes using venturi-based rapid expansion of a supercritical solution (Vent-RESS). Green Chem. 2020;22:1618-1629. https://doi.org/10.1039/c9gc04018h

11. Wang Y, Xu H, Sui B, Xi H, Fu Y, Zhao W, et al. Self-aspiration sampling design for rapid analyses of volatile organic compounds based on atmospheric pressure chemical ionization/photoionization combined ionization source mass spectrometry. Anal Methods. 2024;16:1763-1769. https://doi.org/10.1039/d4ay00019f

12. Suzuki H, Igarashi T, Takahashi H. Effect of a new phacoemulsification and aspiration handpiece on anterior chamber stability. J Cataract Refract Surg. 2023;49:91-96. https://doi.org/10.1097/j.jcrs.0000000000001071

13. Dayıoğlu MA. Experimental study on design and operational performance of solar-powered venturi aeration system developed for aquaculture: a semi-floating prototype. Aquac Eng. 2022;98. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2022.102255

14. De Saram EMPM, De Silva WMDN, Dissanayake YD, Yazeer SAM, Amarasinghe YWR. Design and development of an automated paddy transplanting machine with a novel planting mechanism. 2022. https://doi.org/10.1109/MERCon55799.2022.9906240

15. Liew KCS, Rasdi A, Budhijanto W, Yusoff MHM, Bilad MR, Shamsuddin N, et al. Porous venturi-orifice microbubble generator for oxygen dissolution in water. Processes. 2020;8:1-15. https://doi.org/10.3390/pr8101266

16. Michael A, Fitzpatrick L, Sorg MH, Poltak S, Burgess K, Moreau AR. The recovery of human remains from a vehicle submerged for 43 years using a marine venturi vacuum system. Forensic Anthropol. 2023;6:36-41. https://doi.org/10.5744/fa.2022.0007

17. Gavali SR, Prashant MP. Exploration of micro-miniature venturi pump for continuous glucose monitoring through interstitial fluid extraction. Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci. 2025;239:885-898. https://doi.org/10.1177/09544062241288653

18. Geavlete P, Multescu R, Mares C, Buzescu B, Iordache V, Geavlete B. Retrograde intrarenal surgery for lithiasis using suctioning devices: a shift in paradigm? J Clin Med. 2024;13. https://doi.org/10.3390/jcm13092493

19. Ho L, Chehroudi C, Sivalingam S. Miniaturized percutaneous nephrolithotomy with vacuum-assisted access sheaths for treatment of nephrolithiasis. J Urol. 2024;212:504-506. https://doi.org/10.1097/JU.0000000000004057

20. Jash A, Ubeyitogullari A, Rizvi SSH. Synthesis of multivitamin-loaded heat stable liposomes from milk fat globule membrane phospholipids by using a supercritical CO2-based system. Green Chem. 2020;22:5345-5356. https://doi.org/10.1039/d0gc01674h

21. Jinadu A, Olayemi OA, Daniel J, Odenibi OJ, Koloskov V, Tiniakov D. Optimization of aircraft fuel dump rate towards the mitigation of post-impact fire. Defect Diffus Forum. 2023;426:127-140. https://doi.org/10.4028/p-gz5an7

22. Katkar YR, Vernekar AR, Jahagirdar AK, Waghmare YC, Deshmukh BB. CFD analysis and 3D printing of venturi for vacuum-assisted LDPE grain flow system. 2022:1-10. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9952-8_1

23. Kraus L, Hopmann C, Facklam M. Increased cooling capacity when using a flexible air guiding system due to the venturi effect in blown film extrusion. J Plast Technol. 2020;2020:133-158. https://doi.org/10.3139/O999.02042020

24. Latif L, Macdonald J. Suction devices. Anaesth Intensive Care Med. 2020;21:481-484. https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2020.07.003

25. Li L, Yang C, Mu Y, Meng F, He S, Sigrimis N. Performance and simulation of compound fertilizer suction device for fertigation control system. Int Agric Eng J. 2020;29:254-261.

26. Minaei M, Faghiri S, Ranjbar Kermani J, Riahi A, Behshad Shafii M. A novel solar-driven vacuum desalination unit: simultaneously venturi-induced self-evaporation and self-condensation with fresh water cycle. Sol Energy. 2024;282. https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112889

27. Pradeep J, Arisudan TH. A smart vacuum cleaning bot - Clean Bot Xcelerate. 2024. https://doi.org/10.1109/ICSES63760.2024.10910639

28. Pratama HA, Hendro H, Purwantara P, Pangestu D, Santosa P, Nurliati G. Design of vacuum evaporator for optimization of corrosive liquid radioactive waste treatment. 2024;2967. https://doi.org/10.1063/5.0193102

29. Rossi T, Saffioti S, Angelini G, Querzoli G, Telani S, Rossi A, et al. Testing a novel device for accurate ultrasound delivery during crystalline lens phacoemulsification surgery. Transl Vis Sci Technol. 2020;9. https://doi.org/10.1167/tvst.9.3.7

30. Alghamdi A. Jet pump kick-off: a sustainable approach for wells compared to nitrogen lifting. 2024. https://doi.org/10.2118/221519-MS

31. Andrade-Cadena DM, Niño Davila U, de los Santos Garcí FMI, Nahmad-Molinari Y. Evaporative cooling driven by a venturi tube revisited: assessing the performance of different refrigerant-circulating pairs. Int J Renew Energy Res. 2025;15:108-117. https://doi.org/10.20508/IJRER.V15I1.14631.G9018

32. Rozsa J, Song Y, Webb D, Debaene N, Kerr A, Gustafson EL, et al. Simulation and measurement of image charge detection with printed-circuit-board detector and differential amplifier. Rev Sci Instrum. 2020;91. https://doi.org/10.1063/5.0003020

33. Savchuk SI, Umerov ED, Abdulgazis AU. Investigation of the optimal vacuum depth created by an ejector depending on the value of the supply pressure. Adv Eng Res (Rostov-on-Don). 2025;25:43-51. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-1-43-51

34. Ahlquist M, Jitosho R, Bao J, Okamura AM. phloSAR: a portable, high-flow pressure supply and regulator enabling untethered operation of large pneumatic soft robots. 2024:28-33. https://doi.org/10.1109/RoboSoft60065.2024.10522055

35. Baek S, Kim DO. Predictive process adjustment by detecting system status of vacuum gripper in real time during pick-up operations. Processes. 2021;9. https://doi.org/10.3390/pr9040634

36. Scott RA, Holtmeyer CJ, Parker TM, Scott WJ, Olson RJ. Comparison of venturi and peristaltic based phacoemulsification efficiency in routine femtosecond laser cataract surgery. Can J Ophthalmol. 2025;60:85-90. https://doi.org/10.1016/j.jcjo.2024.07.012

37. Singh GK, Purwar G, Patel R, Nimavat H, Sharma R, Panchal R, et al. Void fraction measurement system for steady state horizontal two phase liquid nitrogen flow. J Electr Electron Eng. 2021;14:53-59.

38. Soule C, Whitaker T, Sherbotie N, Montgomery J, Klug K, Wagner L, et al. Comparison of post-occlusion surge between venturi and peristaltic phacoemulsification pump type. J Cataract Refract Surg. 2026. https://doi.org/10.1097/j.jcrs.0000000000001899

39. Corcoran D. Quality steel needs quality vacuum. 2024:800-802. https://doi.org/10.33313/388/084

40. Tonolli F. Suction system from the self-induced mold cavity (Venturi). Metall Ital. 2022;114:73-77.

41. Korkmaz YS, Kibar A, Yigit KS, Erturk E, Doğruyol Z. Investigation of a vacuum ejector used in a dynamic function vehicle tire air control valve. J Appl Fluid Mech. 2025;18:2361-2376. https://doi.org/10.47176/jafm.18.9.3300

42. Latif L, Macdonald J. Suction devices. Anaesth Intensive Care Med. 2023;24:497-500. https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2023.05.017

43. Sherwin D, Dees J. Fuel and engine management system for gaseous-fueled spark-ignition non-road engines. 2021. https://doi.org/10.1115/ICEF2020-3045