



Diseño y Fabricación de un Levitador Neumático para Prácticas de Control de Procesos Utilizando Manufactura Aditiva

Machado-Díaz, E.¹ ✉; Coto-Fuentes, H.²; González-Vargas, L.A.³

Datos de Adscripción:

¹ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, División de Ingeniería en Sistemas Automotrices, Av. Tecnológico No. 1555 Sur Periférico Gómez - Lerdo Km. 14.5, Ciudad Lerdo, Estado de Durango C.P. 35150.

² Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Laguna, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Blvd. Revolución y Av. Instituto Tecnológico de La Laguna, Torreón, Coahuila, C.P. 27000

³ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, División de Posgrado e Investigación, Av. Tecnológico No. 1555 Sur Periférico Gómez - Lerdo Km. 14.5, Ciudad Lerdo, Estado de Durango C.P. 35150.

✉ eduardo.md@itslerdo.edu.mx

Resumen - Una de las principales problemáticas en el proceso de enseñanza – aprendizaje de la teoría de control es la falta de prototipos que permitan llevar a la práctica los conocimientos adquiridos. El presente trabajo presenta el diseño y la fabricación de un levitador neumático utilizando Diseño Asistido por Computadora (CAD), Manufactura Asistida por Computadora (CAM) e Ingeniería Asistida por computadora (CAE) a través del software NX de Siemens. Se presentan las etapas durante el diseño, simulaciones de esfuerzos, comportamiento térmico y flujo de aire con la finalidad de asegurar el correcto funcionamiento de la estructura. Así mismo, una propuesta de tarjeta electrónica para el control del sistema diseñada en el software Eagle de Autodesk y fabricada a través de una fresadora de control numérico (CNC) para mejorar el acabado y rendimiento de los componentes electrónicos. La parte electrónica está formada por un control de corriente directa acondicionado a una placa ESP32 y un sensor láser de distancia VL5310X. También se tiene un gabinete de control que contiene una fuente de alimentación, una pantalla LCD y los conectores necesarios para el intercambio de información entre la planta de prueba (levitador) y el controlador (ESP32). Se realizaron pruebas a lazo abierto para verificar el correcto funcionamiento de la estructura y componentes electrónicos teniendo resultados satisfactorios para introducir el controlador que el usuario final decida utilizar.

Palabras Clave – Control, Diseño Asistido, Impresión 3D, Levitador, Manufactura, Neumático

Abstract - One of the primary challenges in control theory education is the scarcity of prototypes enabling students to apply their knowledge of process control in a practical setting. This project addresses this gap by designing and manufacturing a pneumatic levitator using Computer-Aided Design (CAD), Computer-Aided Manufacturing (CAM), and Computer-Aided Engineering (CAE) tools within Siemens NX software. The design process incorporates stress simulations, thermal behavior analysis, and airflow simulations to guarantee the structural integrity of the levitator. Additionally, an electronic control board is

proposed, designed using Autodesk Eagle software and fabricated using a Computer Numerical Control (CNC) milling machine to enhance the precision and performance of the electronic components. The electronic system consists of a direct current (DC) control system implemented on an ESP32 board coupled with a VL5310X laser distance sensor. A control cabinet is also included, housing a power supply, an LCD screen, and the necessary connectors to facilitate information exchange between the test plant (levitator) and the controller (ESP32). Open-loop tests were conducted to validate the functionality of both the structure and the electronic components. These tests yielded satisfactory results, paving the way for the integration of any controller chosen by the end-user.

Keywords – 3D printed, Control, Design, Levitator, Manufacturing, Pneumatic.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Importancia de los sistemas de control en la actualidad

La evolución de los sistemas industriales debido a los avances en las tecnologías de la información, así como los sistemas mecatrónicos, trae como resultado la necesidad de personal con habilidades en distintas áreas del conocimiento, que integrados en equipos multidisciplinares pueden realizar proyectos de alta complejidad, entre estas disciplinas una de las más importantes es el control de proceso (Ponsa, 2001).

Anteriormente la automatización estaba enfocada principalmente en áreas como la electrónica y la mecánica. Sin embargo, esto ha ido cambiando paulatinamente con la incursión de sistemas informáticos en el control de procesos, convirtiéndolos en sistemas mecatrónicos. Debido a ello es necesario combinar los circuitos electrónicos con herramientas de computación para crear sistemas más eficientes y puedan ser monitoreados remotamente.

Este proceso de evolución en los sistemas ha permitido que los países crezcan industrialmente y la producción se realice en las condiciones idóneas. Sin embargo, este proceso presenta un problema cuando la tecnología que se utiliza requiere un conocimiento especializado en áreas del control automático (Camargo, 2015).

Los sistemas de control desempeñan un papel fundamental y crítico en el campo de la automatización y de la mecatrónica en general. Su importancia radica en su capacidad para mejorar la eficiencia, la precisión y la funcionalidad de una gran variedad de sistemas, desde los procesos de manufactura hasta la robótica y electrónica de consumo. Entre sus beneficios más importantes se encuentran (Bolton, 2001):

- Optimización de procesos industriales.
- Aumento en la precisión y repetibilidad.
- Ahorro de Energía.
- Aumento en la seguridad.
- Aplicación en el modelado y control de robots.
- Creación de vehículos autónomos.
- Evolución con la industria 4.0.

Ya que los sistemas de control requieren de un conocimiento profundo de diferentes áreas para su aplicación y diseño, como la matemática y la física, su aprendizaje se vuelve complejo existiendo gran cantidad de información que, en la mayoría de las ocasiones, solo presenta la parte teórica sin llevarla a la práctica.

Si bien existen herramientas que permiten el análisis de sistemas y facilitan los cálculos matemáticos, las más utilizadas tienen un costo de licencia que no es accesible para la mayoría de los estudiantes y pequeños desarrolladores. Es precisamente lo anterior, lo que genera un área de oportunidad para el diseño, fabricación e implementación de prototipos didácticos que permitan disminuir las limitaciones en esta rama de la automatización.

En el ámbito antes descrito, el presente trabajo propone un sistema de levitación neumático (dispositivos que utilizan la fuerza del aire o un gas para suspender objetos en el aire sin contacto físico con ninguna superficie (Pinto Poalacin, 2020)) como opción para afianzar conocimientos y desarrollar habilidades en las áreas de control de procesos, permitiendo la combinación de distintas técnicas y algoritmos para alcanzar resultados más precisos y controlados.

1.2 Antecedentes de plantas de levitación neumática

En 2022 Armendariz y Moreta utilizaron un ventilador para computadora como actuador para un dispositivo neumático, esto siendo posible a través de un tubo de contención de un diámetro similar al ventilador utilizado. Sin embargo, se tuvieron problemas con la potencia del mismo y la adaptación de la estructura mecánica. Así mismo, el control se realizó mediante un Controlador Lógico Programable (PLC). (Armendariz Parraga, 2022).

Durante el mismo año Quevedo (Revilla, 2022) realizó un prototipo similar de levitación. El dispositivo tenía un acople fabricado por el autor entre el actuador y el tubo de contención, ya que éste último era de menor diámetro.

Otro ejemplo de prototipos para sintonización de controladores lo presenta Colín (Colín, 2020), que implementó controladores PID para el control de la altura en un regulador neumático, cuya base era un tubo de acrílico y como objeto a levitar una esfera de unicel. Como actuador y elemento de control final utilizó un ventilador de 6000rpm. En dicho prototipo se probaron diferentes algoritmos de control, entre los que se encuentran el evolutivo y mediante criterios de la curva de respuesta de Ziegler – Nichols. El autor menciona que este tipo de prototipos permiten que los usuarios desarrollen habilidades en el diseño de métodos de control.

En 2015 García (García, 2015) desarrolló una simulación en un ambiente 3D de un accionador neumático que tenían en físico. La intención del artículo propuesto era realizar la sintonización de

los controladores a través de un entorno de simulación previo al uso del algoritmo en la planta real. El actuador en este caso fue un motor de corriente alterna, utilizando como elemento de control un variador de frecuencia.

Una de las dificultades mencionadas por el autor es la fabricación de la planta debido a sus dimensiones, por ello la decisión de desarrollar un entorno simulado. Así mismo, en la bibliografía actual se tienen diferentes publicaciones y proyectos enfocados en la elaboración de controladores para levitadores neumáticos. En la mayoría de los artículos analizados, se tienen problemas en la fabricación de los prototipos, pues la mayor parte de las investigaciones se centran en el desarrollo de algoritmos de control más que en la planta de prueba que, generalmente, basa su construcción en materiales como madera o piezas plásticas recicladas que incrementan el volumen del prototipo y dificultan que éste pueda replicarse.

Derivado de lo anterior, se presenta una propuesta de prototipo de levitador neumático diseñado en el software especializado NX de Siemens®, utilizando licenciamiento de estudiante.

La fabricación de las piezas diseñadas se llevó a cabo mediante manufactura aditiva por impresión 3D, con la finalidad de que el prototipo pueda ser replicable y que la estructura esté a la medida de los componentes utilizados.

1.3 Diseño Asistido por Computadora (CAD).

El diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés, *Computer-Aided Design*) es el uso de *software* especializado para crear, modificar, analizar y optimizar un diseño. Este tipo de programas permite a los diseñadores, ingenieros y arquitectos generar representaciones precisas y detalladas de productos y estructuras antes de su fabricación o construcción. El CAD se utiliza en una amplia variedad de industrias, incluyendo la ingeniería, la arquitectura, la manufactura y el diseño industrial.

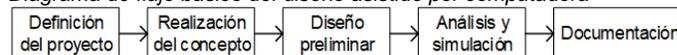
Estos programas permiten la creación de dibujos en dos dimensiones y en tres dimensiones, facilitando la visualización y manipulación de diseños complejos.

Así mismo, cuentan con herramientas para diseñar con alta precisión y exactitud. Una de las prestaciones más importantes de estas aplicaciones son las herramientas de simulación y análisis, que permiten evaluar el comportamiento de los diseños bajo diversas condiciones, como tensiones, vibraciones, flujos térmicos, flujos neumáticos etc.

La Figura 1, muestra la metodología básica para la elaboración de un diseño asistido por computadora.

Figura 1.

Diagrama de flujo básico del diseño asistido por computadora



Para llevar a cabo un diseño CAD se requiere, en primer lugar, determinar los objetivos y los requisitos específicos del proyecto, incluyendo dimensiones, materiales, etc. Posteriormente, se crean dibujos preliminares y bocetos para explorar diferentes conceptos y enfoques. Con los bocetos realizados, se procede a desarrollar los modelos preliminares en 2D y 3D, definiendo la geometría básica y las principales características del diseño.

Una vez que se tiene el diseño básico, se realiza el refinado del modelo CAD, incorporando detalles específicos como tolerancias, acabados superficiales, ensamblajes y componentes individuales.

En este proceso, también se pueden llevar a cabo los análisis del comportamiento ante diferentes fenómenos físicos. Por último, se realiza la documentación del diseño, es decir, se generan los planos detallados en vistas, secciones, dimensiones y notas técnicas.

1.4 Manufactura aditiva (impresión 3D).

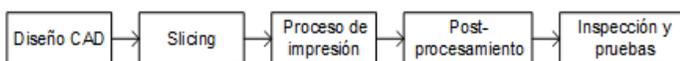
La manufactura aditiva, también conocida como impresión 3D, es un proceso de fabricación que crea objetos tridimensionales a partir de un modelo digital. A diferencia de otros métodos de fabricación tradicionales, que eliminan material de un bloque sólido, la manufactura aditiva agrega material capa por capa. Esto permite crear objetos con geometrías complejas que serían difíciles o imposibles de fabricar con métodos tradicionales (Sanchez, 2020).

En un contexto científico, la manufactura aditiva se puede definir como un proceso de fabricación basado en la adición de material, en el que un modelo digital se utiliza para controlar la deposición de material capa por capa, creando un objeto tridimensional. Este proceso se caracteriza por su flexibilidad, capacidad de crear geometrías complejas y potencial para la personalización. En la Figura 2, se muestra la metodología general para la implementación de manufactura aditiva.

La impresión 3D ha permitido que docentes y estudiantes puedan desarrollar y materializar ideas de manera más sencilla y accesible ya que, a diferencia de los métodos tradicionales que requieren herramientas y habilidades especializadas, la impresión 3D se ha vuelto más accesible gracias a la disponibilidad de impresoras de bajo costo y de programas intuitivos y de uso libre.

Figura 2.

Diagrama de flujo básico de manufactura aditiva.



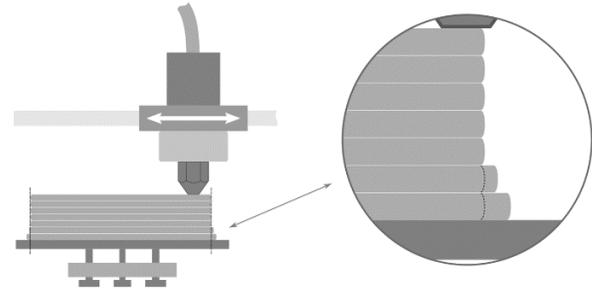
En primer lugar, se realiza el diseño del modelo tridimensional utilizando software de diseño asistido por computadora (CAD). Posteriormente, se crea el código G que controlará el movimiento de la impresora 3D, a este proceso se le conoce como *Slicing* (segmentación). Una vez que se tiene el código G se lleva a cabo la impresión 3D utilizando el material adecuado de acuerdo a las necesidades del proyecto. Entre los más utilizados se encuentra el ácido poliláctico (PLA) y el polietileno tereftalato modificado con glicol (PETG). Un ejemplo del funcionamiento de la impresión 3D se muestra en la Figura 3.

Cuando la impresión ha terminado, es necesario una post producción de la misma, producto de imperfecciones que pueden darse por la naturaleza del procedimiento durante el depósito del material. Por último, se llevan a cabo las pruebas del prototipo en la aplicación requerida y se hacen las modificaciones en caso de ser necesarias (Arcos, 2017).

Otra de las ventajas del uso de este tipo de método de fabricación es la reducción significativa de costos y la optimización de recursos, pues generalmente la fabricación mediante eliminación requiere de materiales más especializados y por ende más costosos.

Figura 3.

Ejemplo de funcionamiento de la impresión 3D.



1.5 Plataforma ESP32

El ESP32 es un microcontrolador altamente versátil y potente que se utiliza en una variedad de aplicaciones, incluido el control de procesos en entornos automatizados. Su importancia en el control de procesos radica en su capacidad para gestionar y controlar una amplia gama de dispositivos y sensores, así como para ejecutar algoritmos de control de manera eficiente y confiable. En este contexto, el enfoque en el control de procesos utilizando el ESP32 tiene varios aspectos clave que son fundamentales para su relevancia y aplicación efectiva.

Uno de los aspectos más destacados es la capacidad del ESP32 para adquirir datos de sensores y dispositivos de manera precisa y oportuna. Esto es crucial en el control de procesos, ya que permite monitorear variables como temperatura, presión, flujo, nivel, entre otros, en tiempo real. La capacidad de adquisición de datos del ESP32 facilita la implementación de sistemas de control en tiempo real que pueden ajustar parámetros y tomar decisiones de manera dinámica en función de las condiciones del proceso (Pravalika, 2019).

Otro aspecto importante es la capacidad de procesamiento del ESP32, que le permite ejecutar algoritmos de control sofisticados y responder de manera rápida a eventos y cambios en el proceso. Esto es esencial para garantizar un control preciso y eficiente de las variables del proceso, así como para implementar estrategias de control adaptativo que optimicen el rendimiento y la eficiencia del sistema.

En entornos industriales y de producción, el ESP32 puede utilizarse para implementar sistemas de control de procesos en aplicaciones como control de temperatura en hornos industriales, control de nivel en tanques de almacenamiento, control de velocidad en motores, control de flujo en sistemas de tuberías, entre otros. Su versatilidad y capacidades lo convierten en una opción atractiva para diseñadores y desarrolladores que buscan soluciones de control de procesos robustas y eficientes (Babiuch, 2019).

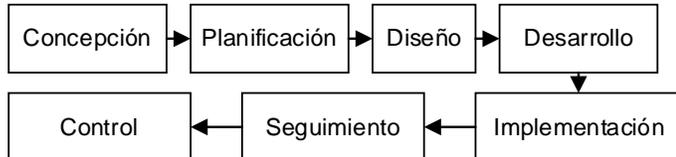
II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Desarrollo de la metodología del proyecto

Para este proyecto se utilizó la metodología de ingeniería aplicada, que consiste en pasar por diversas fases que siguen un proceso sistemático, desde la concepción de la idea hasta su implementación y seguimiento. A continuación, en la Figura 4, se presentan las fases típicas de la metodología anteriormente descrita.

Figura 4.

Metodología para el desarrollo del proyecto



El sistema trabaja a partir de la generación de una película de aire entre la base del levitador y el objeto que se desea levitar, creando así una fuerza de sustentación que contrarresta la gravedad y permite mantener el equilibrio del objeto en posición flotante.

El levitador consta de tres partes principales:

- La base, en donde se encuentra un actuador que genera un flujo de aire que, en este caso particular, es un motor de corriente directa al cual se ha adaptado un sistema de aspas.
- Tubo de acrílico: Está conectado a la base y es por donde se transmite el aire hacia el objeto. Es aquí donde se crea la columna neumática que permite del control de flujo.
- Tapa: Se encuentra en la parte superior del prototipo, aquí se coloca el sistema de retroalimentación o sensor que monitorea el nivel al que se encuentra levitando el objeto.

En la Figura 5, se muestra en un diagrama sencillo el funcionamiento y los componentes del prototipo neumático que se propone.

Figura 5.

Descripción general del levitador neumático



El principio de funcionamiento se basa en la tercera ley de Newton, que establece que "a toda acción corresponde una reacción igual y opuesta". En este caso, la acción de expulsar aire a presión hacia arriba genera una reacción que empuja hacia abajo al objeto, creando así la fuerza de levitación. Es importante destacar que la estabilidad en el prototipo depende de mantener un flujo de aire constante y uniforme, así como de controlar factores como la presión, la distancia y la carga del objeto.

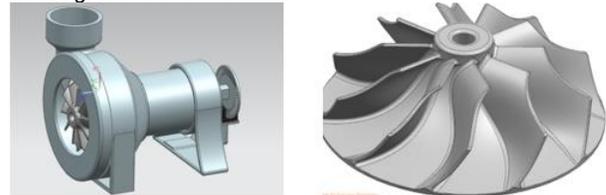
Cuando se activa el actuador, se inicia la expulsión de aire a presión a través de los orificios de la base. Esta corriente de aire crea una capa de aire comprimido entre la base y el objeto, generando una fuerza de sustentación que equilibra el peso del objeto y lo mantiene suspendido en el aire. La presión del aire y la distancia entre la base y el objeto son controladas de manera precisa para garantizar la estabilidad y posición del objeto levitado.

2.2 Diseño utilizando software especializado

Se realizó el diseño utilizando el software NX12 de Siemens de los componentes que forman parte del prototipo del levitador. En primer lugar, el diseño del generador de columna de aire que está formado por una propela conectada al eje de un motor de corriente directa, el diseño de la misma se presenta en la Figura 6.

Figura 6.

Diseño del generador de columna de aire

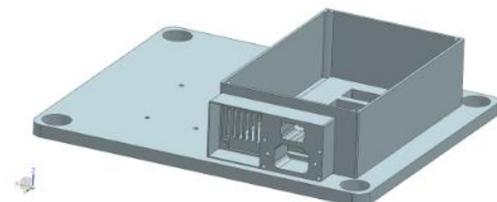


La parte del generador de columna de aire contiene también soportes para el motor de corriente directa con un disco ranurado funcionando como encoder rotativo para la retroalimentación de la velocidad a la que se encuentra trabajando y tener un parámetro matemático que relacione las revoluciones por minuto por la columna de aire generado. También se tiene un adaptador para que el flujo de aire entre directamente al tubo de acrílico por donde se encontrará levitando el objeto.

Posteriormente, se modelaron los soportes y la base definiendo el tamaño teniendo en cuenta los componentes que se incluirán en la misma como la fuente de voltaje, el generador de columna de aire y la pantalla LCD. Se tienen también huecos para los soportes de tubería PVC que mantendrán la estructura. La base se muestra en la Figura 7.

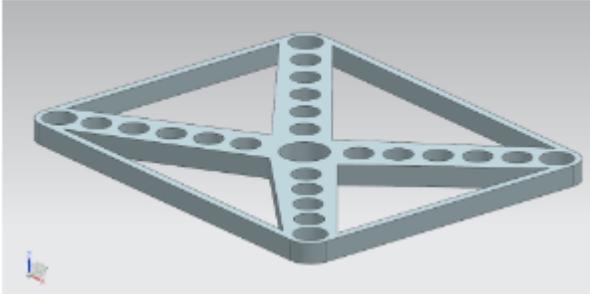
Figura 7.

Diseño del generador de columna de aire



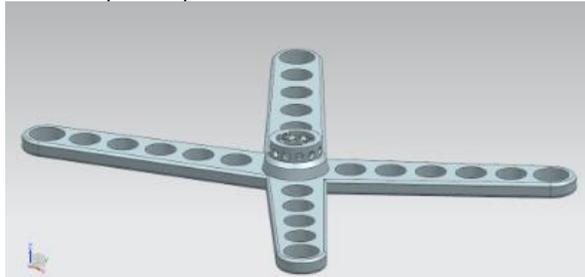
Con la finalidad de generar una estructura rígida se diseñó un soporte central tratando de optimizar el diseño inicial. Se tomó como parámetro retirar la mayor cantidad de material a utilizar con la finalidad de utilizar de forma más eficiente los materiales de fabricación. El soporte central se presenta en la Figura 8.

Figura 8.
Modelado del soporte central del levitador.



El modelado de la parte superior que se ve en la Figura 9, tiene en su interior el soporte del sensor láser que realizará el monitoreo del estado del objeto a levitar. Al realizarlo de esta forma se tiene la seguridad de que éste se encuentra alineado al tubo de acrílico. También se consideró un sistema de escape de la columna de aire.

Figura 9.
Modelado de la parte superior del Levitador.



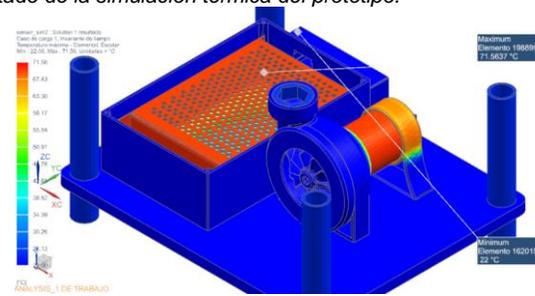
2.3 Desarrollo de simulaciones

Con la finalidad de tener una visión del funcionamiento general del proyecto antes de su manufactura se realizaron simulaciones de diferentes tipos utilizando software especializado, en este caso NX12 de Siemens.

En primer lugar, se analizó el flujo térmico a través de los componentes diseñados para poder predecir el comportamiento de sus componentes a las temperaturas a las que se encontrará sometido. Esto es importante, ya que se plantea la idea de fabricarlo con manufactura aditiva y los materiales (generalmente plásticos) pueden presentar una deformación en función de la temperatura a la que estén funcionando y también el lugar en donde se pretenda mantenerlos.

Se aplicó una temperatura de 75°C en la carcasa del motor y la base de la fuente de alimentación. El límite fue establecido al ser un valor medio de la mayor temperatura a la que puede trabajar el motor y la fuente de acuerdo a las especificaciones técnicas de las mismas. El resultado de la simulación se puede ver en la Figura 10.

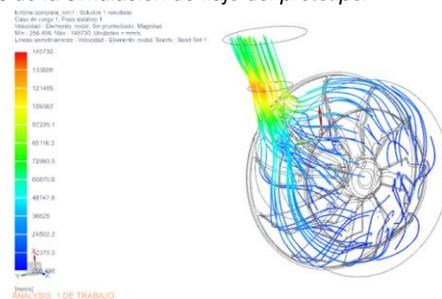
Figura 10.
Resultado de la simulación térmica del prototipo.



Al analizar el comportamiento en los límites máximos se puede observar que no se tiene una deformación considerable en las piezas plásticas al trabajar con los materiales propuestos, esto permite tener una seguridad de que el funcionamiento de la manufactura estará en los parámetros adecuados. El análisis se realizó únicamente en este lugar ya que es el que se encontrará sometido a las condiciones máximas de operación. Se supone entonces, que los demás elementos funcionarán de forma correcta al estar sometidos a temperaturas inferiores a las utilizadas en la simulación.

Después, se procedió a la realización del flujo de aire del generador de la columna para verificar que el diseño permita una correcta circulación hacia el adaptador del tubo de acrílico. En la Figura 11, se presentan los resultados de la simulación.

Figura 11.
Resultados de la simulación de flujo del prototipo.



Se puede notar la eficiencia de la turbina ya que no se encontró turbulencia considerable en el análisis y se observa la subida en la velocidad del fluido siendo su punto más alto 14 veces la velocidad de entrada y en la salida entre 6 y 7 veces la velocidad de entrada.

Es necesario tomar en cuenta que la velocidad de la columna de aire depende de muchos factores como la velocidad de giro, la velocidad del aire del exterior de la turbina, así como el nivel de apertura que se tiene en la parte de las hélices. Sin embargo, se puede concluir que la fabricación del generador de columna de aire puede llevarse a cabo, pues si se tiene un aumento considerable en la velocidad de salida con respecto a la velocidad de entrada.

2.4 Construcción del prototipo

Para la fabricación del prototipo se utilizó la técnica de manufactura aditiva a través de impresión en 3D. Los elementos fueron implementados con material PETG que es de bajo costo

e imprimible en la mayoría de las impresoras 3D comerciales. Así mismo, presentan buenas prestaciones tanto mecánicas como térmicas. En la Figura 12, se muestra un ejemplo del proceso de impresión con la impresora Ender 3V2 de Creality.

Figura 12.
Ejemplo de fabricación del prototipo utilizando impresión 3D.



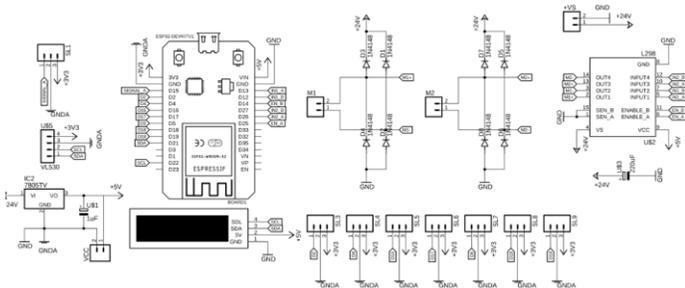
El proceso de hizo en varias fases y con diferentes impresoras de acuerdo a las dimensiones de las piezas realizadas. Ejemplos de las piezas ya fabricadas se observan en la Figura 13.

Figura 13.
Ejemplo de piezas fabricadas del prototipo.



Con las piezas fabricadas, se procedió al diseño electrónico de la parte de control, para ello se utilizó el software Eagle de Autodesk. El circuito electrónico contiene los componentes necesarios para el manejo de la velocidad y sentido de giro del motor, elementos de visualización, la conexión para el sensor de retroalimentación, así como elementos de visualización como una pantalla LCD. El esquemático se ve en la 14.

Figura 14.
Diseño esquemático del circuito de control.



El circuito electrónico propuesto se basa en un microcontrolador ESP32 que ha sido escogido en base a sus características principales y las grandes prestaciones que tiene en función de su precio. Así mismo, el auge que han tenido el desarrollo de proyectos con este tipo de sistema embebido ha creado una

basta comunidad y extensa bibliografía de referencia que se puede utilizar para la adquisición de conocimientos de manera autodidacta.

Sin embargo, la planta diseñada no es exclusiva de un solo microcontrolador, puede aplicarse a cualquier tipo dependiendo de las necesidades del usuario. En la Tabla 1, se muestra una tabla comparativa de referencia de las principales características entre 3 de las plataformas más utilizadas: ESP32, Arduino y Raspberry Pi. Si bien estas marcas tienen un vasto catálogo, se acotó el estudio para las placas Arduino Uno, ESP32 DEVKIT1 y la Raspberry Pi Pico.

Tabla 1.
Tabla comparativa de características entre microcontroladores

Característica	Arduino Uno	ESP32	Raspberry Pi Pico
Microcontrolador	ATmega328P	Tensilica Xtensa LX6 (dual-core)	RP2040 (dual-core ARM Cortex-M0+)
Velocidad de Reloj	16 MHz	240 MHz	133 MHz
Memoria Flash	32 KB	4 MB (en promedio, puede variar)	2 MB
SRAM	2 KB	520 KB	264 KB
Conectividad	No integrada	Wi-Fi, Bluetooth	No integrada
GPIO (Pines de E/S)	14 digitales, 6 analógicos	34 (varía según el modelo y fabricante)	26
Interfaces de Comunicación	UART, SPI, I2C	UART, SPI, I2C, I2S, CAN, PWM	UART, SPI, I2C, I2S, PWM, PIO
Voltaje de Operación	5V	3.3V	3.3V
Consumo de Energía	Relativamente bajo	Modo de bajo consumo	Bajo, con modos de ahorro de energía
Facilidad de Programación	Muy alta, utilizando el IDE de Arduino	Alta, soporta Arduino, ESP-IDF, MicroPython	Alta, soporta C/C++, MicroPython
Capacidades de Expansión	Shields Arduino	Módulos y shields ESP32	HATS y módulos compatibles
Costo Aproximado en dólares.	\$20	\$5 - \$10	\$4

Para el control de potencia del actuador, al ser este un motor de C.D., se optó por presentar un puente H, particularmente el circuito integrado L298N. Las prestaciones básicas de dicho circuito se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2.
Principales características del puente H L298N

Característica	Descripción
Tipo	Controlador de motor de puente H dual
Número de Canales	2
Voltaje de Alimentación (V_s)	4.5V a 46V

Voltaje de Lógica	5V
Corriente de Salida	2A por canal
Máxima	
Corriente de Pico	3A por canal (durante cortos períodos)
Máxima	
Potencia de Disipación	25W (con disipador adecuado)
Voltaje de Entrada de Lógica	Baja: $\leq 1.5V$, Alta: $\geq 2.3V$
Protección Térmica	Sí
Protección Contra Sobrecorriente	Sí
Temperatura de Operación	-25°C a +130°C
Frecuencia de Conmutación	Hasta 40 kHz
Tipo de Encapsulado	Multiwatt15 (para el chip L298N)

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados de la fabricación

Una vez que se tuvieron las partes principales impresas se realizó la primera prueba de funcionamiento usando como elemento levitador un disco hueco impreso en 3D con la finalidad de conocer si el objeto levitaba. Para este experimento el control de velocidad se hizo de forma manual a través del cambio de voltaje en una fuente de alimentación de C.D. En la Figura 15 se muestra el ensamble básico del tubo de acrílico y la turbina con el motor.

Figura 16.
Turbina montada con el motor y el tubo de acrílico.



Las pruebas se repitieron con diferentes objetos y objetos tomando como muestra el voltaje que requería el actuador para que el objeto partiera del reposo. Los resultados se ven en la Tabla 3.

Tabla 3.
Resultados de voltaje en objetos de prueba

Objeto	Peso	Voltaje requerido
Esfera	2.5g	20V
Disco	2.2g	18V
Disco hueco	2g	16V

Posteriormente, se montó el sensor de distancia láser, que para este caso se optó por el modelo VL530X que es un módulo de medición de distancia basado en tecnología LIDAR (Light Detection and Ranging), fabricado por STMicroelectronics. Este

sensor utiliza un láser infrarrojo para medir distancias con alta precisión, abarcando rangos desde 30 mm hasta 2 metros. La medición de distancia se realiza mediante la detección del tiempo que tarda un pulso de luz en reflejarse de un objeto y regresar al sensor. Es compacto, consume poca energía y proporciona una interfaz de comunicación I2C, lo que lo hace ideal para el prototipo pues el diámetro del tubo de acrílico es reducido. El montaje del sensor se muestra en la Figura 17.

Figura 17.
Montaje del sensor de distancia en la parte superior.



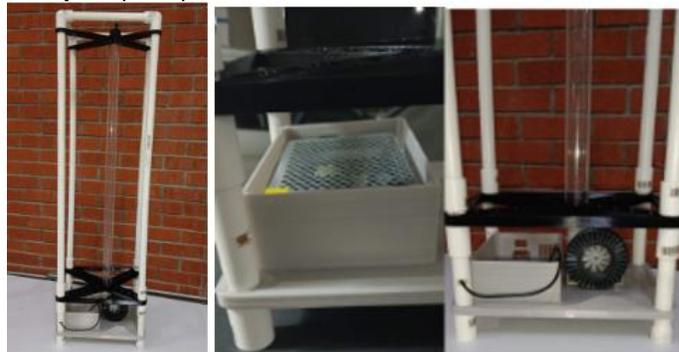
De acuerdo al diseño realizado en el software, se llevó a cabo el armado de todos los componentes estructurales del prototipo. En primer lugar, se añadieron los soportes con tubería PCV que dan rigidez al levitador. En la Figura 18, se muestra un ejemplo de roscado de la tubería para su acoplamiento en los componentes fabricados en 3D.

Figura 18.
Ejemplo de fabricación del prototipo utilizando impresión 3D.



El armazón de tubos de PVC se ensambló conforme a los planos, también se montaron los componentes de la base como la fuente de alimentación, el motor y los conectores eléctricos como se ve en la Figura 19.

Figura 19.
Montaje del prototipo de levitador de aire.



Por último, se realizó el circuito impreso utilizando manufactura por fresadora de control numérico y se montó en el gabinete de control. El resultado se observa en la Figura 20.

Figura 16.

Turbina montada con el motor y el tubo de acrílico.



IV. CONCLUSIONES

El trabajo desarrollado, apoyado en la impresión 3D, el diseño asistido por computadora y el microcontrolador ESP32, representa una integración innovadora de tecnologías avanzadas para desarrollar un sistema de levitación que ofrece numerosas aplicaciones prácticas en el ámbito del control de procesos.

La combinación de manufactura aditiva y el proceso con fresadoras de control numérico, permite fabricar componentes precisos y personalizados para el prototipo, mejorando su diseño y rendimiento. El diseño asistido por computadora facilita la creación de modelos virtuales y simulaciones que ayudan a planificar y mejorar el funcionamiento del levitador. Por su parte, el ESP32 proporciona capacidades de control y comunicación que permiten gestionar de manera eficiente el sistema de levitación y recopilar datos en tiempo real.

Este proyecto puede ser utilizado en prácticas de control de procesos para enseñar conceptos fundamentales como la estabilidad, el control de la presión y la optimización de parámetros. Los estudiantes pueden aprender sobre el uso de sensores para medir variables relevantes, el diseño de algoritmos de control para mantener la levitación estable y la integración de sistemas electrónicos para automatizar el proceso.

Además, puede tener aplicaciones en la industria para manipular objetos delicados sin contacto físico, en laboratorios para realizar experimentos de levitación y en demostraciones educativas para mostrar principios de física y tecnología avanzada. Su versatilidad y capacidad de integración con otros sistemas hacen que sea una herramienta valiosa tanto para la enseñanza como para la investigación en el campo de la ingeniería y el control de procesos.

Si bien la teoría de control es un campo que puede representar un reto para los estudiantes de ingeniería por sus conceptos abstractos y el alto dominio de fundamentos matemáticos que requiere para su entendimiento, el realizar proyectos que permitan a los estudiantes aplicar los algoritmos y las funciones obtenidas y desarrolladas dan pie a la mejora en su comprensión, así como en futuros proyectos que involucren a esta área de la automatización.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Tecnológico Nacional de México (TecNM) Campus Instituto Tecnológico Superior de Lerdo y Campus La Laguna por las facilidades brindadas para la realización del presente trabajo.

También a las divisiones de Sistemas Automotrices, Electrónica y Posgrado por la facilidad para la realización del presente proyecto. Así mismo, a la comunidad estudiantil que es la base del desarrollo de estos prototipos.

VI. REFERENCIAS

- Arcos, G. (2017). Manufactura aditiva para prototipado rápido. *Jóvenes en la ciencia*, 2230-2234.
- Armendariz Parraga, J. (2022). *Diseño e implementación de un levitador neumático*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Babiuch, M. (2019). Using the ESP32 microcontroller for data processing. *20th International Carpathian Control Conference*.
- Bolton, W. (2001). *Ingeniería de control*. Mexico, DF: Alfaomega.
- Camargo, C. (2015). Metodología para la Transferencia Tecnológica en La industria basada en Software Libre. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Colín, L. (2020). Diseño e implementación de un regulador PID del flujo de un levitador neumático. *Tecnología, Diseño e Innovación*, 39-50.
- García, L. (2015). Modelación, simulación y control de un levitador neumático. *Revista Politécnica*, 59-66.
- Pinto Poalacin, S. M. (2020). *Implementación de un módulo de levitador neumático mediante control pid para el Laboratorio de Control y Manipulación Automática de la Facultad de Mecánica*. Riomba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Ponsa, P. (2001). Actividades Docentes en Mecatrónica. *Universidad Politécnica de Catalunya*.
- Pravalika, V. (2019). Internet of things based home monitoring and device control using Esp32. *International Journal of Recent Technology and Engineering* 8, 58-62.
- Revilla, F. Q. (2022). *Diseño y construcción de un levitador neumático*. Universidad de Cantabria.
- Sanchez, N. (2020). La manufactura aditiva como potencializador de los sistemas productivos. *Inventum*, 2-13.

VII. AUTORES

Eduardo Machado Diaz

<https://orcid.org/0000-0003-2610-7570>

Hesner Coto Fuentes

<https://orcid.org/0000-0002-9548-7864>

Luis Amado González Vargas

<https://orcid.org/0009-0008-9094-6188>