

Trabajo Fin de Grado

Control de presurización de una cámara cerrada

Pressurization control of a closed chamber

Autor

Elizabeth Garcia Ortiz

Director

Javier Esteban Escaño

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia

Junio 2024

Página intencionadamente en blanco.



**Escuela Universitaria
Politécnica** - La Almunia
Centro adscrito
Universidad Zaragoza

**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

MEMORIA

Control de presurización de una cámara cerrada

Pressurization control of a closed chamber

Autor: Elizabeth Garcia Ortiz

Director: Javier Esteban Escaño

Fecha: 06 2024

Página intencionadamente en blanco.

INDICE DE CONTENIDO BREVE

1. RESUMEN	1
2. ABSTRACT	2
3. INTRODUCCIÓN	3
4. ANTECEDENTES	5
5. DESARROLLO	8
6. RESULTADOS	25
7. CONCLUSIONES	41
8. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	42
9. BIBLIOGRAFÍA	43
10. ANEXOS	1

INDICE DE CONTENIDO

1. RESUMEN	1
1.1. PALABRAS CLAVE	1
2. ABSTRACT	2
2.1. KEY WORDS	2
3. INTRODUCCIÓN	3
4. ANTECEDENTES	5
4.1.1. Control digital de luminosidad de una estancia usando Arduino	5
4.1.2. Diseño y construcción de un robot auto balanceado mediante Arduino	5
4.1.3. Modelado y diseño de control de trayectoria de un vehículo mediante Arduino.	5
4.1.4. Desarrollo e implementación de un invernadero inteligente controlado con Arduino	5
4.1.5. arMedidor de nivel de agua por presión con Arduino	6
4.1.6. Automatización de un túnel de viento para estudios de comportamiento de vuelo de insectos	7
4.1.7. Proyecto de levitación en túnel de viento con control PID sobre Arduino	7
5. DESARROLLO	8
5.1. MARCO TEÓRICO	8

<i>5.1.1. Variador de frecuencia</i>	8
5.1.1.1. Ventajas de un variador de frecuencia	9
5.1.1.2. Desventajas de un variador de frecuencia	9
5.1.1.3. Variador de Frecuencia SODECA	10
<i>5.1.2. Sensores</i>	11
5.1.2.1. Tipos de sensores	11
5.1.2.2. Características de los sensores	11
5.1.2.3. Sensor de presión	12
5.1.2.4. Sensor MPX5010DP	12
<i>5.1.3. Ventiladores</i>	14
5.1.3.1. Ventiladores centrífugos	15
5.1.3.2. Ventilador Centrifugo SODECA	15
5.1.3.3. Arduino Uno R4 Wifi	16
<i>5.1.4. Placa de circuito impreso</i>	17
5.1.4.1. ESP32	17
5.1.4.2. Relé	17
5.1.4.3. Filtros: Filtros Pasa-Bajos	18
5.1.4.3.1. Filtro Pasa-Bajos Activos	19
5.1.4.3.2. Optoacoplador	20
5.1.4.4. Controlador de retroalimentación PD	21
5.1.4.5. Filtro Digital de Media Móvil	23
5.1.4.6. Filtro Digital EMA	23
6. RESULTADOS	25
6.1. DISEÑO FILTRO PASA BAJOS	25
6.2. DISEÑO CONTROLADOR PD	30
6.3. SIMULACIÓN DEL SISTEMA EN SIMULINK	33
6.4. CONFIGURACIÓN VARIADOR DE FRECUENCIA	33
6.5. PROGRAMA	35
6.5.1. Programación en Arduino	35
6.5.2. Casos de Uso y Diagramas UML	39
6.5.2.1. Casos de uso	39
6.5.2.2. Diagramas de Clase	40
7. CONCLUSIONES	41
8. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	42
9. BIBLIOGRAFÍA	43
10. ANEXOS	1
10.1. ANEXO 1: CIRCUITO ELÉCTRICO PCB	1

10.2. ANEXO 2 1

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Estructura de la cámara cerrada	3
Figura 2 Circuito de pruebas	4
Figura 3 LayOut Conexión del Circuito en físico.....	4
Figura 4 Sistema de funcionamiento del proyecto (Torres, 2019)	6
Figura 5 Medidor de nivel de agua por presión (educación, 2024)	6
Figura 6 Prototipo Túnel de viento (Urquijo, 2016).....	7
Figura 7 Símbolos de los tipos de variadores de frecuencia (Electric, 1999)	9
Figura 8 Regulador de velocidad (Electric, 1999)	9
Figura 9 Conexionado Básico (SODECA, CONVERTIDOR DE FRECUENCIA, 2022)	10
Figura 10 Diagrama de conexiones (SODECA, CONVERTIDOR DE FRECUENCIA, 2022).....	10
Figura 11 MPX5010DP (NXP, 2012)	12
Figura 12 Salida vs Presión diferencial del ensayo del fabricante (NXP, 2012)	13
Figura 13 Banda de error de temperatura (NXP, 2012)	13
Figura 14 Circuito de filtrado de la señal de salida y la fuente de alimentación del sensor MPX5010DP (NXP, 2012)	14
Figura 15 Banda de error de presión (NXP, 2012)	14
Figura 16 Gráfico de eficiencia de motores eléctricos trifásicos (Motores Eléctricos Trifásicos: Estándares de Eficiencia de IE1 a IE5, 2024)	15
Figura 17 CAS-S-254-2T-3 IE3 (Corefluid, 2024)	15
Figura 18 Placa de Arduino Uno R4 Wifi (Arduino® UNO R4 WiFi, 2024).....	16
Figura 19 Modulo ESP32 (Beningo, 2020).....	17
Figura 20 Diagrama del funcionamiento de un relé (Votione, 2024)	18
Figura 21 Relé Arduino (Tolocka, 2015)	18
Figura 22 Curvas de configuraciones de filtros (Floyd, 2008)	19
Figura 23 Filtro pasa-bajos de primer orden con realimentación (Floyd, 2008).....	19

Figura 24 Tipos de Optoacopladores (Optoacoplador, que és y como funciona, 2024)	20
Figura 25 Encapsulado y circuito interno del 4N32 (Vishay Intertechnology, 2024)	20
Figura 26 Sistema de control básico PID, PI, PD. (Gato, 2020)	21
Figura 27 Predicción del error (Gato, 2020).....	22
Figura 28 Filtro con 10 muestras (Llamas, 2014)	23
Figura 29 Filtro con 5 muestras (Llamas, 2014)	23
Figura 30 Filtro pasa bajos con Alpha = 0.05 (Llamas, 2014)	24
Figura 31 Filtro pasa bajos con Alpha = 0.2 (Llamas, 2014)	24
Figura 32 Señal con filtro digital	24
Figura 33 Señal sin filtros digitales	24
Figura 34 Filtro Pasa Bajos RC de segundo Orden	25
Figura 35 Filtro Pasa Bajos RC con equipos de medida	26
Figura 36 Valores Duty Cycle 25%	26
Figura 37 Gráfico Simulación Duty Cycle de 25%	27
Figura 38 Valores Duty con 50%	27
Figura 39 Gráfico de simulación Duty Cycle de 50%	28
Figura 40 Valores Duty Cycle del 75%	28
Figura 41 Gráfico de simulación Duty Cycle de 75%	29
Figura 42 Valores Duty Cycle del 99%	29
Figura 43 Tensión en Variador de frecuencia	30
Figura 44 Grafico de simulación Duty Cycle de 99%	30
Figura 45 Diagrama de control con retroalimentación	30
Figura 46 Gráfica Función de transferencia	32
Figura 47 Regulador Simulado en Simulink.....	33
Figura 48 Simulación regulador con tiempo de respuesta de 0.01	33
Figura 49 Pines de conexión variador. (SODECA, CONVERTIDOR DE FRECUENCIA, 2022)	33
Figura 50 Curva Presión-Frecuencia	34
Figura 51 Gráfico de comportamiento del sistema esperado.....	35

Figura 52 Gráfico Ensayo ASTM E-547	36
Figura 53 Diagrama UML de Casos de Uso.....	39
Figura 54 Casos de Uso - Usuario	40
Figura 55 Diagramas de clase código Arduino	40

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características de operación (NXP, 2012)	13
Tabla 2 Especificaciones técnicas del Arduino Uno R4 (Arduino® UNO R4 WiFi, 2024)	16
Tabla 3 Configuración del VDF (SODECA, CONVERTIDOR DE FRECUENCIA, 2022)	34

1. RESUMEN

El sistema o cámara cerrada pretende simular la variación de presión en estructuras como fachadas, paredes y muros que puedan presentar filtraciones de agua y aire. Las presiones a las que serán sometidas van de 0 Pa a 3600 Pa.

En este trabajo se realizará el control de presurización, en el cual se variará la presión interna de la cámara mediante una compuerta y un ventilador, que se accionarán dependiendo del valor medido por los sensores. En el caso del ventilador, aumentará o disminuirá su velocidad dependiendo de la presión obtenida y la presión objetivo.

Además, se pretende seleccionar el tipo de ensayo que se quiera realizar mediante un ordenador, para lo cual se debe diseñar e implementar el conexionado de forma física y funcional.

Se realizarán distintos tipos de ensayos, los cuales seguirán las siguientes normativas:

- ISO 12865. Escalones progresivos. (AENOR, 2002)
- ISO 12155. Escalones progresivos; fachadas ligeras. (AENOR, 2000)
- ASTM E-547. Muros cortina. (International, 2000)
- ASTM E-331. Muros cortina. (International, 2016)
- AS/NZS 4284. Cyclic Pressure (Presiones cíclicas). (Standard™, 2008)
- NT BUILD 116. Presiones progresivas. (Method, 1980)
- SS 654. Muros cortina. (STANDARD, 2020)

1.1. PALABRAS CLAVE

Presión, cámara cerrada, variador de frecuencia, filtro pasa-bajos, control PID.

2. ABSTRACT

The closed system or chamber aims to simulate pressure variations in structures such as facades, walls, and partitions that may present water and air leaks. The pressures to which they will be subjected range from 0 Pa to 3600 Pa.

In this work, the pressurization control will be carried out, in which the internal pressure of the chamber will be varied by means of a damper and a fan, which will be activated depending on the value measured by the sensors. In the case of the fan, it will increase or decrease its speed depending on the pressure obtained and the target pressure.

In addition, the type of test to be performed will be selected via a computer, for which the physical and functional wiring must be designed and implemented.

Various types of tests will be conducted, following these standards:

- ISO 12865. Progressive steps.
- ISO 12155. Progressive steps; light facades.
- ASTM E-547. Curtain walls.
- ASTM E-331. Curtain walls.
- AS/NZS 4284. Cyclic Pressure.
- NT BUILD 116. Progressive pressures
- SS 654. Curtain walls.

2.1. KEY WORDS

Pressure, closed chamber, variable frequency drive, low-pass filter, PID control

3. INTRODUCCIÓN

Con este TFG se pretende realizar ensayos de presión dentro de una cámara cerrada, la cual cuenta con una parte móvil de cinco caras, la cual se acopla a una sexta que es el muro o pared donde se realiza el ensayo de esta forma generando una cámara cerrada, la idea de este TFG viene propuesta por un profesor de la UNIZAR el cual está trabajando en un proyecto sobre ensayos de estanqueidad, se presentó la necesidad de realizar el control de la presión interna de estos ensayos, tanto el control del suministro de presión, como el monitoreo de este, siendo el de realizar tanto el hardware como el software de para el funcionamiento del proyecto.

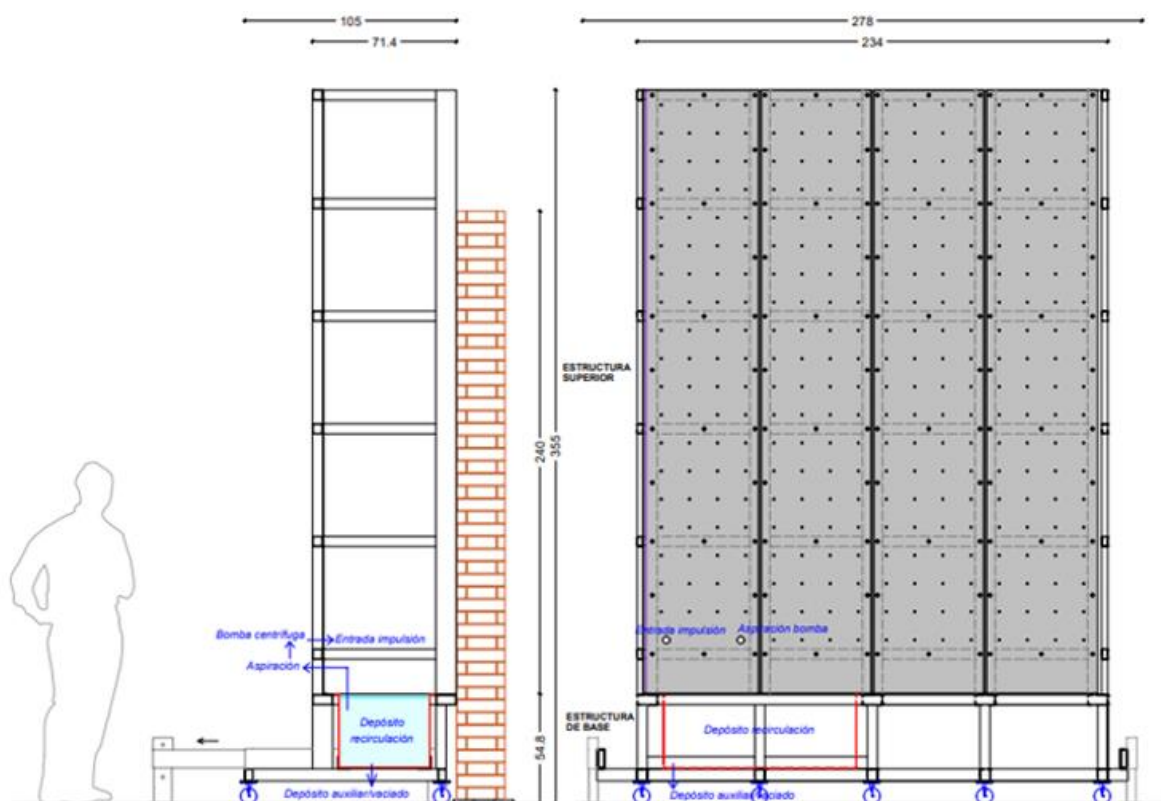


Figura 1 Estructura de la cámara cerrada

Los pasos en los que se ha centrado este TFG para conseguir el funcionamiento de la presurización de la cámara son los siguientes:

- **Estudio del variador de frecuencias:** Se realizó un estudio detallado del funcionamiento del variador de frecuencia y se implementó un relé para su activación. El control del variador se realiza mediante un potenciómetro físico o una señal de control generada por un microcontrolador, utilizando una señal PWM filtrada para transformarla de digital a analógica y evitar daños en el variador de frecuencia.
- **Pruebas con el sensor de presión:** Se recreo el circuito de filtrado para el sensor de presión, con el fin de mitigar las perturbaciones externas y obtener valores precisos. Se utilizaron equipos, como un medidor de presión diferencial, para validar los datos obtenidos.
- **Diseño del sistema de retroalimentación:** Se desarrollo un controlador del tipo PD basado en los datos obtenidos con la cámara cerrada. Se realizaron las pruebas necesarias para controlar la variación de presiones y los ensayos previstos.

- **Implementación de filtros digitales:** En el código de programación, se añadieron filtros digitales para mitigar el ruido en la señal del sensor.
- **Montaje del circuito:** Se montó el circuito de forma manual utilizando un par de protoboard, un Arduino Uno WiFi R4, un relé compatible con Arduino, un filtro pasa bajos para la señal PWM y un circuito de filtrado para la señal de presión. La alimentación del sensor se separó de la del microcontrolador y el filtro pasa bajos para evitar interferencias.
- **Diseño de la placa de circuito integrado:** Se diseñó una placa de circuito integrado que integra todos los componentes en un mismo circuito. La placa incluye tres relés, un ESP32 para el control y filtros para cada sensor de presión, con capacidad de tener al menos tres sensores de presión.
- **Optimización del cableado:** Como se puede observar en la imagen, las conexiones se realizan con cables específicos para placas, los cuales pueden producir ruido en los sensores. Con la implementación de la PCB, se pretende mitigar este problema eliminando los cables. Para la alimentación de los sensores, una vez instalada la placa, se planea usar un cable apantallado para reducir aún más el ruido generado, mejorando así la estabilidad del sistema.

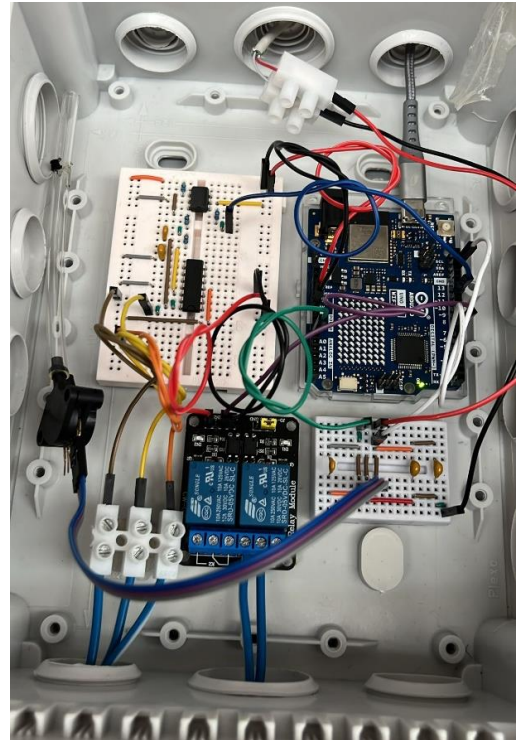


Figura 2 Circuito de pruebas

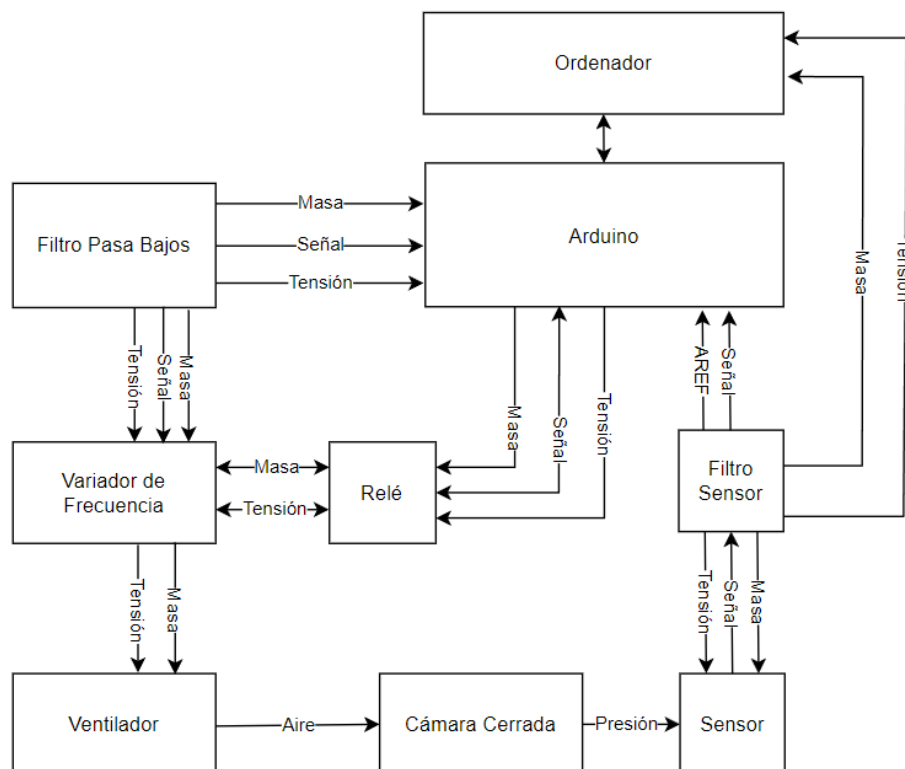


Figura 3 LayOut Conexión del Circuito en físico

4. ANTECEDENTES

4.1.1. Control digital de luminosidad de una estancia usando Arduino

En este control se hace uso de un Arduino para el control del nivel de iluminación de un LED, el cual se regula de forma automática teniendo en cuenta la información de luminosidad obtenida de un LDR. En este proyecto se consideraron las perturbaciones que pueden interferir en el diseño.

Los ensayos y las pruebas se realizan en una cámara cerrada. Para que el control sea eficiente, se hace uso de un controlador PID, con el cual se puede regular la luminosidad de forma precisa independientemente de las condiciones o perturbaciones existentes. Además, se aplican funciones para mitigar los ruidos en el sistema y hacer que el sistema sea eficiente.

Para este proyecto se calcula un controlador PID y se utiliza como sistema de control y programación un Arduino Uno. Al hacer uso de un PID con acción integral, que puede acumular muchos errores, se agrega el efecto Anti-Windup, el cual evita que la acción integral produzca retrasos en el sistema.

Se realiza un estudio y análisis experimental de los resultados, teniendo como objetivo su uso en docencia para mostrar la saturación del sistema y observar el efecto Anti-Windup, además de permitir la modificación de la consigna deseada y el diseño del controlador PID. (Fuente, 2024)

4.1.2. Diseño y construcción de un robot auto balanceado mediante Arduino

Este proyecto pretende construir un robot que pueda mantenerse balanceado de forma automática, tomando en cuenta el principio de funcionamiento del péndulo invertido, siendo este un péndulo en el cual el centro de masa se encuentra por encima de su punto de pivotaje. La idea principal de este proyecto es que el sistema mantenga el equilibrio sin que los efectos adversos de su entorno lo afecten.

Para realizar la medición de la inclinación del robot, se hace uso de un acelerómetro y un giroscopio. Para el control, se emplea un controlador PID, de modo que el robot genere una acción correctiva en caso de que detecte alguna inclinación, y pueda rectificar al estado predeterminado configurado. (Moisés & Ausejo, 2017)

4.1.3. Modelado y diseño de control de trayectoria de un vehículo mediante Arduino.

Con este proyecto se buscó la forma de controlar de manera eficiente la velocidad de cuatro motores de un vehículo, utilizando un controlador, en concreto un Arduino Mega 2560. El objetivo de este proyecto es que el vehículo pueda mantener una distancia de seguridad respecto a un obstáculo. Para esto, se crea un regulador PID que se programa en el Arduino.

Como sensor de retroalimentación del sistema de control, se utiliza un sensor de ultrasonidos para la medición de distancias. En caso de encontrarse con un objeto, el controlador actúa sobre el error y puede llegar a modificar la trayectoria establecida para evitar dicho objeto. (Antoneac, 2020)

4.1.4. Desarrollo e implementación de un invernadero inteligente controlado con Arduino

El objetivo de este proyecto es la monitorización de las temperaturas, tanto interior como exterior, de un invernadero. Además, se mide la humedad del suelo, la luminosidad y el nivel del agua. También se realiza el control de bombillas, ventiladores y bomba de agua. Todo este control será realizado mediante un Arduino, el cual recibe información de los sensores y, a través de la

comunicación con el puerto serie, ejecuta un programa de control en Java para que el usuario pueda interactuar con el sistema, activando o desactivando los actuadores. (Torres, 2019)

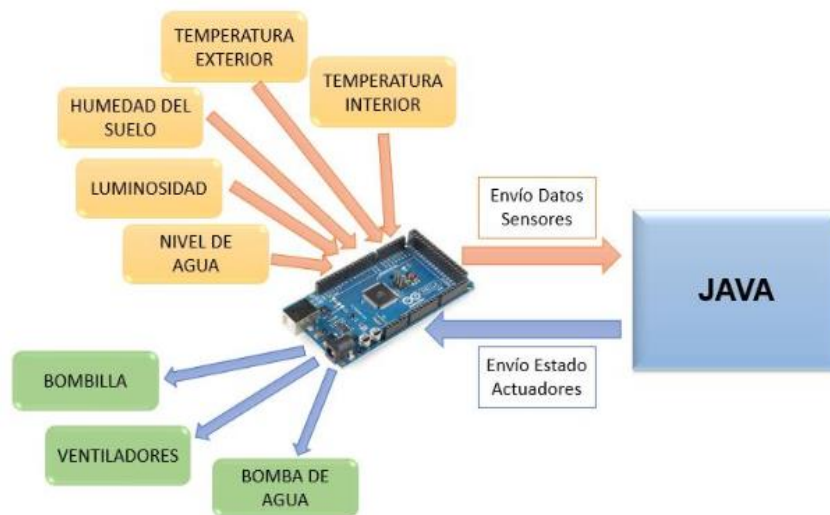


Figura 4 Sistema de funcionamiento del proyecto (Torres, 2019)

En este caso, a diferencia de los antecedentes consultados, se hace uso de la librería incluida en el IDE de Arduino, la librería PID_v1.h. En los proyectos anteriores, los valores y funciones de transferencia se calculan teniendo en cuenta el funcionamiento y los datos de los sistemas para el modelado de dichas funciones. En este proyecto vamos a calcular la función de transferencia de nuestro sistema en lugar de usar la librería. Sin embargo, es importante puntualizar que también existen otros métodos para obtener controladores del tipo PID.

4.1.5. arMedidor de nivel de agua por presión con Arduino



Figura 5 Medidor de nivel de agua por presión (educación, 2024)

En este proyecto se mide el nivel del agua en un tanque, utilizando un sensor de presión MPX5010DP. En este caso, se hace uso de un Arduino, aunque se puede utilizar cualquier microcontrolador. Uno de los puntos abordados en el proyecto es realizar un medidor de presión económico.

En este proyecto se mide la presión hidrostática para determinar la presión interna de un tanque. Al ser un ensayo con líquidos, se añade un tubo para generar un colchón de aire y evitar el contacto del líquido con el sensor.

Además de este proyecto, se realiza otro con el mismo sensor de presión, en el cual se usa el sensor para determinar la altura del nivel del agua en el interior de un tanque esférico. En el esquema de conexión, se añaden dos drivers de potencia controlados por una señal PWM. (educación, 2024)

4.1.6. Automatización de un túnel de viento para estudios de comportamiento de vuelo de insectos

El objetivo de este proyecto es construir un túnel de viento a escala.

El proyecto se centra en el control de la velocidad del viento y de la temperatura, de modo que se puedan capturar datos y videos dentro del túnel, registrando los datos de forma simultánea. Además, se desarrolla una interfaz de software para el control desde un ordenador.

El control de la temperatura se realiza mediante un sistema de encendido/apagado (on/off) y mediante señales PWM para el control periódico de la señal, tanto para la velocidad del viento como para la temperatura.

El control se llevó a cabo mediante un Arduino Mega. Sin embargo, las simulaciones, la captura de datos y videos se realizaron por medio del software LabVIEW. (Urquijo, 2016)

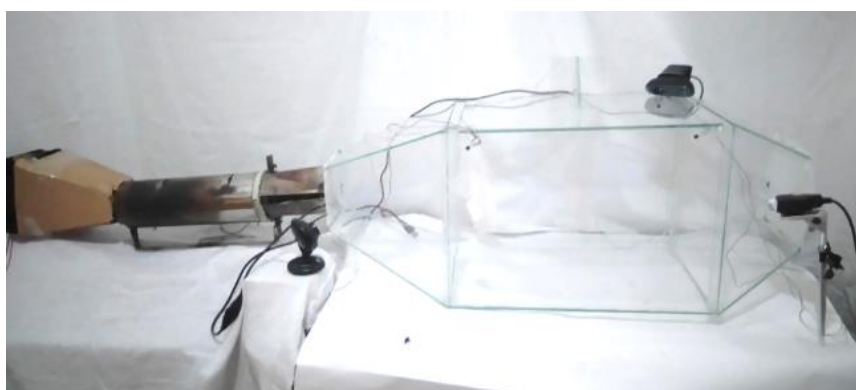


Figura 6 Prototipo Túnel de viento (Urquijo, 2016)

4.1.7. Proyecto de levitación en túnel de viento con control PID sobre Arduino

El proyecto consiste en un cilindro vertical que cuenta con un ventilador de corriente continua en un extremo y un sensor de ultrasonido en el otro extremo. El objetivo es mantener un objeto liviano en una posición fija dentro del cilindro mediante la variación de la velocidad del ventilador, controlando la posición con un controlador PID programado en Arduino.

Para lograr esto, se utilizan los siguientes componentes:

- Una placa Arduino Uno
- Un cilindro de acetato para el túnel de viento
- Un sensor ultrasónico
- Un motor DC, controlado por una señal PWM desde el Arduino
- Un ventilador
- Otros componentes necesarios para el montaje

El sensor ultrasónico mide continuamente la distancia entre el objeto y el sensor. El Arduino utiliza un algoritmo PID (Proporcional-Integral-Derivativo) para ajustar la velocidad del ventilador en función de la posición medida. Si el objeto sube demasiado, el ventilador desacelera; si baja, el ventilador acelera, manteniendo así el objeto en una posición fija. (Pavlov, 2018)

5. DESARROLLO

5.1. MARCO TEÓRICO

El hardware del sistema consta de los siguientes componentes:

- Variador de frecuencia
- Sensores de presión
- Ventilador
- Arduino Uno R4 Wifi
- Placa de circuito impreso
 - o Módulo ESP32
 - o Relé
 - o Filtro pasa bajos
 - o Filtro sensor de presión

El software del sistema consta de:

- Programación en IDE de Arduino
- Controlador de retroalimentación PD
- Filtro Digital de Media Móvil
- Filtro Digital EMA

5.1.1. Variador de frecuencia

Los variadores o convertidores de frecuencia se definen como sistemas intermedios entre la fuente de alimentación y los motores eléctricos, actuando como fuente de alimentación de estos. Modifican la velocidad de un motor dentro de un rango establecido. Su funcionamiento se basa en ajustar el par y la velocidad del motor a nuestras necesidades. Se encargan de convertir la corriente alterna en corriente continua mediante la modulación del ancho de pulso (S&P, 2020) (AutoSolar, 2024). En resumen, se encargan de modular la corriente eléctrica suministrada al motor que está conectado a dicho variador.

Existen tres tipos de variadores de frecuencia más comunes:

- **Rectificador controlado:** Este tipo de variador suministra corriente continua al motor a partir de una corriente alterna, ya sea monofásica o trifásica, controlando el valor medio de la tensión.
- **Convertidor de frecuencia:** Los convertidores de frecuencia suministran tensión alterna a partir de corriente alterna monofásica o trifásica fija. Se usan principalmente en motores asíncronos de jaula de ardilla.
- **Regulador de tensión:** Al igual que el anterior, este tipo de variador suministra corriente alterna desde una red alterna monofásica o trifásica, manteniendo la misma frecuencia y controlando la tensión de forma eficaz. Se suele usar como arrancador progresivo de motores asíncronos de jaula que no requieran un elevado par de arranque. También se puede usar para motores asíncronos con resistencias rotóricas o motores de anillos.

Los variadores de frecuencia se usan para:

- **Controlar la aceleración del motor:** También llamada rampa de aceleración lineal, esta rampa es regulable y variable con el tiempo.
- **Variar la velocidad:** Con un regulador, la velocidad no es constante en el tiempo; varía. Este sistema se puede denominar un sistema de lazo abierto. La velocidad varía dependiendo de una

velocidad de referencia, por lo que puede cambiar dependiendo de las perturbaciones a las que esté sometida.

- **Regular la velocidad:** Se establece una velocidad deseada, y el variador de frecuencia realiza el seguimiento de esta velocidad y busca mantenerla en el tiempo, teniendo en cuenta las perturbaciones, creando un sistema de control de lazo cerrado. Necesita un generador de impulsos, el cual detecta desviaciones de la velocidad y modifica la velocidad para llevarla a la deseada, mitigando así las perturbaciones en la velocidad del motor.

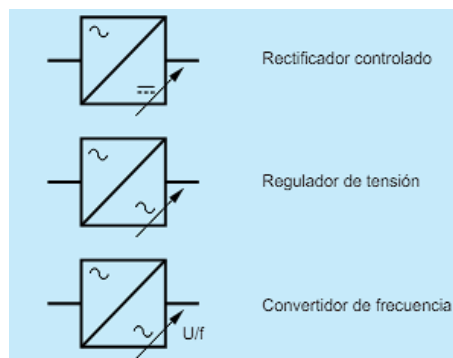


Figura 7 Símbolos de los tipos de variadores de frecuencia (Electric, 1999)

- **Controlar la deceleración:** Cuando se detiene el suministro de energía a un motor, la deceleración depende del par resistente. El variador de frecuencia permite generar una deceleración con una rampa lineal controlada, siempre teniendo en cuenta la deceleración natural del motor.
- **Invertir el sentido de giro del motor:** Se puede cambiar el sentido de giro del motor controlado con el variador de frecuencia, con o sin frenado eléctrico. De esta forma, tanto la deceleración como la inversión del sentido son rápidas.

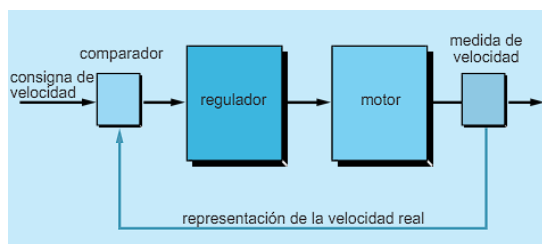


Figura 8 Regulador de velocidad (Electric, 1999)

Actualmente, los variadores de frecuencia cuentan con protección integrada. Una de ellas es la protección térmica tanto del variador como del motor conectado a él. En caso de sobrecalentamiento, y dependiendo del modelo de variador, puede generar una señal de alarma o producir un fallo. Además, cuentan con protecciones en caso de cortocircuitos, sobretensiones, desequilibrios de fases, etc. (Electric, 1999)

5.1.1.1. Ventajas de un variador de frecuencia

- Cuentan con una eficiencia del 98%, además de que algunos modelos tienen la capacidad de ajustar el consumo de potencia cuando están en marcha, lo que genera un ahorro de energía.
- No es necesario realizarles mantenimiento, o este es mínimo, ya que reducen el desgaste del motor al que están conectados. Además, cuentan con sistemas de protección que evitan daños en el sistema.
- Evitan el sobrecalentamiento de los motores.
- Ajustan la velocidad del motor de forma precisa, así como los tiempos de arranque y paro.
- Cuentan con distintos modos de control: Ethernet, ControlNet, Profibus, ModBus, etc. (Automation, 2014)

5.1.1.2. Desventajas de un variador de frecuencia

- Puede producir interferencias en la red eléctrica.
- Precio elevado.
- En caso de avería, no se puede arreglar in situ, por lo que el sistema no funcionaría. (Variadores de Frecuencia. Ventajas y Desventajas, 2023)

5.1.1.3. Variador de Frecuencia SODECA

El variador de frecuencia usado en este proyecto es un VDF de SODECA, específicamente el modelo VSD3/A-RFT, el cual es un variador de velocidad usado para motores de corriente alterna. Este variador o convertidor varía la velocidad de un motor mediante tensión y frecuencia, y suele ser usado en ventiladores helicoidales y centrífugos con motores trifásicos asíncronos.

Este modelo necesita alimentación trifásica, que va de 380-480V y de 50 a 60 Hz. Cuenta con puertos para habilitar y deshabilitar el variador, además de una entrada de 10V para controlar la velocidad de funcionamiento. También cuenta con una conexión ModBus RTU disponible para su programación. (Ejemplos de grados de protección IP comunes como IP65 e IP66, 2024)). (SODECA, VSD3/A-RFT - VSD1/A-RFM, 2024)

El variador de frecuencia VSD3/A-RFT, que es el variador específico, puede llegar a controlar motores de corriente alterna trifásicos de hasta una potencia de 3 kW y con una alimentación trifásica de 380-480V, operando a frecuencias de entre 50 y 60 Hz.

Puede controlar:

- Motores trifásicos asíncronos: Son los motores más comunes para los que se usa. También conocidos como motores de inducción, se utilizan por su robustez y eficiencia.
- Motores de jaula de ardilla: Este tipo de motor se usa cuando se requiere durabilidad y bajo mantenimiento, como en ventiladores helicoidales y centrífugos. (SODECA, VSD3/A-RFT - VSD1/A-RFM, 2024)

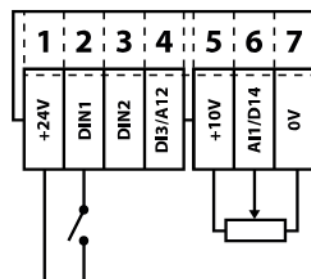
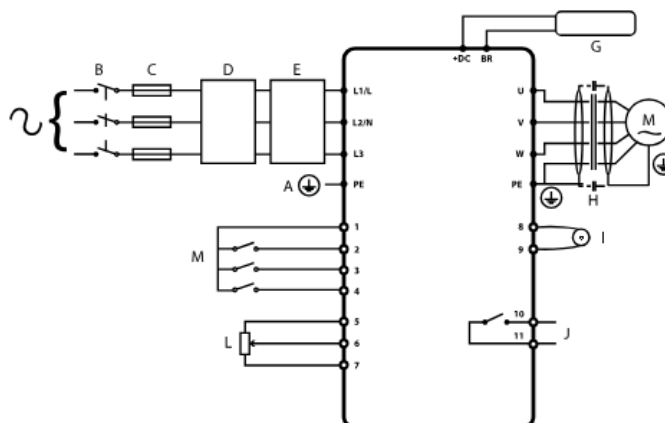


Figura 9 Conexionado Básico (SODECA, CONVERTIDOR DE FRECUENCIA, 2022)



Clave		Sec.	Página	Clave		Sec.	Página
A	Conexión de protección a tierra (PE)	4.2	48	G	Resistencia de frenado opcional	4.10	52
B	Conexión de la alimentación de entrada	4.3	49	H	Conexión del motor		
C	Selección del fusible/magnetotermico	4.3.2	49	I	Salida analógica	4.7.1	125
D	Inductancia de entrada opcional	4.3.3	49	J	Salida de relé auxiliar	4.7.2	51
E	Filtro CEM externo opcional	4.10	52	L	Entrada analógica	4.7.3	51
F	Desconexión interna / Aislador	4.3	49	M	Entradas digitales	4.7.4	51

Figura 10 Diagrama de conexiones (SODECA, CONVERTIDOR DE FRECUENCIA, 2022)

5.1.2. Sensores

Los sensores se definen como dispositivos que crean una señal de salida capaz de medir (y/o almacenar) los valores de un fenómeno físico (ubicua, 2024) (Control, 2024) . De esta forma los valores físicos que no son percibidos por los sentidos se puedan medir.

Se puede definir el sensor como transductor de entrada, ya que obtienen la información requerida. De forma general se debe acondicionar/calibrar el sensor antes de la aplicación final.

5.1.2.1. Tipos de sensores

Los sensores se pueden clasificar de la siguiente manera:

Según el aporte de energía:

- **Sensores modulares (o activos):** La señal de salida proviene de energía auxiliar.
- **Sensores generadores (o pasivos):** La energía de salida es la proporcionada por la entrada.

Según la señal de salida:

- **Sensores analógicos:** La señal de salida varía de forma continua y macroscópica.
- **Sensores digitales:** La señal varía en saltos o pasos discretos. No es necesario convertir la señal de analógica a digital, cuentan con mayor fidelidad y son más confiables y exactos. Sin embargo, no hay sensores digitales para todas las magnitudes físicas a medir.

Según el modo de funcionamiento:

- **Sensores de deflexión:** La magnitud que se mide con este tipo de sensores produce algún efecto físico. Un ejemplo de sensor de deflexión es el dinamómetro para medir fuerzas, que consta de un muelle que recupera su forma después de medir la magnitud, proporcional a la longitud del muelle que iguala a la fuerza aplicada.
- **Sensores de comparación:** Este tipo de sensor intenta mantener la deflexión nula. Cuenta con un detector de desequilibrio y otro sistema para restablecerlo. Un ejemplo puede ser una balanza manual. Estos sensores suelen ser más exactos y se pueden calibrar con un patrón o magnitud de referencia.

5.1.2.2. Características de los sensores

Los sensores cuentan con características estáticas que pueden depender del fabricante, del tipo de magnitud a medir, entre otros factores. Estos valores se pueden encontrar en las hojas de datos (DataSheets) de los sensores. Estas características estáticas influyen en las características dinámicas de los sensores.

Los sensores tienen las siguientes características:

- **Sensibilidad:** Se define como la relación entre la variación de salida y la variación de entrada.
- **Resolución:** El cambio de valor detectable, el incremento más pequeño que es capaz de medir el sensor.
- **Umbral:** El valor mínimo que puede llegar a detectar el sensor.
- **Fidelidad:** Se define como la capacidad del sensor de proporcionar valores medidos que son similares o iguales a los valores reales.
- **Exactitud:** Es la diferencia entre el valor medido y el valor real, medida en porcentaje. Este factor indica la aproximación del valor medido por el sensor al valor real. La exactitud del sensor se

obtiene por medio de calibración estática. El valor de la exactitud debe ser al menos diez veces mayor que el sensor calibrado

- Repetibilidad: Se define como la capacidad de obtener valores muy similares cuando se realizan mediciones en intervalos cortos de tiempo. Es la capacidad del sensor para dar el mismo valor repetidamente bajo las mismas condiciones. Normalmente, se espera que la diferencia entre los valores obtenidos sea muy pequeña en el 95% de los casos, lo que indica que las mediciones realizadas por los sensores son muy consistentes.
- Reproducibilidad: Se refiere a la capacidad de reproducir el mismo valor medido de forma individual por el sensor, pero en condiciones similares y/o diferentes a lo largo del tiempo. Una reproducibilidad exacta asegura consistencia en las mediciones. (Areny, 2024)

5.1.2.3. Sensor de presión

Los sensores de presión (o transductores de presión) que transforman *la fuerza por unidad de superficie* en una tensión equivalente a la presión dada, por lo que son sensores que miden la magnitud de presión y nos proporcionan información continua de la presión medida. (Sensores de medida, 2024)

Existen distintos tipos de sensores de presión, incluyendo:

- Sensores de presión para agua
- Sensores de presión para aceite
- Sensores de presión de líquido de frenos
- Entre otros.

5.1.2.4. Sensor MPX5010DP

Se trata de un sensor de presión diferencial de silicio con acondicionamiento de señal. Estos sensores están diseñados para usarse con microcontroladores o microprocesadores que cuenten con entradas analógicas/digitales. Este sensor utiliza técnicas integradas de micro maquinado, metalización de película delgada y procesamiento bipolar, lo que proporciona una señal analógica precisa que es proporcional a la presión aplicada. Cuenta con dos puertos para conectar tubos para su uso en aplicaciones industriales. (NXP, 2012)

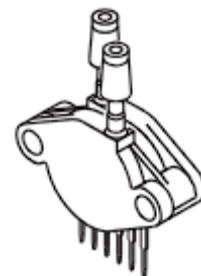


Figura 11 MPX5010DP
(NXP, 2012)

El sensor cuenta con las siguientes características:

- Tolerancia del 5%, con un rango de temperatura de uso entre 0° y 85°.
- Puede configurarse de manera diferencial o manométrica.
- Puede montarse en superficies (SMT) o mediante orificios (DIP).

Se pueden usar en:

- Calefacción, ventiladores, aire acondicionado
- Sistemas respiratorios.
- Medición del nivel del agua, por ejemplo, en lavadoras.
- Aplicaciones con microcontroladores.
- Líquido y presión en electrodomésticos.

El sensor cuenta con las siguientes características de operación:

Característica	Símbolo	Mínimo	Típico	Máximo	Unidad
Rango de presiones	P _{OP}	0	--	10	KPa
Tensión de alimentación	V _S	4.75	5.0	5.25	Vdc
Corriente de alimentación	I _O	--	5.0	10	mAdc
Precisión	--	--	--	±0.5	%V _{FF}
Sensibilidad	V/P	--	450	--	mV/mm
Tiempo de respuesta	t _R	--	1.0	--	ms

Tabla 1 Características de operación (NXP, 2012)

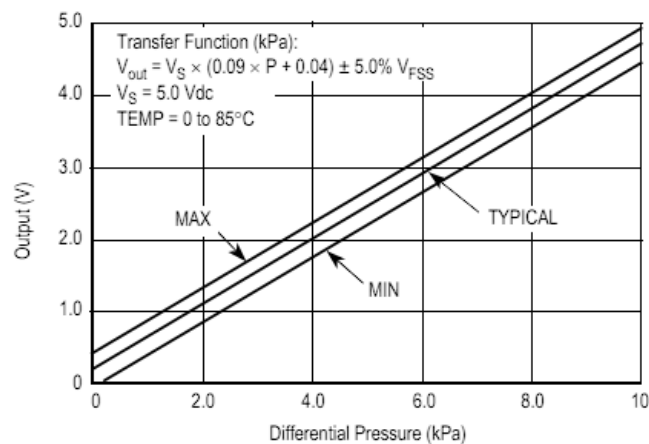


Figura 12 Salida vs Presión diferencial del ensayo del fabricante (NXP, 2012)

La Función de transferencia con la que cuenta es: (NXP, 2012)

$$V_{out} = V_s * (0.09 * P + 0.04) \pm (\text{error de presión} * \text{factor de temperatura} * 0.09 * V_s)$$

$$V_s = 5.0V \pm 0.25 V_{dc}$$

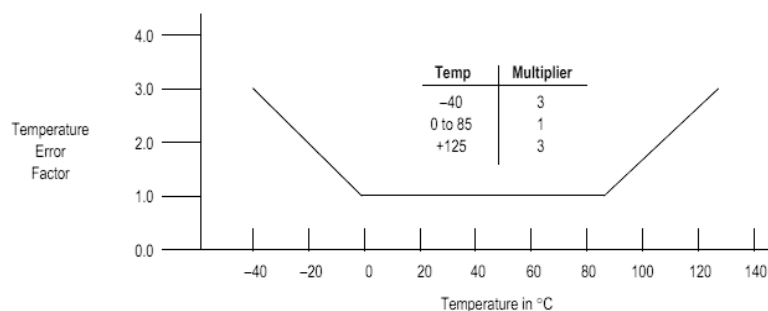


Figura 13 Banda de error de temperatura (NXP, 2012)

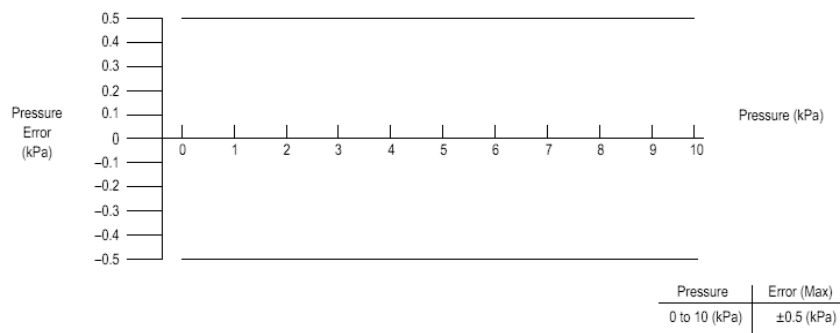


Figura 15 Banda de error de presión (NXP, 2012)

Además de la función de transferencia, el fabricante recomienda el uso de un filtro para la alimentación del sensor y un filtro para la salida, además de una fuente externa diferente a la alimentación del microcontrolador, en este proyecto se añade dicho circuito. (NXP, 2012)

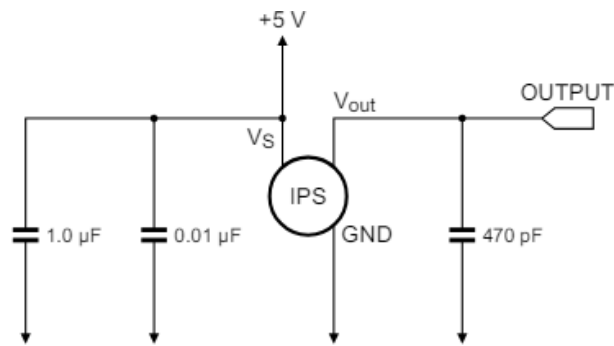


Figura 14 Circuito de filtrado de la señal de salida y la fuente de alimentación del sensor MPX5010DP (NXP, 2012)

5.1.3. Ventiladores

Los ventiladores se pueden clasificar según:

- **La presión total desarrollada:** Depende de la variación de presión total dada por el ventilador. Se pueden dividir en:
 - **Ventiladores de baja presión:** Cuando la variación de presión es menor a 10 mbar.
 - **Ventiladores de presión media:** Cuando la variación de presión está entre 10 y 30 mbar.
 - **Ventiladores de alta presión:** Cuando la variación de presión está entre 30 y 100 mbar.
- La dirección del flujo a la salida del rodete:
 - **Ventiladores centrífugos:** El flujo de aire sale en dirección perpendicular al eje de rotación.
 - **Ventiladores axiales:** El flujo de aire sale en la misma dirección del eje de rotación (Marcos, 2009)

5.1.3.1. Ventiladores centrífugos

Los ventiladores centrífugos impulsan el aire por medio de una turbina o rodete, el cual aspira el aire por el centro y lo expulsa mediante álabes o palas. El aire entra de forma paralela al eje y sale de forma perpendicular.

Por la definición anterior, el ventilador debe tener el conducto de aspiración y descarga a 90 grados, lo que hace que no sean adecuados para su montaje en conducciones en línea. Sin embargo, existen ventiladores "in-line", donde el aire entra en la misma dirección en la que sale, y estos cuentan con los elementos necesarios ya integrados.

Existen tres tipos de ventiladores centrífugos:

- De pala radial: En este tipo, las palas del rodete son rectas y alineadas según el radio. No son muy usados ya que no son eficientes y producen más ruido que los otros tipos. Son aptos para lugares polvorientos, ya que los álabes, al ser rectos, no retienen polvo o suciedad.
- De álabes adelantado (forward): Cuentan con álabes con un ancho pequeño, suelen tener forma de "media caña" o "jaula de ardilla". Suelen suministrar más caudal pero poca presión. Al igual que el ventilador anterior, no es eficiente. Se suelen usar en ventiladores pequeños y en aparatos domésticos, ya que el ruido que producen suele ser tolerable.
- De pala atrasada (backward): Este tipo de ventilador cuenta con rodetes con palas curvadas que van en sentido contrario al giro del rodete. Son los más usados entre los centrífugos, ya que manejan potencias altas y son eficientes. Al igual que los de pala radial, son limpios y las palas no acumulan polvo.

Los ventiladores centrífugos se pueden usar en la renovación del aire en casas, locales, en tratamiento de aire, y en la circulación de este en hornos, secadores, etc. (SolerPalau, 2017)

5.1.3.2. Ventilador Centrifugo SODECA

El ventilador utilizado en este proyecto es el ventilador centrífugo SODECA modelo CAS-S-254-2T-3 IE3. Se trata de un ventilador centrífugo de alta presión, compuesto de chapa de acero. Cuenta con un perfil atenuador hexagonal incorporado en la boca de aspiración del ventilador, cuyo diseño permite modificar el caudal del aire.

Este ventilador está equipado con un motor con eficiencia IE3 para potencias iguales o mayores a 0.75 kW. La clase IE3 se refiere a la eficiencia de los motores eléctricos trifásicos y es el estándar más alto en la actualidad, con una eficiencia entre el 85% y el 90%. Esto indica que, por cada 100 vatios de electricidad en el motor, este consume únicamente 85 a 90 vatios de potencia para el giro del motor, mientras que el resto de la energía se disipa como calor (Motores Eléctricos Trifásicos: Estándares de Eficiencia de IE1 a IE5, 2024)

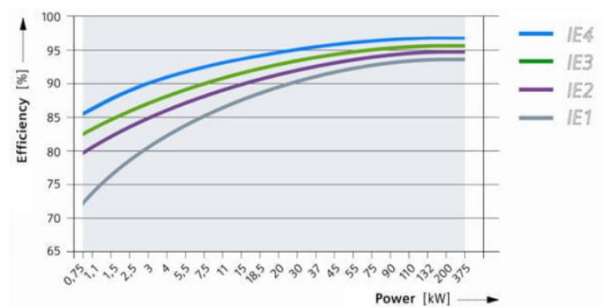


Figura 16 Gráfico de eficiencia de motores eléctricos trifásicos (Motores Eléctricos Trifásicos: Estándares de Eficiencia de IE1 a IE5, 2024)



Figura 17 CAS-S-254-2T-3 IE3 (Corefluid, 2024)

El ventilador puede transportar aire con una temperatura entre -20°C y $+120^{\circ}\text{C}$. Además, cuenta con un acabado anticorrosivo en resina de poliéster. (Corefluid, 2024)

5.1.3.3. Arduino Uno R4 Wifi

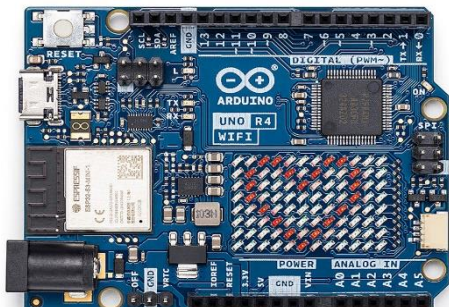


Figura 18 Placa de Arduino Uno R4 Wifi
(Arduino® UNO R4 WiFi, 2024)

El Arduino Uno R4 WiFi es la última revisión de la gama Uno de Arduino. A diferencia de sus predecesores, no cuenta con un microprocesador ATMEGA, sino con un microprocesador RA4M1 de Renesas y un ESP32-S3. Sin embargo, este último no se usa como sistema de control, sino como un sistema integrado que proporciona capacidades de conexión WiFi y Bluetooth al Arduino Uno R4, de ahí el complemento "WiFi" en su nombre. Existe otra versión que no cuenta con este componente, llamada Arduino Uno R4 Mínima. (Arduino® UNO R4 WiFi, 2024)

Una de las características más visibles de esta placa es la matriz de LEDs, aunque no es importante para las pruebas de este proyecto. Otra diferencia marcada del Arduino Uno R4 respecto a la versión anterior es la resolución. Este Arduino cuenta con una resolución variable entre 8 y 14 bits, mientras que la revisión R3 tiene una resolución de 8 bits. Esto es significativo para las pruebas de este proyecto, ya que se tuvo en cuenta las características de la versión R4 para su programación. En el proyecto se decidió usar una resolución de 12 bits, lo que afecta tanto a la programación como al diseño del controlador PD.

Especificaciones técnicas de interés:

Board	Name	Arduino® UNO R4 WiFi
Microcontroller	Renesas RA4M1 (Arm® Cortex®-M4)	
USB	USB-C®	Programming Port
Pins	Digital I/O Pins	14
Pins	Analog input pins	6
	DAC	1
	PWM pins	6
Communication	UART	Yes, 1x
	I2C	Yes, 1x
	SPI	Yes, 1x
	CAN	Yes 1 CAN Bus
Power	Circuit operating voltage	5 V (ESP32-S3 is 3.3 V)
	Input voltage (VIN)	6-24 V
	DC Current per I/O Pin	8 mA
Clock speed	Main core	48 MHz
	ESP32-S3	up to 240 MHz
Memory	RA4M1	256 kB Flash, 32 kB RAM
	ESP32-S3	384 kB ROM, 512 kB SRAM
Dimensions	Width	68.85 mm
	Length	53.34 mm

Tabla 2 Especificaciones técnicas del Arduino Uno R4 (Arduino® UNO R4 WiFi, 2024)

5.1.4. Placa de circuito impreso

Para este proyecto se decidió hacer una placa de circuito impreso para mayor fiabilidad del circuito. Este circuito constará de la combinación de los siguientes componentes: una estructura de hardware que incluirá un microcontrolador ESP32, relés para el encendido y apagado del sistema, y el control del actuador para el escape del aire. Se añaden más de dos relés en caso de ser necesarios en el futuro.

Además, se incluye un circuito pasa bajos para filtrar la señal PWM que envía el microcontrolador al variador, asegurando así el funcionamiento seguro del variador al recibir una señal PWM filtrada. También se incluye un filtro para cada sensor de presión para evitar perturbaciones al tomar valores. Se realiza más de un filtro para los sensores de presión, ya que en el futuro se pretende añadir más de un sensor de presión, siendo la presión final resultante la media de dos sensores o más.

5.1.4.1. ESP32

El ESP32 es un módulo que suele funcionar como un dispositivo WiFi/Bluetooth todo en uno. Este módulo no solo proporciona conectividad inalámbrica, sino que también puede funcionar como un procesador integrado con interfaces para conectarse a varios periféricos. Cuenta con dos núcleos de procesamiento cuya frecuencia operativa puede controlarse de forma independiente, variando entre 80 MHz y 240 MHz.

El ESP32 puede conectarse a una variedad de interfaces externas, tales como SPI, I2C, UART, Ethernet, tarjetas SD e interfaces táctiles y capacitivas.

Existen varios tipos de módulos ESP32, cada uno adecuado para diferentes necesidades de los desarrolladores. El más común es el ESP32-WROOM-32D, que opera a una frecuencia de hasta 240 MHz. Este módulo cuenta con 4 MBytes de memoria flash y 38 pines dispuestos de manera que minimizan el tamaño del módulo, dándole una forma casi cuadrada.



Figura 19 Módulo ESP32 (Benigno, 2020)

Una de las ventajas del ESP32 es su compatibilidad con múltiples plataformas de desarrollo, incluyendo el popular IDE de Arduino. Esto es especialmente útil ya que el proyecto en cuestión fue desarrollado utilizando dicho entorno. (Benigno, 2020)

5.1.4.2. Relé

Se refiere a un aparato eléctrico cuya función es similar a la de un interruptor, abriendo y cerrando la corriente eléctrica, esta acción la realiza mediante un electroimán integrado, por ello se les denomina relés electromagnéticos o relevadores.

Los relés sirven para activar y desactivar un circuito, estos suelen tener un consumo de electricidad considerable y se activan con una pequeña tensión, la cual puede estar entre los 12V a 24V.

De forma común cuenta con un contacto abierto (NO) y otro cerrado (NC), al suministrar energía se genera un campo magnético en la bobina haciendo que el electroimán cambie la posición de los contactos. El contacto que se mueve para esta acción es el común (C). (Volltone, 2024)

Existen varios tipos de relés:

- **Relés electromecánicos:** hay dos tipos de relés electromecánicos según su modo de activación, puede ser:
 - o De tipo armadura
 - o De núcleo móvil
 - o Relés reed o de lengüeta
 - o Relés polarizados
 - o Relés tripolares
- **Relés de estado sólido:** Se usan en circuitos donde es necesario el uso continuo de los relés, y donde se requieren velocidad y precisión en su funcionamiento.
- **Relés de corriente alterna.**
- **Relé temporizador o de acción retardada:** Se accionan después de un determinado tiempo, ya sea para su encendido o para su apagado.
- **Relés térmicos:** Se usan para proteger los motores contra sobrecargas. Cuentan con láminas metálicas internas que se deforman dependiendo del calor. Si el calor es alto en el motor, el relé abre el circuito y deja de pasar corriente.

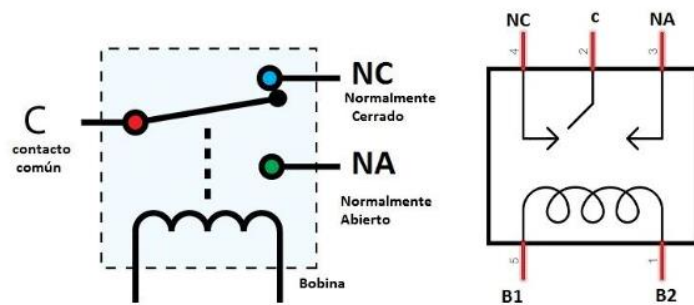


Figura 20 Diagrama del funcionamiento de un relé (Votione, 2024)



Figura 21 Relé Arduino (Tolocka, 2015)

- **Relé Arduino:** Se trata de relés que pueden ser controlados con un Arduino o un microcontrolador similar mediante señales eléctricas. Para conectar el relé al Arduino, se utiliza la alimentación de 5V del Arduino y el pin IN se conecta al pin que envía la señal para abrir (open) o cerrar (closed) el relé. De esta forma, se puede programar el control del relé mediante el Arduino para diversas aplicaciones, como el encendido de luminarias, motores, y en este proyecto, para activar el variador de frecuencia. (SEAS, 2019) Estos sensores funcionan con una alimentación de 5V a través de los pines para su funcionamiento, y el relé soporta hasta 30V en DC, siendo el variador de 24V.

5.1.4.3. Filtros: Filtros Pasa-Bajos

Los filtros se clasifican según la forma en que la tensión de salida varía en función de la frecuencia de la tensión de entrada. Existen tres tipos principales de filtros: pasa-bajos, pasa-altas y pasa-banda. En este proyecto, nos centramos en un filtro pasa-bajos.

Un filtro pasa-bajos se define como un circuito que deja pasar señales de ciertas frecuencias mientras atenúa o elimina las demás. Algunas características importantes de los filtros son la banda de paso, que es el rango de frecuencias que el filtro deja pasar con una atenuación mínima, y la frecuencia crítica o frecuencia de corte, que marca el final de la banda de paso. El filtro pasa-bajos permite el paso de frecuencias hasta la frecuencia de corte y atenúa las frecuencias superiores.

El filtro pasa-bajos más común es el filtro pasa-bajos RC, aunque también existe el modelo RL. Sin embargo, en este proyecto usaremos uno con configuración RC. La frecuencia de corte del modelo RC se calcula con la siguiente fórmula: (Floyd, 2008)

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

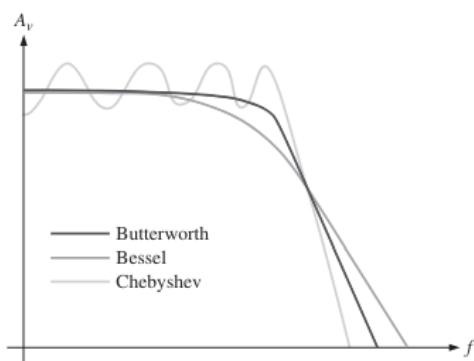


Figura 22 Curvas de configuraciones de filtros (Floyd, 2008)

Además de ser del tipo pasa-bajos, existen distintas características de respuesta de filtro, los cuales pueden ser del tipo Butterworth, Chebyshev o Bessel. Estas se diferencian en la curva de respuesta y la aplicación a la que están dirigidas.

Configuración Butterworth: Con esta configuración, se obtiene una respuesta con una amplitud plana en la banda de paso, es decir, las diferencias de frecuencias casi no varían dentro de esa banda. Pasada la banda de paso, la amplitud disminuye rápidamente. La respuesta de la fase no es lineal, lo que significa que algunas frecuencias se retrasan al pasar por el filtro, lo que puede causar picos en la salida. Este tipo de filtro se

utiliza en circuitos que necesitan mantener la misma amplitud para todas las frecuencias dentro de la banda de paso y donde se requiere una distorsión mínima de la amplitud, aunque puede haber retrasos.

Configuración Chebyshev: Esta configuración busca que la tensión de salida disminuya rápidamente fuera de la banda de paso. Esto significa que las frecuencias fuera de la banda de paso se atenúan mucho más rápido que en el filtro Butterworth. Al usar una caída más rápida, no se necesitan tantos componentes como en el filtro anterior. Sin embargo, puede haber pequeñas fluctuaciones dentro de la banda de paso, y la amplitud puede no ser constante. Además, es menos lineal que el filtro Butterworth. Este tipo de filtro se usa cuando se necesita una caída de amplitud muy rápida.

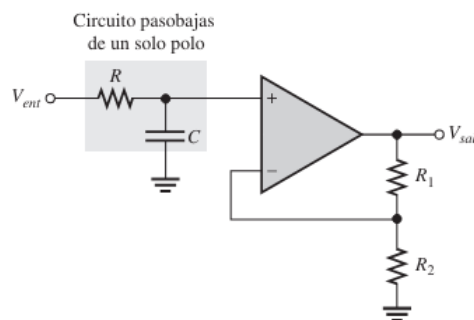


Figura 23 Filtro pasa-bajos de primer orden con realimentación (Floyd, 2008)

Configuración Bessel: Es una configuración lineal, lo que significa que la señal que pasa por el filtro tiene un retraso constante con el aumento de la frecuencia. Al ser lineal, cuenta con muy poco sobresalto, lo que indica que, en caso de aplicar pulsos al filtro, la salida no tendrá picos abruptos o distorsiones. Es ideal para ondas pulsantes con pulsos cuadrados y para mantener la señal en su forma original. (Floyd, 2008)

5.1.4.3.1. Filtro Pasa-Bajos Activos

Los filtros activos utilizan componentes como resistencias, condensadores e inductores, además de un amplificador operacional. Este amplificador puede aumentar la ganancia, evitando que la señal se debilite al pasar por el filtro. La alta impedancia a la entrada del amplificador operacional evita la carga excesiva. Con un filtro activo, es más fácil ajustar las diferentes frecuencias sin modificar la forma en que se filtran las señales.

Filtro pasa-bajos Sallen Key: El filtro pasa-bajos Sallen-Key también se conoce como fuente de tensión controlada por tensión (VCVS). Se trata de un filtro de segundo orden, lo que indica que tiene dos polos; es decir, la frecuencia pasa por dos elementos. El filtro pasa-bajos del tipo Sallen-Key deja pasar las frecuencias bajas y cuenta con una configuración doble de circuito RC en serie. En esta configuración, la frecuencia de corte es el punto desde el cual el filtro comienza a atenuar las frecuencias altas, dejando pasar las bajas. Este tipo de filtro se usa en aplicaciones de filtrado. (Floyd, 2008)

5.1.4.3.2. Optoacoplador

Un optoacoplador, también conocido como optoaislador, es un circuito compuesto por un LED infrarrojo y un fototransistor. Este circuito funciona como un interruptor aislado, permitiendo la comunicación entre dos circuitos que operan a diferentes tensiones. El LED trabaja con una tensión, mientras que el fototransistor trabaja con otra. El fototransistor se activa mediante la luz infrarroja emitida por el LED. (Floyd, 2008)

Una de las ventajas de los optoacopladores es que proporcionan aislamiento eléctrico entre la carga y el sistema de control. Esto ayuda a mitigar el ruido eléctrico que puede interferir en el funcionamiento del sistema de control. Por ejemplo, al usar un motor, su activación y desactivación pueden generar perturbaciones eléctricas. Al utilizar un optoacoplador, se aísla el sistema de control de estas perturbaciones. (Optoacoplador, que és y como funciona, 2024)

Existen varios tipos de optoacopladores:

1. Optoacoplador Transistor
2. Optoacoplador MOSFET
3. Optoacoplador TRIAC
4. Optoacoplador Transistor Darlington

En este proyecto hacemos uso de un optoacoplador con transistor Darlington.

Optoacoplador Transistor Darlington: Los optoacopladores con transistores Darlington permiten que la corriente de salida sea mayor que la de un optoacoplador normal. Una de las características importantes de los optoacopladores es el CTR (relación de transferencia de corriente), que se define como la eficiencia de acoplamiento de luz. El CTR de un Darlington es aproximadamente diez veces mayor que el de un optoacoplador normal. El modelo utilizado en este proyecto es el 4N32. (Vishay Intertechnology, 2024)

Optoacoplador 4N32: Se trata de un optoacoplador con salida foto-Darlington, con alta ganancia y con conexión a la base. El modelo 4N32 es un aislador acoplado ópticamente con un LED infrarrojo, el cual está fabricado a base de arseniuro de galio y sensor foto-Darlington de silicio. Se pueden usar como relés de lengüeta y/o mercurio, lo que garantiza una vida larga. Cuentan con una alta velocidad de conmutación y eliminan los campos magnéticos. (Vishay Intertechnology, 2024)

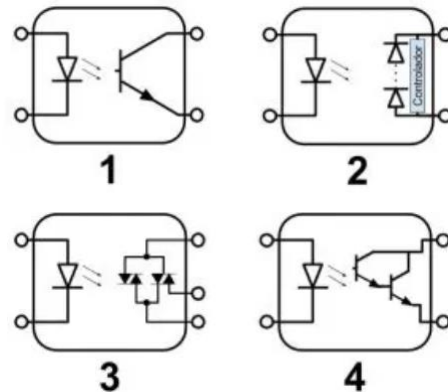


Figura 24 Tipos de Optoacopladores
(Optoacoplador, que és y como funciona, 2024)

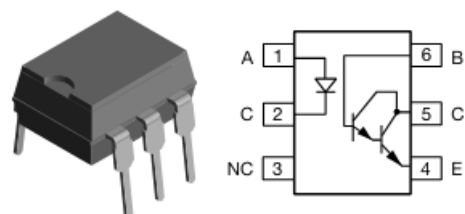


Figura 25 Encapsulado y circuito interno del 4N32 (Vishay Intertechnology, 2024)

5.1.4.4. Controlador de retroalimentación PD

Existen tres tipos de controladores:

- PID: Proporcional – Integral – Derivativo
- PI: Proporcional – Integral
- PD: Proporcional – Derivativo

Estos controladores se usan como sistemas de control automático, combinando dos o tres acciones entre proporcional, integral y derivativo. (Gato, 2020)

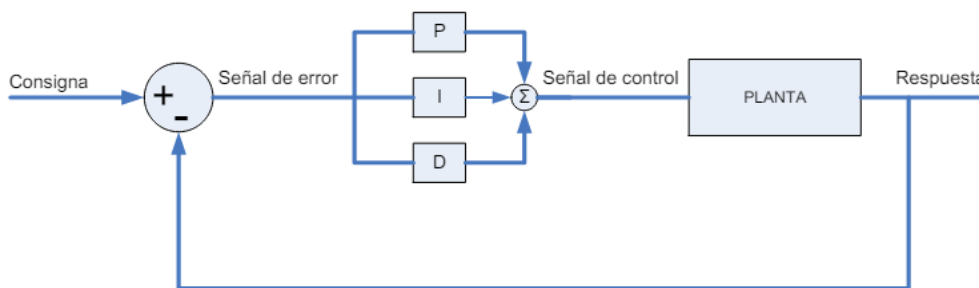


Figura 26 Sistema de control básico PID, PI, PD. (Gato, 2020)

Acción proporcional: La acción proporcional está definida por la siguiente ley de regulación del controlador proporcional:

$$u(t) = C + k * e(t)$$

- C es el sesgo u offset en la ley de control, que generalmente tiene un valor de cero.
- k es la ganancia proporcional.
- e(t) es el error en el tiempo

La variable compleja tiene valores iniciales nulos, por lo que la función de transferencia del controlador proporcional es:

$$G_c(S) = \frac{U(S)}{E(S)} = K$$

La ganancia K puede afectar de varias formas al sistema de la planta. Si se aumenta la ganancia K, el controlador puede añadir más error transitorio, pero reduce el error permanente una vez estabilizado el sistema, acercando los valores más rápidamente al valor deseado o consigna.

Limitaciones de la Acción Proporcional:

- Si el sistema no tiene sumadores de error acumulado, el error permanente no se elimina.
- Al aplicar solo la acción proporcional, no se pueden corregir las desviaciones acumuladas, manteniendo un desfase debido a la acumulación de errores.

Acción derivativa: La parte derivativa de un controlador se basa en la tasa de cambio del error. No solo considera el error actual, como la acción proporcional, sino que también observa los cambios rápidos del error.

La acción derivativa está definida por la siguiente ley de regulación:

$$u(t) = D(t) = k_d * \frac{d}{dt} e(t) = k * T_d * \frac{d}{dt} e(t)$$

La acción derivativa viene configurada por la siguiente función de transferencia en el dominio de Laplace:

$$G_c(S) = \frac{U(S)}{E(S)} = K_d * S = K * T_d * S$$

Donde K_d es la ganancia derivativa y $\frac{d}{dt}e(t)$ es la derivada en el tiempo del error.

La acción derivativa ayuda a disminuir el sobresalto, mejorando la respuesta transitoria del sistema. Esto significa que la señal insertada al sistema es suave y sin oscilaciones bruscas. Esta acción no afecta al régimen permanente en caso de que este llegue a ser constante, ya que en esa situación la acción derivativa no contribuiría de ninguna forma.

La acción derivativa se puede considerar como una predicción del error futuro, ya que ajusta el controlador teniendo en cuenta la tendencia del error actual. De esta forma, mejora la estabilidad y la respuesta a los cambios rápidos en los errores. Sin embargo, al igual que la acción proporcional, no puede funcionar sola.

Acción Proporcional Derivativa: Como se mencionó anteriormente, la acción derivativa no puede actuar sola ya que puede causar inestabilidad. Por lo tanto, esta acción se combina con la acción proporcional. La combinación de ambos hace que el controlador use el error actual combinado con la tasa de cambio del error para ajustar la salida.

Esta combinación se basa en el error actual y la derivada del error, y se representa mediante la siguiente ecuación

$$u(t) = k(e(t) + T_d \frac{d}{dt}e(t))$$

La combinación de las acciones proporcional y derivativa permite que el controlador ajuste la salida teniendo en cuenta tanto el error actual como la tendencia del error, mejorando así la estabilidad y la respuesta a los cambios rápidos en el sistema

Y la ecuación de la función de transferencia en el dominio de Laplace viene dada por:

$$G_c(S) = K(1 + T_d S)$$

Para el uso de un controlador PD, se introduce un cero en la función de transferencia $-\frac{1}{T_d}$. La posición del cero puede afectar a las raíces del sistema, pudiendo mejorar la estabilidad y la respuesta del sistema.

Si el cero se encuentra cerca del origen, se producirán las siguientes mejoras:

- Disminución de las sobre oscilaciones.
- Reducción del tiempo de asentamiento.
- El tiempo para alcanzar el valor máximo puede ser mayor.

La posición del cero juega un papel crucial en la dinámica del sistema. Ajustar el cero correctamente puede llevar a una mejora significativa en la estabilidad y la rapidez de la respuesta del sistema. (Gato, 2020)

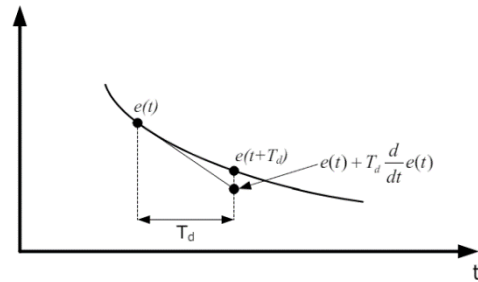


Figura 27 Predicción del error (Gato, 2020)

5.1.4.5. Filtro Digital de Media Móvil

El filtro de media móvil funciona tomando N datos, o muestras, de los datos recibidos y calculando la media de estos valores. El resultado obtenido es una señal suavizada, en la que se elimina parte del ruido de altas frecuencias.

El tamaño de las muestras condiciona la respuesta del filtro. Si el valor de muestras es 1, prácticamente no habrá filtrado, ya que no se hará media. Mientras mayor sea el número de muestras, más filtrada estará la señal. Sin embargo, si la cantidad de muestras es muy alta, la señal filtrada producirá un desfase entre la señal filtrada y la señal real. Los valores comunes para N están entre 3 y 10 muestras. (Llamas, 2014)

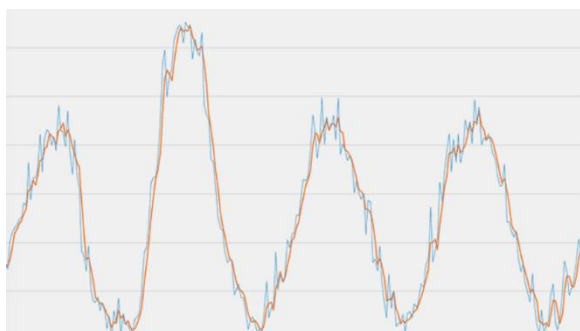


Figura 29 Filtro con 5 muestras (Llamas, 2014)

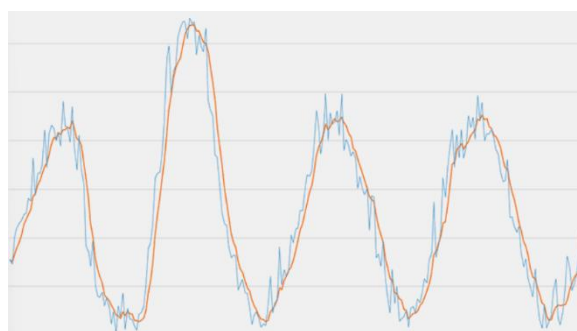


Figura 28 Filtro con 10 muestras (Llamas, 2014)

5.1.4.6. Filtro Digital EMA

Un filtro digital EMA (Exponential Moving Average, media móvil exponencial) busca obtener un valor filtrado mediante la siguiente fórmula:

$$A_n = \alpha M + (1 - \alpha) * A_{n-1}$$

Siendo:

- A_n = valor filtrado actual
- A_{n-1} = valor filtrado anterior
- M = es el valor muestreado de la señal a filtrar
- α = coeficiente entre 0 a 1

El funcionamiento del filtro EMA es el siguiente: utiliza el historial de los datos anteriores (representado por A_{n-1}) para realizar el filtrado de los nuevos valores obtenidos, en nuestro caso, por el sensor. Los nuevos valores se combinan con el valor filtrado anterior para producir la señal filtrada actual. La cantidad de filtrado depende del coeficiente α , el cual se relaciona con la frecuencia de corte del filtro dependiendo del tiempo de muestreo y debe estar entre 0 y 1.

- Mientras más cerca esté α de 0, más filtrada estará la señal.
- Si α es 1 o se aproxima a 1, el filtrado no será perceptible.

Sin embargo, esto tiene algunas consecuencias: si el valor es demasiado pequeño, se pueden eliminar frecuencias importantes, confundiendo señales válidas con ruido. Al disminuir el factor α , el tiempo de respuesta es mayor y el sistema tarda más en estabilizarse, es decir, tardará más en alcanzar la señal original filtrada. Los valores habituales suelen estar entre 0.2 y 0.6.

Las ventajas de este filtro son su simplicidad y eficiencia computacional. Arduino cuenta con una librería que facilita su aplicación. Además, el filtro EMA es eficiente en términos de memoria, ya que

solo necesita recordar el valor filtrado anterior, en lugar de almacenar una gran cantidad de datos anteriores. (Llamas, 2014)

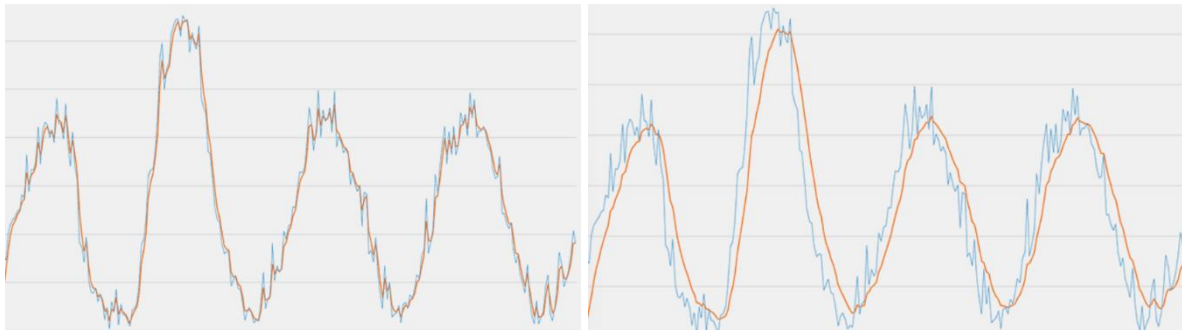


Figura 31 Filtro pasa bajos con $\text{Alpha} = 0.2$ (Llamas, 2014)

Figura 30 Filtro pasa bajos con $\text{Alpha} = 0.05$ (Llamas, 2014)

En este proyecto aplicamos el filtro EMA para suavizar la señal del sensor, en las siguientes imágenes podemos ver cómo era la señal antes del filtrado.

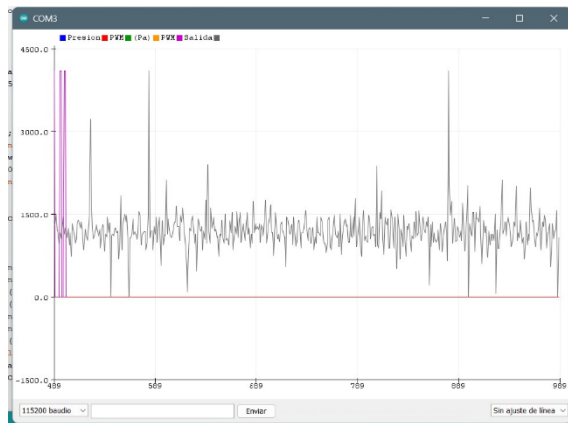


Figura 33 Señal sin filtros digitales

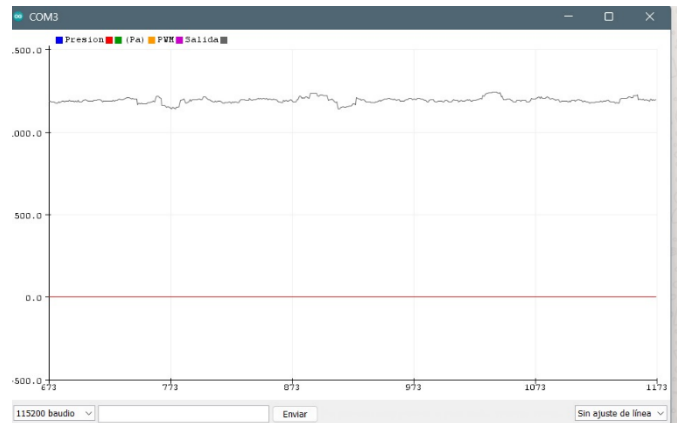


Figura 32 Señal con filtro digital

6. RESULTADOS

6.1. DISEÑO FILTRO PASA BAJOS

Se ha realizado el diseño de un filtro pasa bajos con configuración Butterworth del tipo Sallen-Key. No se ha aplicado ganancia ya que el circuito es alimentado por el puerto de alimentación del variador de frecuencia a 10V, por lo que no es necesario aplicar una ganancia al circuito.

Se diseñó un filtro pasa bajos de segundo orden. Los componentes de diseño constan de un filtro de segundo orden del tipo RC. Se añadió un optoacoplador para realizar el control mediante la variación de la iluminación del LED, la cual es recibida por el transistor para enviar la señal al filtro y luego al variador.

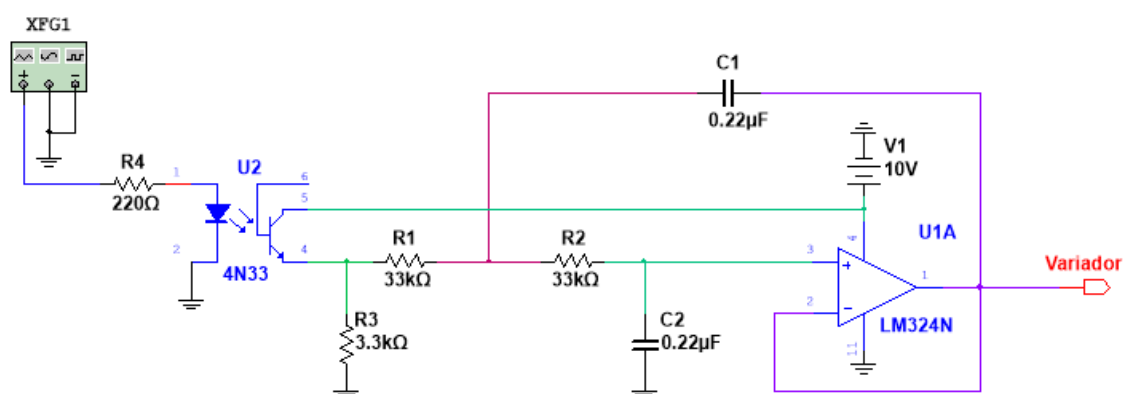


Figura 34 Filtro Pasa Bajos RC de segundo Orden

Para el diseño y simulación hacemos uso de un optoacoplador con un transistor común; sin embargo, en el montaje final se utiliza un transistor 4N32 de par Darlington.

Componentes Utilizados para la Simulación del Circuito:

- Generador de señales: Para simular una señal cuadrada que es la que se genera con una señal PWM del microcontrolador.
 - o Se configura el generador de señales para obtener una señal cuadrada que simula los pulsos de la señal PWM obtenida por el microcontrolador (Arduino).
 - o La frecuencia está configurada en 500 Hz, que es aproximadamente el valor dado por la señal PWM del pin del Arduino usado para la simulación en este proyecto.
 - o La amplitud se define como 5Vp, para simular que la tensión añadida es de 5V, emulando la alimentación del Arduino.
 - o El ciclo de trabajo (Duty Cycle) se modifica para observar el comportamiento del filtro en distintos ciclos de trabajo.
 - o No es necesario modificar el offset, por lo que se mantiene en cero.
- Osciloscopio: Para verificar la señal de salida y la respuesta del circuito.
- Multímetros: Para medir la tensión obtenida según los valores configurados.

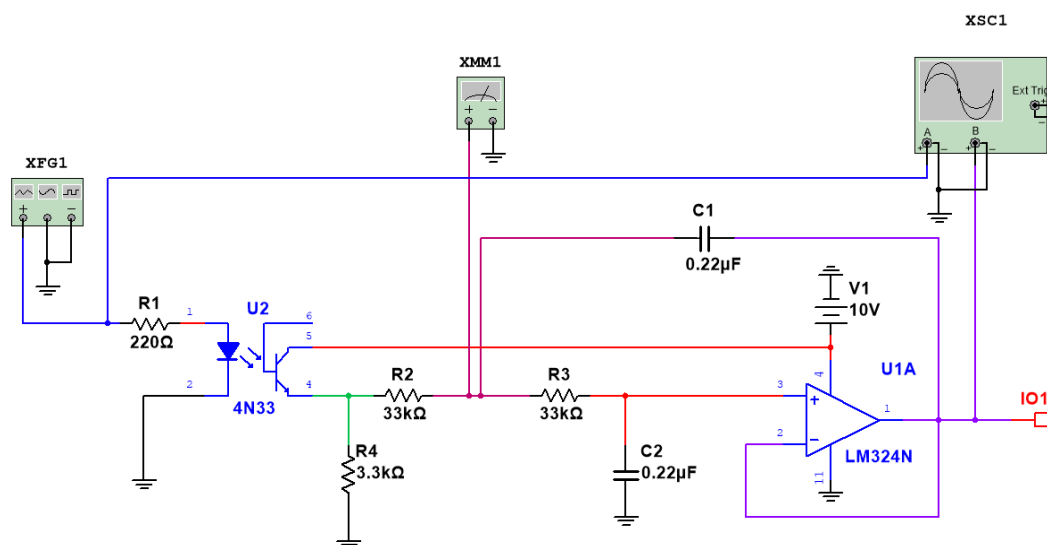


Figura 35 Filtro Pasa Bajos RC con equipos de medida

Para una configuración del 25%: Con un ciclo de trabajo del 25%, obtenemos los siguientes valores. Como se observa, la tensión enviada a la señal del filtro es de aproximadamente 2.71V, que es aproximadamente el valor real obtenido y/o deseado.

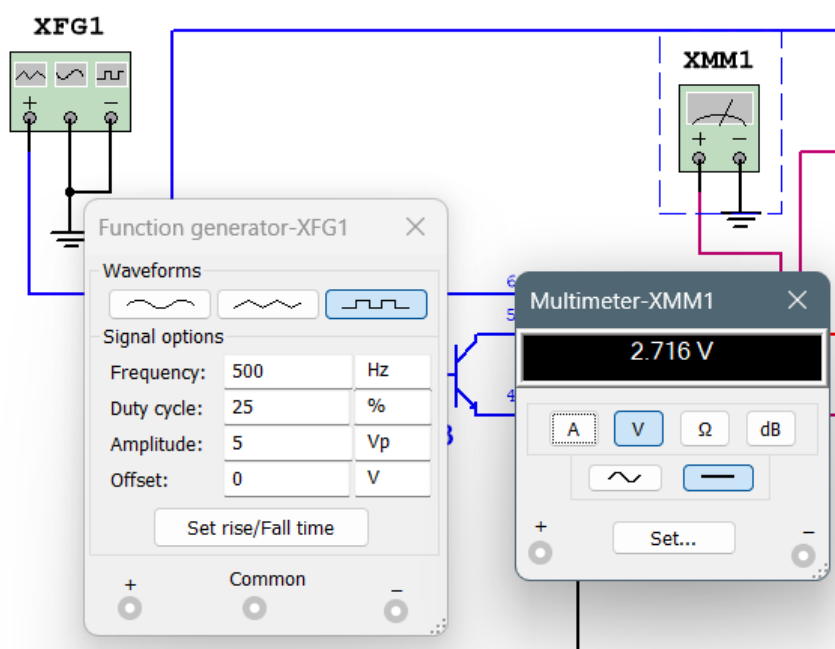


Figura 36 Valores Duty Cycle 25%

La gráfica obtenida de esta simulación muestra el comportamiento de la señal filtrada con un ciclo de trabajo del 25%. En la gráfica, se puede observar que el tiempo de asentamiento es de 43.12 milisegundos. Este tiempo de asentamiento indica el tiempo que tarda la señal en estabilizarse después de un cambio en el ciclo de trabajo.

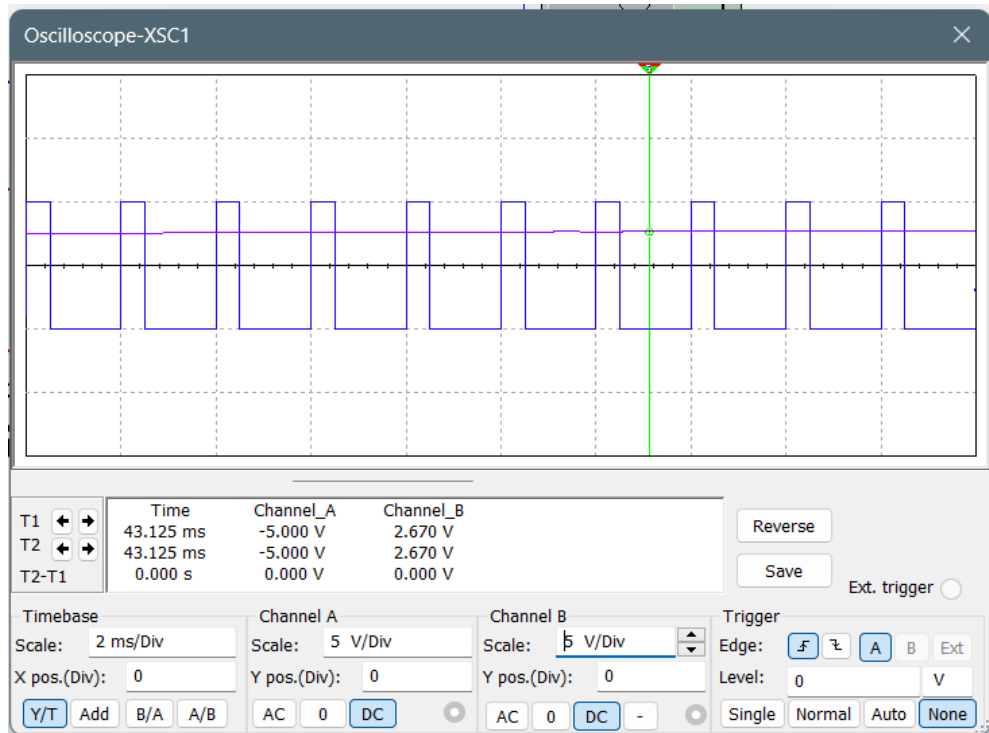


Figura 37 Gráfico Simulación Duty Cycle de 25%

Para una configuración del 50%: Con un ciclo de trabajo del 50%, obtenemos los siguientes valores. Observamos que la tensión no es exactamente 5V debido a que está al 50% de ciclo de trabajo en el punto medido con el multímetro.

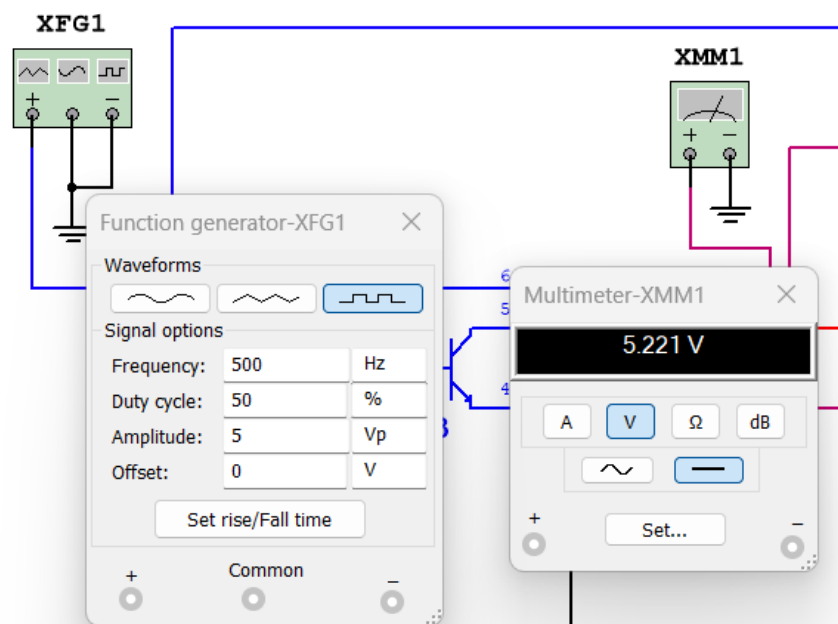


Figura 38 Valores Duty con 50%

La siguiente gráfica obtenida en la simulación muestra el comportamiento de la señal filtrada con un ciclo de trabajo del 50%. En la gráfica, podemos observar que el tiempo de asentamiento es de 37.64 milisegundos.

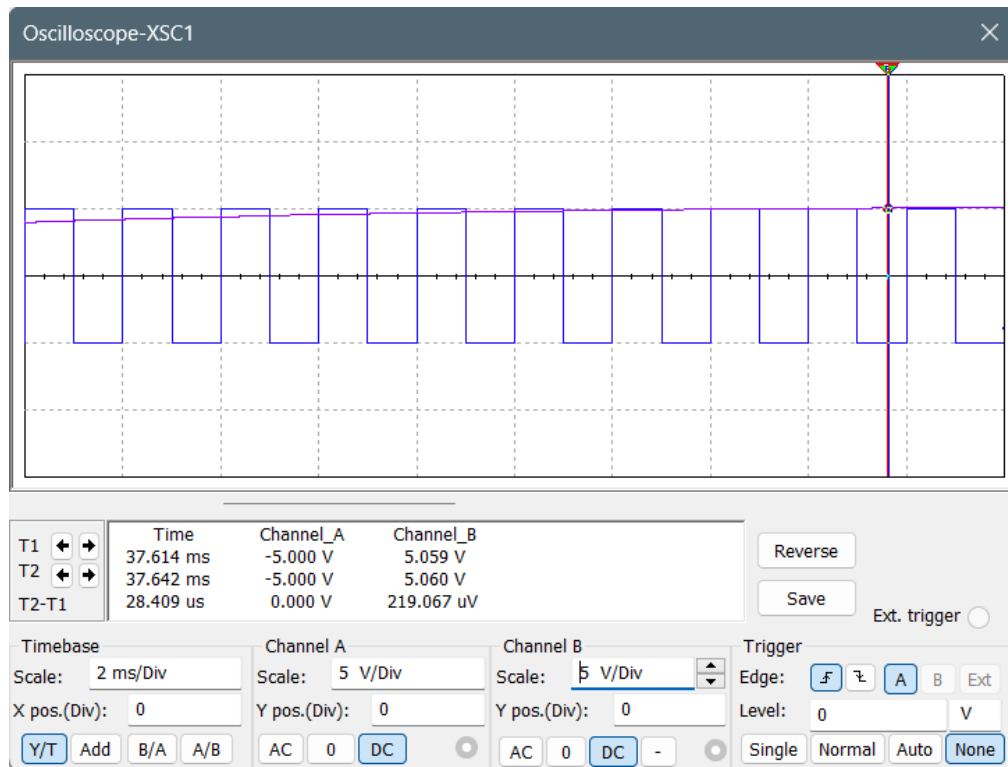


Figura 39 Gráfico de simulación Duty Cycle de 50%

Para una configuración del 75%: Con un ciclo de trabajo del 75%, obtenemos los siguientes valores. Observamos una tensión de 7.63V. Este valor refleja que la señal PWM está activa el 75% del tiempo, lo que da como resultado una tensión promedio mayor que en los ciclos de trabajo del 25% y 50%.

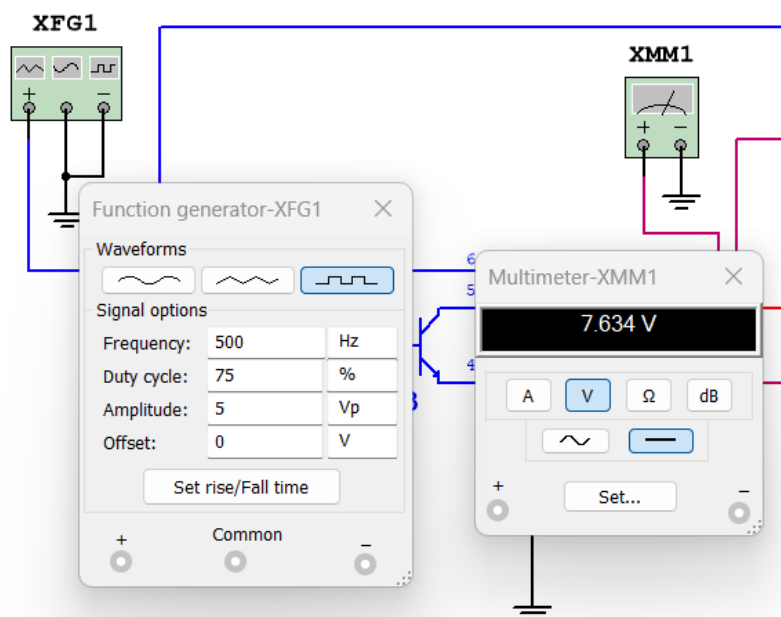


Figura 40 Valores Duty Cycle del 75%

La siguiente gráfica obtenida en la simulación muestra el comportamiento de la señal filtrada con un ciclo de trabajo del 75%. En la gráfica, podemos observar que el tiempo de asentamiento es de 47.64 milisegundos y la tensión máxima obtenida es de 7.63V.

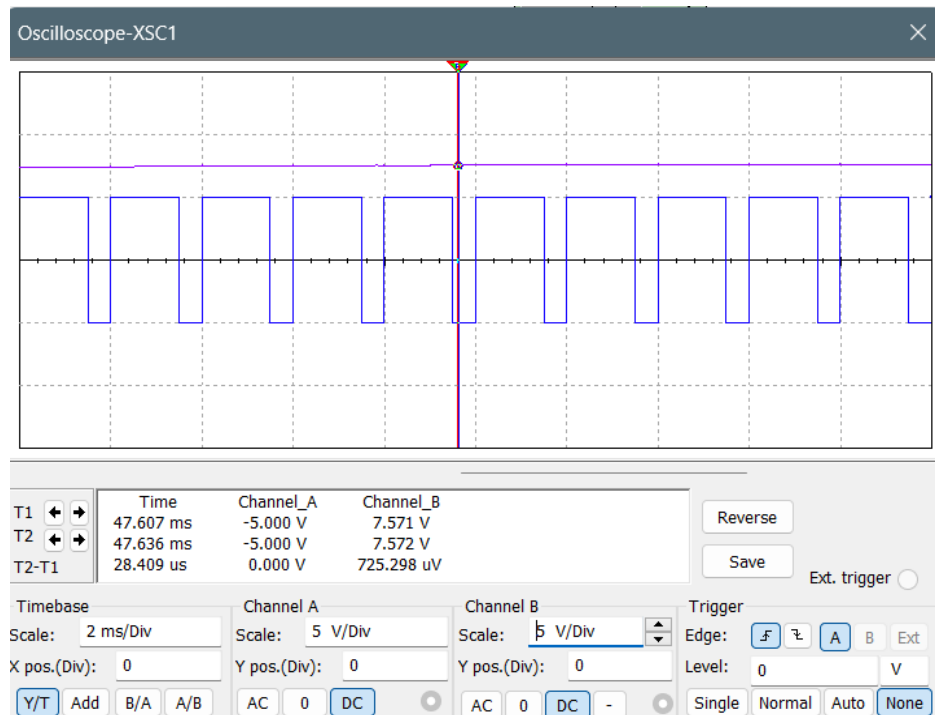


Figura 41 Gráfico de simulación Duty Cycle de 75%

Para una configuración del 100%: Con un ciclo de trabajo del 100%, observamos que la tensión obtenida en el punto medido es de 4.9V. Este valor se aproxima al valor real debido a las pequeñas variaciones en la salida de 5V del Arduino, que no siempre es exactamente 5V.

En el filtro, la tensión obtenida es de 9.826V, muy cercana a los 10V de la alimentación. Esto demuestra que el filtro está funcionando correctamente y proporcionando una señal filtrada muy próxima al valor de la alimentación cuando el ciclo de trabajo es del 100%.

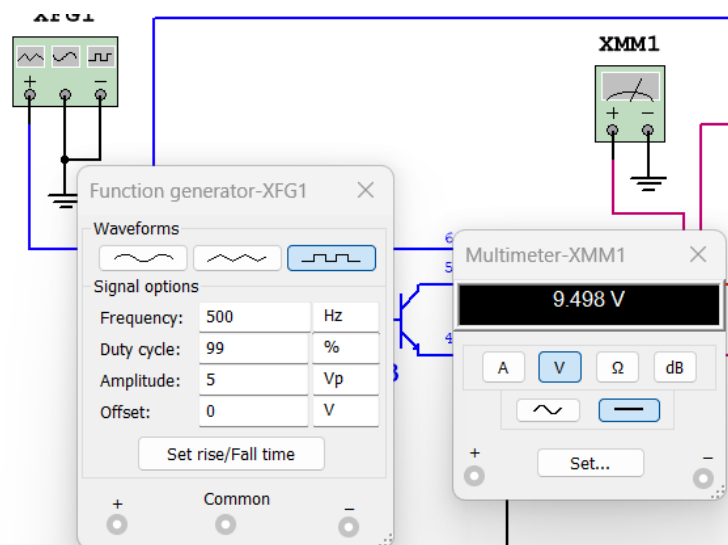


Figura 42 Valores Duty Cycle del 99%

Al simular y observar en el osciloscopio, se puede ver que el tiempo de asentamiento es de 30.017 milisegundos. La tensión obtenida en el tiempo de asentamiento es de 8.93V, lo cual es similar a la tensión obtenida en el variador de frecuencia cuando se le aplica la tensión al máximo.

En el variador de frecuencia, la tensión máxima observada es de 8.71V. El variador mide de 0 a 100%, lo que se corresponde con una relación de 0 a 10V. Por lo tanto, los valores obtenidos en la simulación se acercan a la realidad, demostrando la precisión del sistema en condiciones reales.

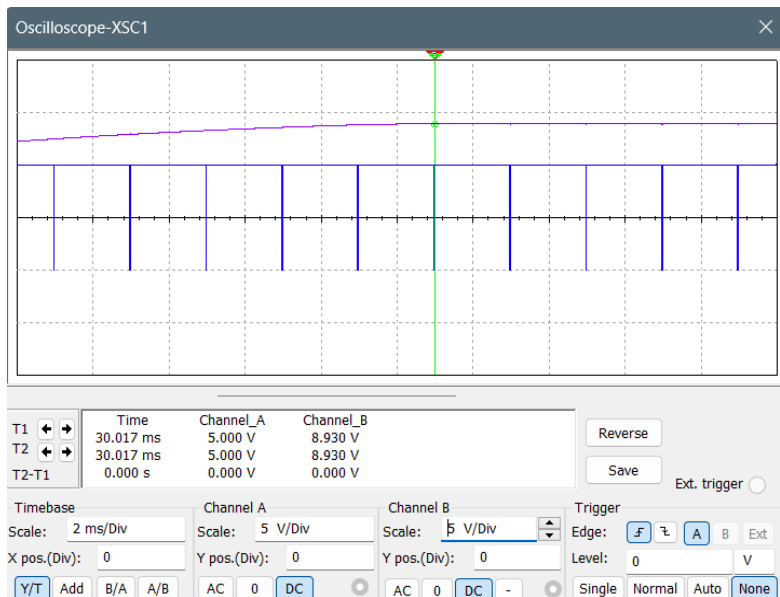


Figura 44 Grafico de simulación Duty Cycle de 99%



Figura 43 Tensión en Variador de frecuencia

6.2. DISEÑO CONTROLADOR PD

Para el diseño del controlador PD, se realizaron pruebas físicas dentro de la cámara cerrada. La presión se midió utilizando un medidor de presión diferencial externo de la marca FESTO, lo que permitió obtener datos precisos sobre la presión dentro de la cámara.

Datos de la cámara:

- Velocidad/Frecuencia = 50 Hz
- Presión = 600 Pa

Datos del Arduino:

- Frecuencia = 490 Hz

Con estas medidas, procedemos a realizar los cálculos necesarios para obtener la función de transferencia del sistema. Estos cálculos nos permitirán diseñar un controlador PD que responda adecuadamente a las variaciones de presión dentro de la cámara, asegurando un control preciso y estable.

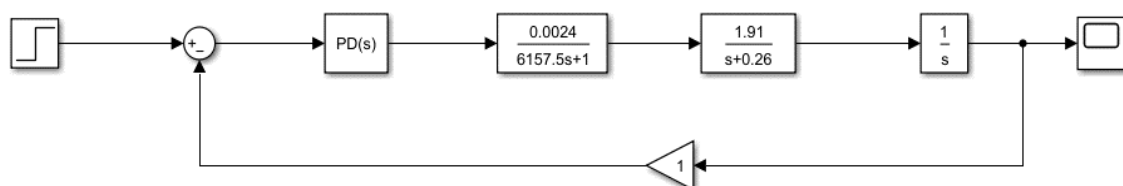


Figura 45 Diagrama de control con retroalimentación

Cálculos:

$$P = 600Pa$$

$$\omega = 2 * \pi * 50 = 314.16 // \text{frecuencia de control}$$

$$\omega_c = 2 * \pi * 490 = 3078.76 // \text{frecuencia de corte}$$

Relación Presión-frecuencia respecto al regulador

$$\frac{P}{\omega} = \frac{k}{s+a} \rightarrow k = \frac{P}{\omega} = \frac{600}{314.16} = 1.91 // \text{la constante K es igual a 1.91}$$

El tiempo de respuesta asignado y medido es de 15"

$$tr = 15" \text{ entonces } \sigma = \frac{4}{tr} = \frac{4}{15} = 0.26 \text{ por lo que } Si = -\sigma = -0.26$$

La función de transferencia de la planta sería igual a:

$$X(s) = \frac{1.91}{s + 0.26} * \frac{1}{s} \rightarrow X(s) = \frac{1.91}{s(s + 0.26)}$$

La función de transferencia de la señal PWM viene a ser:

$$PWM = \frac{\frac{10}{4096}}{2 * \omega_c s + 1} = \frac{0.0024}{6157.52s + 1}$$

Por lo que el regulador completo es la multiplicación de la planta con la señal PWM:

$$R(s) = \frac{1.91}{s(s + 0.26)} * \frac{0.0024}{6157.52s + 1} = \frac{0.004584}{s(6157.52s^2 + 1601.955s + 0.26)}$$

Obtenemos los polos:

$$R(s) = \frac{0.004584}{s(s + 0.26)(s + 0.00016)}$$

Calculamos los valores del controlador PD, la formula aplicada es la siguiente y buscamos el polo lento:

$$PD = k(s + a)$$

El polo lento de la función de transferencia es $(s + 0.00016)$, mediante esto eliminamos el polo lento y calculamos la función de transferencia de bucle abierto:

$$FT_{BA} = \frac{0.00458k(s + 0.00016)}{s(s + 0.26)(s + 0.00016)} = \frac{0.00458k}{s(s + 0.26)}$$

Añadimos un cero $(s+5.4)$ para que nos ayude con el sistema de control:

$$FT_{BA} = \frac{0.00458k(s + 5.4)}{s(s + 0.26)}$$

Calculamos el valor de k, teniendo en cuenta que s es igual a $s = si$, y tenemos un tiempo de respuesta de 0.5", por lo que:

$$tr = 0.5" \text{ entonces } \sigma = \frac{4}{tr} = \frac{4}{0.5} = 8 \text{ por lo que } Si = -\sigma = -8$$

$$\frac{0.00458 * k * |s_i + 5.4|}{|s_i| * |s_i + 0.26|} = 1 \Big|_{s_i = -8} \rightarrow k = 5199.86$$

Una vez calculada la k , calculamos la función de transferencia de bucle abierto y cerrado:

$$FT_{BA} = \frac{0.00458k(s+5.4)}{s(s+0.26)} = \frac{23.815(s+5.4)}{s(s+0.6)}$$

$$FT_{BC} = \frac{23.815(s+5.4)}{s(s+0.6) + 23.815(s+5.4)} = \frac{23.815(s+5.4)}{s^2 + 0.26s + 128.6}$$

Calculamos constantes:

$$w_n^2 \rightarrow w_n = \sqrt{128.6} = 11.34$$

$$2\zeta w_n = 24.08 \rightarrow \zeta = \frac{24.08}{2w_n} = 1.062$$

Con estos valores obtenemos la función de transferencia y el tiempo de respuesta:

$$t_r = \frac{4}{\zeta w_n} = 0.33''$$

Realizamos la simulación de la función de transferencia en Matlab y obtenemos que el tiempo de respuesta real es del aproximadamente 0.7''

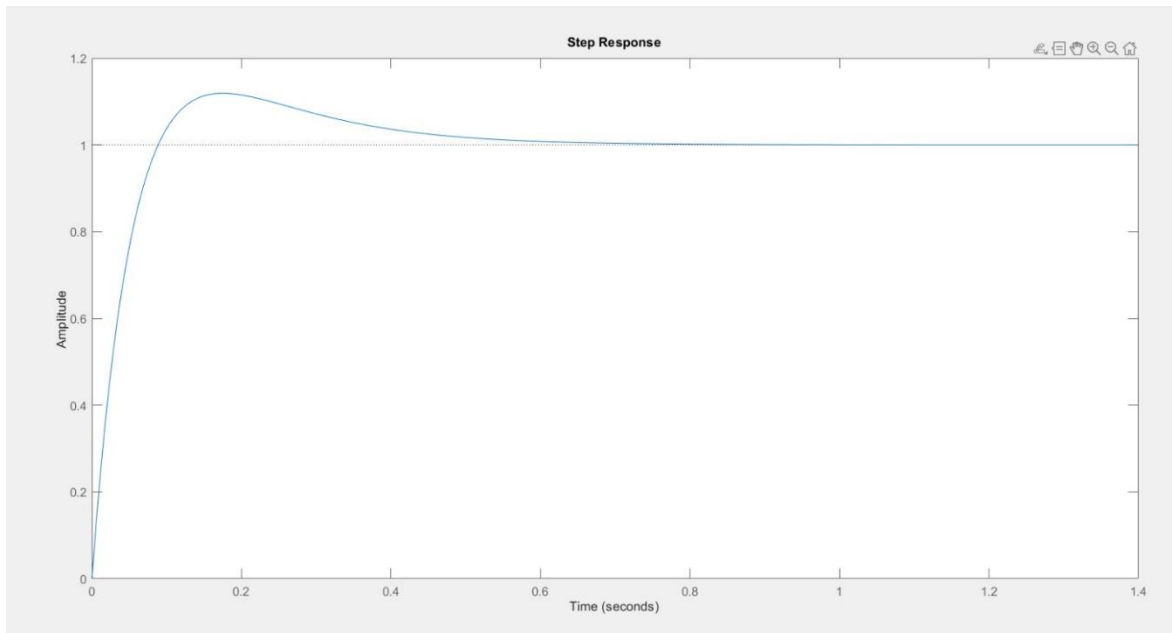


Figura 46 Gráfica Función de transferencia

Una vez obtenidos los resultados se procede a discretizar el regulador:

$$PD = k(s+a) = 5199.86(s+0.00016) = \frac{Y(s)}{X(s)}$$

$$5199.86sX(s) + 0.83197X(s) = Y(s)$$

$$5199.86 \frac{dx(t)}{dt} + 0.83197X(t) = Y(t)$$

$$T * (5199.86 \frac{(X_k - X_{k-1})}{T} + 0.83197X(t)) = Y_k T$$

$$(5199.86 + 0.83197 * T) * X_k - 5199.86 * X_{k-1} = Y_k T$$

Calculamos la función con un tiempo de respuesta de 0.01", este regulador es el que usamos en el código de programación para la realimentación:

$$Y_k = 519986.3 * X_k - 519986.3 * X_{k-1}$$

6.3. SIMULACIÓN DEL SISTEMA EN SIMULINK

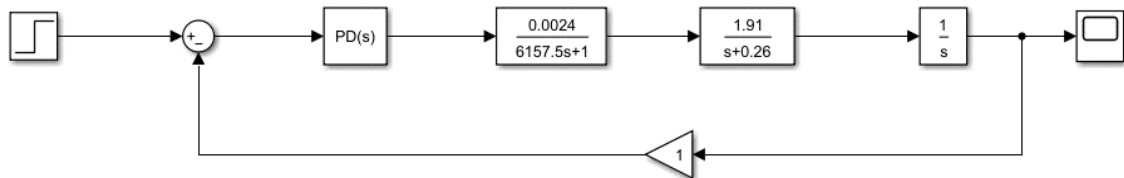


Figura 47 Regulador Simulado en Simulink

Observamos que el tiempo de asentamiento es de 350 milisegundos aproximadamente.

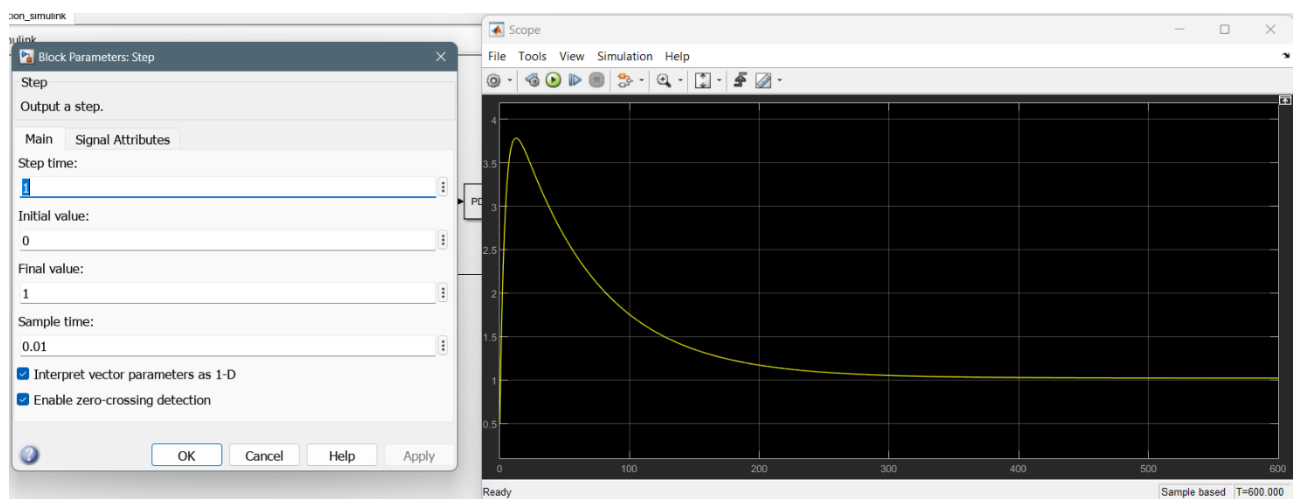


Figura 48 Simulación regulador con tiempo de respuesta de 0.01

6.4. CONFIGURACIÓN VARIADOR DE FRECUENCIA

Para la configuración del relé, realizamos las siguientes conexiones según el manual de instrucciones del variador de frecuencia de SODECA.

Puertos 1 y 2: Conectamos un relé para iniciar o parar el variador. Independientemente de si se utiliza la configuración interna del variador o el control externo (como en este caso con Arduino), es necesario añadir el relé para su activación. En caso contrario, el variador no funcionaría.

Pines 5, 6 y 7:

- **Puerto 5:** Se conecta la alimentación al circuito del filtro pasa bajos para su funcionamiento.

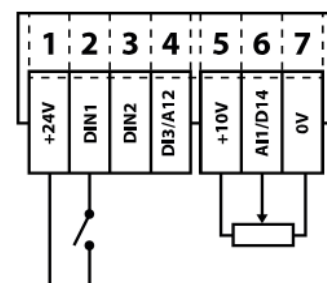


Figura 49 Pines de conexión variador. (SODECA, CONVERTIDOR DE FRECUENCIA, 2022)

- **Puerto 6:** Se conecta la señal de salida del filtro pasa bajos, por este puerto se envía la información al variador para el cambio de velocidad.
- **Puerto 7:** Funciona como la masa del circuito del filtro pasa bajos de control.

Usamos la siguiente configuración para el funcionamiento del variador con control del Arduino:

Ingresamos en los parámetros del variador de frecuencia y cambiamos los siguientes datos para que el variador permita el control externo:

Esta configuración garantiza que el variador de frecuencia opere correctamente bajo el control del Arduino, permitiendo una mayor flexibilidad y precisión en la gestión de la velocidad.

Parámetros por modificar y función:

Parámetro	Descripción	Valor
P-01	Velocidad Máxima	La que se configure
P-02	Velocidad Mínima	0
P-03	Rampa de aceleración	0.1
P-04	Rampa de desaceleración	0.1
P-12	Control de terminales	0
P-00	Visualizar tensión por puertos	P00-01

Tabla 3 Configuración del VDF (SODECA, CONVERTIDOR DE FRECUENCIA, 2022)

Esta configuración garantiza que el variador de frecuencia opere correctamente bajo el control del Arduino, permitiendo una mayor flexibilidad y precisión en la gestión de la velocidad.

Además, se realizaron pruebas con el variador y la lectura del medidor de presión sin tener en cuenta el sistema de control, con el objetivo de entender el comportamiento de la cámara a las diferentes frecuencias aplicadas. Durante estas pruebas, observamos que la tendencia no es exponencial. A medida que aumenta la frecuencia, la presión no sigue una pendiente recta, lo que indica que no existe una relación lineal entre la frecuencia y la presión:

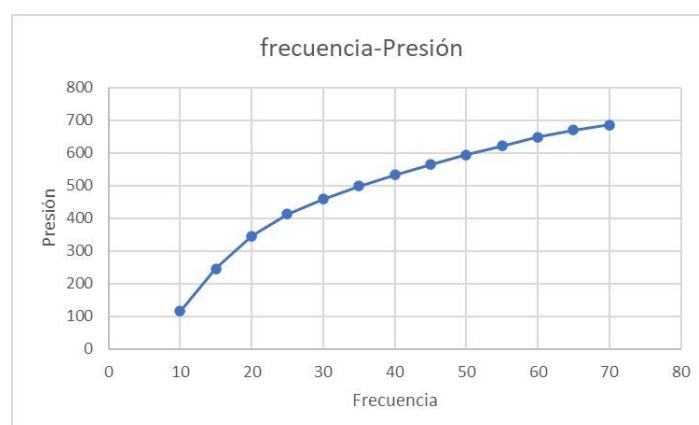


Figura 50 Curva Presión-Frecuencia

El modelo que debería seguir este sistema es el que se muestra en la Figura 48. Como podemos ver en el gráfico, los puntos se ajustan a la línea, mostrando un ajuste preciso.

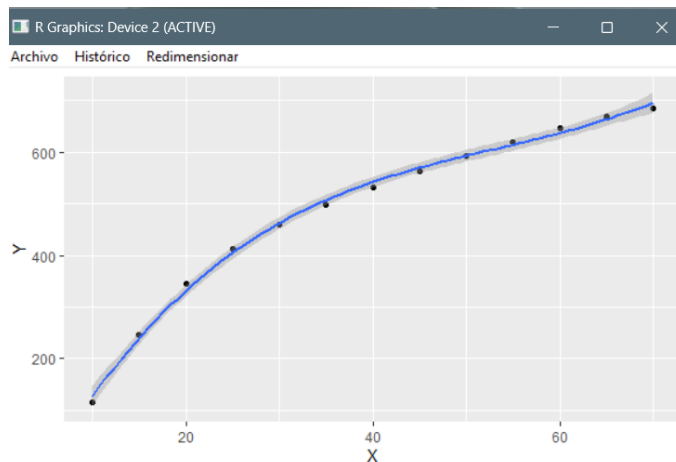


Figura 51 Gráfico de comportamiento del sistema esperado

6.5. PROGRAMA

6.5.1. Programación en Arduino

Como se mencionó con anterioridad, realizamos la programación en Arduino. También cabe destacar que, en principio, se realizó el programa para un solo ensayo, ya que se necesitan pruebas para el funcionamiento de los demás ensayos. Este código se modificará a medida que avance el proyecto y se añadan los demás ensayos.

El objetivo de este código es controlar el sistema de presurización de forma automática, regulando la presión interna de la cámara y manteniéndola dentro de un rango especificado utilizando un sensor y un regulador. Además, se añadió un filtro EMA para suavizar la señal y, externamente, un circuito pasa bajos para suavizar la señal PWM.

El ensayo considerado para este programa es el ASTM E-547 (Muros Cortina). La presurización debe tener una exactitud aproximada de más o menos el 2.5%, comenzando con una presión mínima de 150 Pa y alcanzando una presión máxima de 3600 Pa. En este ensayo, se busca realizar tres ciclos a una presión específica, incrementando la presión en 150 Pa después de cada tres ciclos, hasta alcanzar los 3600 Pa.

El ciclo del proyecto es el siguiente:

- Rampa de subida: 15 segundos
- Mantener: 5 minutos
- Rampa de bajada: 15 segundos
- Descanso: 1 minuto

Además, se añadieron dos estados adicionales: uno para estabilizar la presión antes de comenzar el ensayo y mantener la presión mínima durante la etapa de descanso, y otro estado para detener el ensayo.

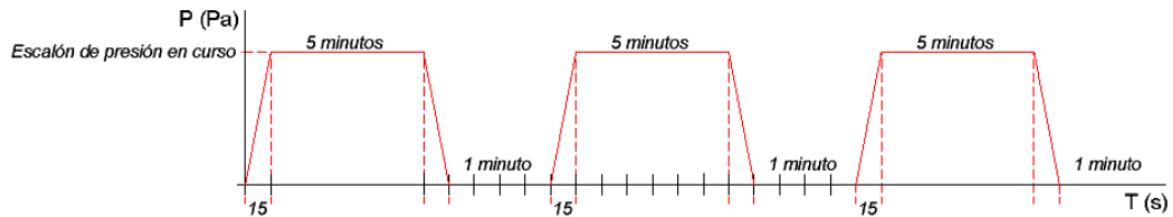


Figura 52 Gráfico Ensayo ASTM E-547

Se ha añadido en el código comentarios para el entendimiento y uso del programa:

Variables generales:

```
unsigned long t_antes = 0; // Tiempo previo
float p_actual = 0; // Presión actual
const float p_min = 0.15; // Presión mínima en KPa, presión 150 Pa
const float p_max = 3.6; // Presión máxima en KPa, presión 3600Pa
float p_actual = 0.15; // Presión de consigna actual en Kpa

// Tiempos en milisegundos para ensayo E_457
const long estabilizar = 15000; // Tiempo para estabilizar en la presión mínima (15 segundos)
const long subir = 15000; // Rampa de subida configurada a 15 segundos (15*1000)
const long mantener = 300000; // Mantener la presión máxima durante 5 minutos (5*60*1000)
const long bajar = 15000; // Rampa de bajada configurada a 15 segundos (15*1000)
const long descanso = 60000; // Detenerse por 1 minuto después de la rampa de bajada

int ciclo_actual = 0;
const float incrementar_p = 0.150; // Incremento de presión de 0.15 KPa en Pa

// Variables del regulador PD
float Xk, Xk_1 = 0.0, Yk, Ek;

// Estados del ciclo de presurización
enum State { ESTABILIZAR, SUBIR, MANTENER, BAJAR, BAJO, DETENER };
State e_inicial = ESTABILIZAR; // Estado inicial

// Variables para control del tiempo y del sensor
unsigned long lastTime = 0;
const unsigned long interval = 10; // Intervalo de muestreo en milisegundos
bool ensayo = false; // Bandera para indicar si el ensayo está en curso
```

Inicialización del Setup:

```
void setup() {
    analogReadResolution(12); // Resolución de lectura analógica de 12 bits
    Serial.begin(115200); // Inicializar la comunicación serial
    pinMode(IN, INPUT); // Sensor de presión como entrada
    pinMode(rele, OUTPUT); // Relé como señal de salida
    analogReference(AR_DEFAULT); // Toma referencia de la tensión externa AREF en Arduino
    digitalWrite(rele, HIGH); // Estado inicial del relé
    pinMode(VDF, OUTPUT); // Configuración del pin de salida del variador
    analogWrite(VDF, 0); // Asegurar que el variador esté apagado
    Serial.println("Sistema de presurización automático iniciado.");
}
```

Ciclo principal y general, Ciclo principal y general: en este código se incluye el método de llamada desde el puerto serie para el encendido y apagado del relé, los filtros de suavizado y el controlador PD, así como el inicio del ensayo. En el futuro, se ampliará para incluir más comandos de llamada.

```
void loop() {
    // Lectura del puerto serie
    unsigned long t_actual = millis();
    // Lectura del puerto serie
    if (Serial.available() > 0) {
        int active = Serial.parseInt();
        if (active == 0) {
            // Apagar el relé
            rele_off = true;
            rele_on = false;
            digitalWrite(rele, HIGH); // Apagar el relé
            Serial.println("Relé apagado.");
        } else if (active == 1) {
            // Encender el relé
            rele_on = true;
            rele_off = false;
            digitalWrite(rele, LOW); // Encender el relé
            Serial.println("Relé encendido. Introduce el código de ensayo.");
        } else if (active == 547 && rele_on) {
            // Comenzar el ensayo
            ensayo = true;
            ensayo = true;
            e_inicial = ESTABILIZAR; // Inicializar el estado de estabilización
            t_antes = t_actual;
            analogWrite(VDF, 50); // Señal mínima al ventilador durante la estabilización
            Serial.println("Código de ensayo correcto. Comenzando estabilización.");
        }
    }
    unsigned long currentTime = millis();

    if (currentTime - lastTime >= interval && rele_on) {
        lastTime = currentTime;

        // Función de transferencia del sensor de presión 1
        float Vs = 5.0; // Tensión de referencia
        float tension = (analogRead(IN) * Vs / 4096.0); //4096 resolucion 2^12 = 4096
        float p_correction = error_p * t_factor * 0.09 * Vs; // Corrección
        float presion = (tension - p_correction - (0.04 * Vs)) / (0.09 * Vs);

        // Filtro digital para suavizar la señal de entrada del sensor1
        v[i++] = presion;
        if (i >= muestras) i = 0;

        float p_media = 0.0; //p_media, la media de las presiones
        for (int j = 0; j < muestras; j++) {
            p_media += v[j];
        }

        p_media = (p_media / muestras);

        //filtro EMA, aplicando filtro pasa bajos
        emaFilter.AddValue(p_media);
        float atenuar = emaFilter.GetLowPass();

        // Función de transferencia de controlador PD
        Xk = p_actual - atenuar;
        Yk = ((5199.86 * (Xk - Xk_1)) / interval) + (0.8319 * Xk);

        // Tensión de señal PWM entregada a VDF, dividida por la presión máxima que se quiere
        obtener
    }
}
```

```
int pwmOut = (int)((Yk * 4096) / maximo);
if (pwmOut < 0) {
    pwmOut = 0;
    Serial.println("Error, PWM debajo de 0");
} else if (pwmOut > 4096) {
    pwmOut = 4096;
    Serial.println("Error, PWM encima del 4096");
}

// Enviar señal PWM solo si el ensayo ha comenzado y el relé está encendido
if (ensayo && rele_on) {
    analogWrite(VDF, pwmOut);
} else {
    analogWrite(VDF, 0);
}

Xk_1 = Xk;

Serial.print("Presión (Pa): ");
Serial.print(atenuar * 1000);
Serial.print(", Error (Pa): ");
Serial.print(Xk * 1000);
Serial.print(", VDF: ");
Serial.println(pwmOut);

E_547(t_actual); //llamada de la función del ensayo
}
}
```

Función del ensayo, donde se declaran los estados para controlar el ciclo del ensayo, tanto subidas, bajadas, etc.

```
void E_547(unsigned long t_actual) {
    if (digitalRead(rele) == HIGH) {
        e_inicial = DETENER;
    }
    switch (e_inicial) {
        case ESTABILIZAR:
            // Mantener señal mínima durante un tiempo
            if (t_actual - t_antes >= estabilizar) {
                e_inicial = SUBIR; // Cambiar al estado de subida
                t_antes = t_actual;
                p_actual = p_min;
                Serial.println("Estabilizado. Comenzando rampa de subida.");
            }
            break;

        case SUBIR:
            // Incrementar presión hasta la presión de consigna
            if (t_actual - t_antes >= subir) {
                e_inicial = MANTENER; // Cambiar al estado de mantenimiento
                t_antes = t_actual;
                Serial.println("Rampa de subida completada. Manteniendo presión.");
            }
            break;

        case MANTENER:
            // Mantener la presión de consigna durante el tiempo especificado
            if (t_actual - t_antes >= mantener) {
                e_inicial = BAJAR; // Cambiar al estado de bajada
                t_antes = t_actual;
                Serial.println("Mantenimiento completado. Comenzando rampa de bajada.");
            }
            break;
    }
}
```



```

case BAJAR:
    // Reducir la presión hasta la presión mínima
    if (t_actual - t_antes >= bajar) {
        e_inicial = BAJ0; // Cambiar al estado de mantenimiento de presión mínima
        t_antes = t_actual;
        Serial.println("Rampa de bajada completada. Manteniendo presión mínima.");
    }
    break;

case BAJ0:
    // Mantener la presión mínima durante el tiempo de descanso
    if (t_actual - t_antes >= descanso) {
        current_cycle++;
        if (current_cycle >= 3) {
            // Incrementar la presión de consigna después de 3 ciclos
            current_cycle = 0;
            current_pressure += pressure_increment;
            if (current_pressure > p_max) {
                current_pressure = p_max;
            }
            Serial.print("Incrementando presión de consigna a ");
            Serial.print(current_pressure);
            Serial.println(" KPa.");
        }
        e_inicial = SUBIR; // Comenzar un nuevo ciclo de subida
        t_antes = t_actual;
        Serial.println("Comenzando nuevo ciclo.");
    }
    break;

case DETENER:
    // Detener el ciclo y asegurar que el variador esté apagado
    analogWrite(VDF, 0); // Asegurar que el variador esté apagado
    Serial.println("Ciclo completado y detenido.");
    ensayo = false; // Marcar el ensayo como detenido
    break;
}
}

```

6.5.2. Casos de Uso y Diagramas UML

6.5.2.1. Casos de uso

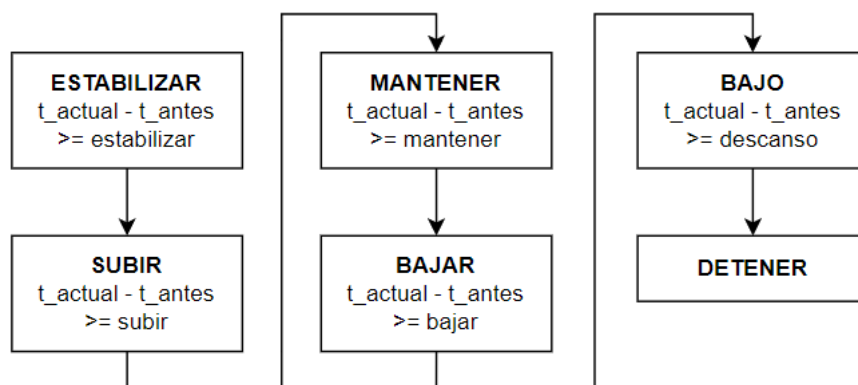


Figura 53 Diagrama UML de Casos de Uso

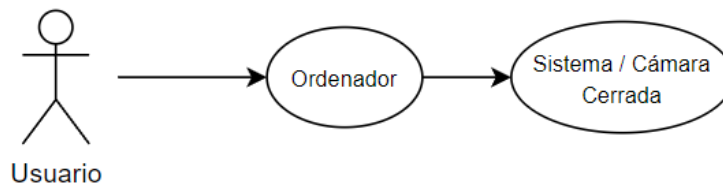


Figura 54 Casos de Uso - Usuario

6.5.2.2. Diagramas de Clase

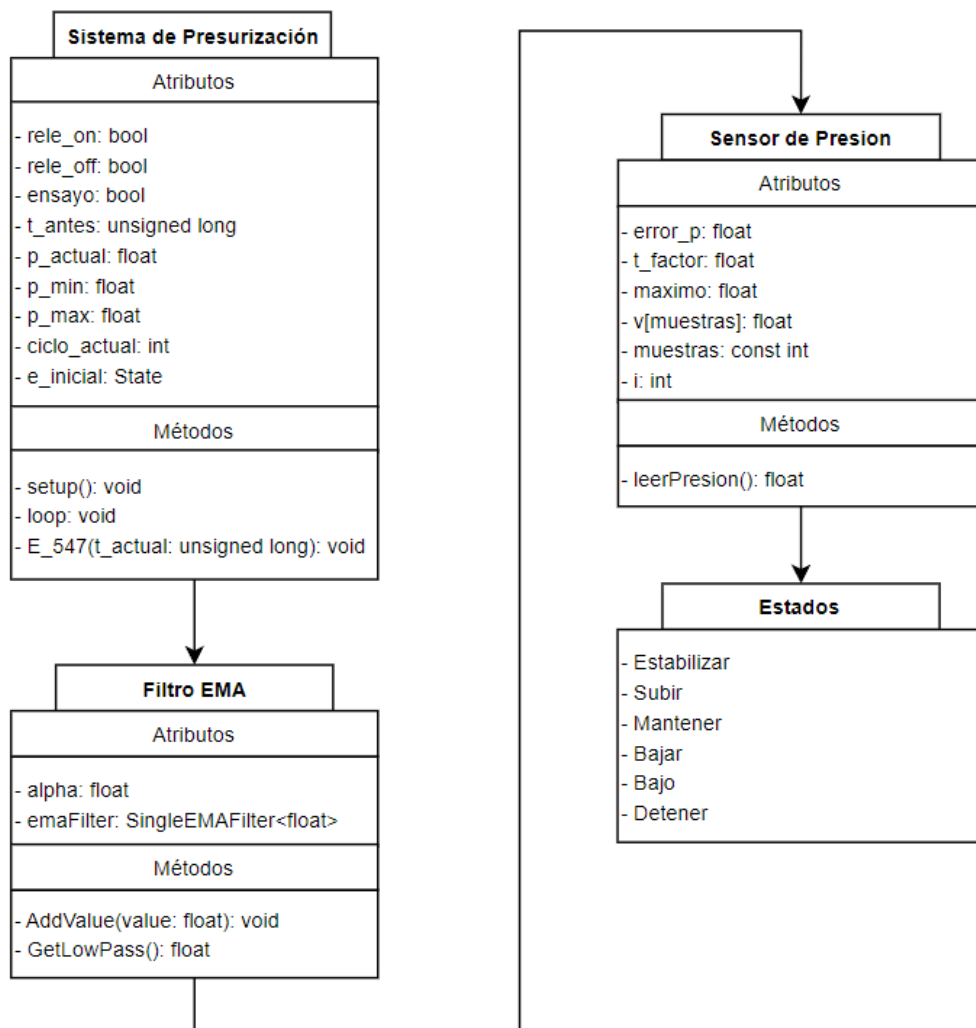


Figura 55 Diagramas de clase código Arduino

7. CONCLUSIONES

Los objetivos planteados para este proyecto fueron los siguientes:

- a. Control de presurización de ensayos de presión.
- b. Selección del tipo de ensayo mediante el ordenador.
- c. Diseño e implementación física y funcional del sistema, teniendo en cuenta las protecciones necesarias.

Durante la realización del proyecto, se observó la necesidad de un sistema de control con realimentación, la creación de una placa de control integrada y la realización de pruebas de control antes de llevar a cabo los ensayos pertinentes mencionados.

Control de presurización de ensayos de presión (a). Para cumplir este objetivo, se realizó el estudio de los componentes existentes, como el variador de frecuencia y su funcionamiento con el ventilador. Después del estudio del variador, se procedió a analizar el filtrado de la señal y, una vez obtenido esto, se desarrolló el sistema de realimentación y control del sensor. Durante el proyecto, se realizaron pruebas in situ, ya que sin acceso a la cámara montada no habría sido posible realizar varios estudios importantes y necesarios dentro del proyecto, como el controlador y, por ende, la programación de este sistema.

Selección del tipo de ensayo mediante el ordenador (b). Este objetivo se logró mediante la programación y el control desde el software de programación mediante comandos. A cada proyecto se le asignó un código que se introduce por el puerto serie para iniciar el ensayo pertinente.

Diseño e implementación física y funcional del sistema (c). Se llegó a montar el circuito físicamente, sin embargo, no se consiguió, a la fecha de entrega de este proyecto, imprimir la placa PCB que reemplazará el circuito montado para mejorar su funcionamiento. Uno de los problemas encontrados para el funcionamiento fueron las interferencias de ruido, las cuales se pretenden mitigar con el circuito integrado. Se tuvieron en cuenta las protecciones necesarias para el sistema, tanto desde el variador de frecuencia como desde el código, aunque se planea aplicar más protecciones físicas. Además, el sistema fue programado y diseñado para funcionar con un Arduino Uno R4, el cual usa un microprocesador diferente a sus predecesores, lo que requirió algunas variaciones en el código. Sin embargo, la placa PCB general tendrá un microcontrolador ESP32, por lo que cuando se disponga de esta se tendrá que modificar el código para adaptarlo a las necesidades del ESP32.

Al final de este informe se incluyen dos anexos, el primer anexo es el plano del diseño de la PCB con todos los circuitos implementados para su conjunto, y un segundo anexo, el cual consta de un documento el cual acredita la participación en el proyecto firmado por el profesor encargado de este.

El proyecto es continuo y constante. Aunque se cuenta con el equipo necesario para su funcionamiento, el diseño de la placa PCB será impreso y aplicado, y se realizarán mejoras continuas a medida que sean necesarias. También se mejorarán los puntos débiles del proyecto y se añadirán nuevos componentes. Por ejemplo, uno de los ensayos requiere una rápida pérdida de presión, por lo que se planea añadir un actuador eléctrico. Además, en el futuro, las paredes se podrían ampliar en altura, de tres a cuatro metros, lo que requerirá más sensores de presión. El diseño de la placa ya contempla estas adiciones, aunque el código aún no incluye estas modificaciones, lo cual se realizará cuando sea necesario.

8. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los objetivos de este Trabajo de Fin de Grado se presentan los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y metas de la agenda 2030 (OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE, 2024):

- Objetivo 7 – Energía asequible y no contaminante

- Meta 7.3 – De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética



- Contribución – En este proyecto se hace uso de un variador de frecuencia, un dispositivo diseñado para ser eficiente energéticamente. Como se ha mencionado en el desarrollo, este dispositivo tiene un consumo energético que varía entre un 20% y un 70%, dependiendo de las necesidades específicas de su aplicación. En este proyecto, el variador de frecuencia alimenta un ventilador y controla su velocidad de manera precisa según las demandas del control. Esto no solo optimiza el ahorro energético, sino que también maximiza el rendimiento del sistema. El diseño de los variadores de frecuencia permite arranques y paradas suaves del ventilador, lo que evita el estrés mecánico en los motores y, por ende, prolonga su vida útil. Esta capacidad de control preciso y eficiente es esencial para mantener la integridad del equipo y reducir costos de mantenimiento a largo plazo.

- Objetivo 9 – Industria, innovación e infraestructura

- Meta 9.1 – Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, incluidas infraestructuras regionales y transfronterizas, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo hincapié en el acceso asequible y equitativo para todos



- Contribución – Al ser un sistema de control automatizado y de precisión compuesto por un microcontrolador y un variador de frecuencia, mejora la calidad y la infraestructura del proyecto y de su manejo. Además, el proyecto se puede considerar como tecnología avanzada, ya que está diseñado para realizar ensayos bajo la supervisión de una persona, pero sin que esta tenga que intervenir directamente en la estructura o el control.

Al ser un proyecto meramente eléctrico, no se producen emisiones de gases de efecto invernadero, lo que contribuye significativamente a la sostenibilidad del medio ambiente. Este enfoque es crucial en la lucha contra el cambio climático, ya que reduce la huella de carbono asociada con los procesos industriales y de ensayo. Además, los equipos utilizados en el proyecto requieren poco mantenimiento y tienen una vida útil prolongada. Esto no solo reduce los costos operativos, sino que también mejora la resiliencia de la infraestructura. Equipos duraderos y de bajo mantenimiento son fundamentales para garantizar la continuidad y fiabilidad de las operaciones a largo plazo.

9. BIBLIOGRAFÍA

AENOR. (2000). *UNE-EN 12155 Norma española*. Madrid: AENOR.

AENOR. (2002). *UNE-EN 12865 Norma Española*. Madrid: AENOR.

Antoneac, R. C. (2020). *MODELADO Y DISEÑO DE CONTROL DE TRAYECTORIA DE UN VEHÍCULO MEDIANTE ARDUINO*. Obtenido de <https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/155029/Antoneac%20Antoneac%20-%20Modelado%20y%20dise%C3%B1o%20de%20una%20estrategia%20de%20control%20de%20trayectoria%20de%20un%20vehiculo%20mediante%20Arduin.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Arduino® UNO R4 WiFi. (2024). (Arduino Store) Obtenido de <https://store.arduino.cc/products/uno-r4-wifi>

Areny, R. P. (2024). *Sensores y acondicionadores de señal*. marcombo.

Automation, R. (Octubre de 2014). *Cuándo utilizar un arrancador suave o un variador de frecuencia variable de CA*. Recuperado el 2024, de https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/150-wp007_-es-p.pdf#:~:text=URL%3A%20https%3A%2F%2Fliterature.rockwellautomation.com%2Fidc%2Fgroups%2Fliterature%2Fdocuments%2Fwp%2F150

AutoSolar. (2024). *¿Qué es un Variador de Frecuencia?* Obtenido de <https://autosolar.es/aspectos-tecnicos/que-es-un-variador-de-frecuencia>

Beningo, J. (21 de 01 de 2020). *Cómo seleccionar y usar el módulo ESP32 con Wi-Fi/Bluetooth adecuado para una aplicación de IoT industrial*. (DigiKey) Obtenido de <https://www.digikey.es/es/articles/how-to-select-and-use-the-right-esp32-wi-fi-bluetooth-module>

Control, I. d.-G. (2024). *Instrumentación*. Obtenido de https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2005/course/section/1735/I_1%20Sensores_OCW_2021.pdf

Corefluid. (2024). *Ventilador Sodeca modelo CAS-S-254-2T-3 IE3*. (Corefluid) Obtenido de <https://www.corefluid.es/product/ventilador-sodeca-modelo-cas-s-254-2t-3-ie3/>

educación, C. a. (2024). *Medidor de Nivel de Agua por Presión con Arduino*. Obtenido de <https://controlautomaticoeducacion.com/arduino/medidor-de-nivel-de-agua-por-presion-con-arduino/>

Ejemplos de grados de protección IP comunes como IP65 e IP66. (2024). (Auer Signal) Obtenido de <https://www.auersignal.com/es/datos-tecnicos/normas/grados-de-proteccion-ip/#:~:text=%C2%BFQU%C3%89%20SIGNIFICA%20EL%20GRADO%20DE,contra%20la%20entrada%20de%20agua.>

Electric, S. (1999). *Universidad de Murcia*. Recuperado el 2024, de <https://www.um.es/docencia/mmc/pdf/telesquemario.pdf>

- Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electronicos 8va Edición*. México: Pearson Educación.
- Freescale Semiconductor, I. (13 de 10 de 2012). *MPX5010*. Obtenido de <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPX5010.pdf>
- Fuente, R. L. (2024). *Control digital de luminosidad de una estancia usando Arduino*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Gato, F. Z. (2020). *Diseño de controladores PID*. (Universidad de Coruña) Obtenido de https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/25824/Zayas_Gato_2020_Dise%C3%B1o_de_controladores_PID.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- International, A. (2000). *ASTM E-547 Standard Test Method for Water Penetration of Exterior Windows, Skylights, Doors, and Curtain Walls by Cyclic Static Air Pressure Difference*. ASTM International.
- International, A. (2016). *ASTM E-331 Standard Test Method for Water Penetration of Exterior Windows, Skylights, Doors, and Curtain Walls by Uniform Static Air Pressure Difference*. ASTM International.
- Llamas, L. (24 de Marzo de 2014). *Filtro paso bajo y paso alto exponencial (EMA) en Arduino*. (Luis Llamas Ingeniería, informática y diseño) Obtenido de <https://www.luisllamas.es/arduino-paso-bajo-exponencial/>
- Marcos, M. P. (Febrero de 2009). *Ventiladores*. Obtenido de https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/40262/mod_resource/content/1/maquinas_fluidos/tema-11-ventiladores.pdf
- Method, N. (1980). *NT BUILD 116: Windows, Window-Doors, External doors, Facades: Pulsating aire pressure test*. Nordtest Method.
- Moisés, A. G., & Ausejo, S. T. (19 de Junio de 2017). *Diseño y construcción de un robot auto-balanceado mediante Arduino*. Obtenido de https://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/24731/TFG_vfinal_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Motores Eléctricos Trifásicos: Estándares de Eficiencia de IE1 a IE5*. (2024). (NIVIHE: motores y accionamientos) Obtenido de <https://motores-electricos.com.ar/motores-electricos-trifasicos-estandares-de-eficiencia-de-ie1-a-ie5/#:~:text=La%20clase%20IE3%3A,85%25%20y%20el%2090%25>.
- NXP. (10 de 2012). *MPX5010 Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrate*. Obtenido de Technical Data MPX5010 Pressure: <https://www.mouser.es/datasheet/2/302/MPX5010-3139395.pdf>
- OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE*. (2024). (Naciones Unidas) Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Optoacoplador, que és y como funciona*. (2024). (HETPRO Herramientas tecnológicas profesionales) Obtenido de <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/optoacoplador/>

- Pavlov, L. (2018). *Proyecto de levitación en túnel de viento con control PID sobre ARDUINO*. Obtenido de GITHUB: <https://github.com/DopplerPavlovTichno/LEVITACION>
- S&P. (07 de Enero de 2020). *¿Qué es y para qué sirve un variador de frecuencia?* (S&P) Obtenido de <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/variador-de-frecuencia/>
- SEAS, C. (22 de Agosto de 2019). *El Relé: para qué es, para qué sirve y qué tipos existen*. (Blog SEAS) Obtenido de <https://www.seas.es/blog/automatizacion/el-rele-para-que-es-para-que-sirve-y-que-tipos-existen/>
- Sensores de medida*. (2024). (Sensing) Obtenido de <https://sensores-de-medida.es/medicion/sensores-y-transductores/sensores-de-presion/>
- SODECA. (28 de 06 de 2022). *CONVERTIDOR DE FRECUENCIA*. Obtenido de https://d7rh5s3nxmpy4.cloudfront.net/CMP2671/files/0000003910_VSD_IP20_Installation_and_Operation_Manual.pdf
- SODECA. (2024). *VSD3/A-RFT - VSD1/A-RFM*. Obtenido de SODECA: <https://www.sodeca.com/es/productos/vsd3-a-rft-vsd1-a-rfm-p1000000152#prod>
- SolerPalau. (21 de Abril de 2017). *Ventiladores centrifugos: tipos y características*. (S&P) Obtenido de <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/ventiladores-centrifugos/>
- STANDARD, S. (2020). *SS 654:2020 Code of practice for curtain walls*. Singapore: Standards Council.
- Standard™, A. Z. (2008). *AS/NZS 4284:2008 Testing of building facades*. New Zealand: Australian/New Zealand Standard™.
- Tolocka, E. (09 de 05 de 2015). *Módulo de 4 relés para Arduino*. Obtenido de profe Tolocka: <https://www.profetolocka.com.ar/2015/05/09/modulo-de-4-reles-para-arduino/>
- Torres, A. J. (Junio de 2019). *Desarrollo e implementación de un invernadero inteligente controlado con arduino*. Obtenido de <https://crea.ujaen.es/jspui/bitstream/10953.1/14003/1/MEMORIA%20TFG%20ANTONIO%20JESUS%20MANAS.pdf>
- ubicua, M. d. (2024). *Sensores y aplicaciones*. Obtenido de https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/13867/mod_resource/content/2/2019_Sensores.pdf
- Urquijo, S. M. (2016). *Automatización de un túnel de viento para estudios de comportamiento de vuelo de insectos*. Obtenido de Universidad Tecnológica de Pereira: Facultad de Ingeniería Electrónica: <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/8ff116ba-1253-40c1-a221-c172c420dff3/content>
- Variadores de Frecuencia. Ventajas y Desventajas*. (2023). (Motores y Generadores) Obtenido de <https://motoresygeneradores.com/variadores-de-frecuencia-ventajas-y-desventajas/>

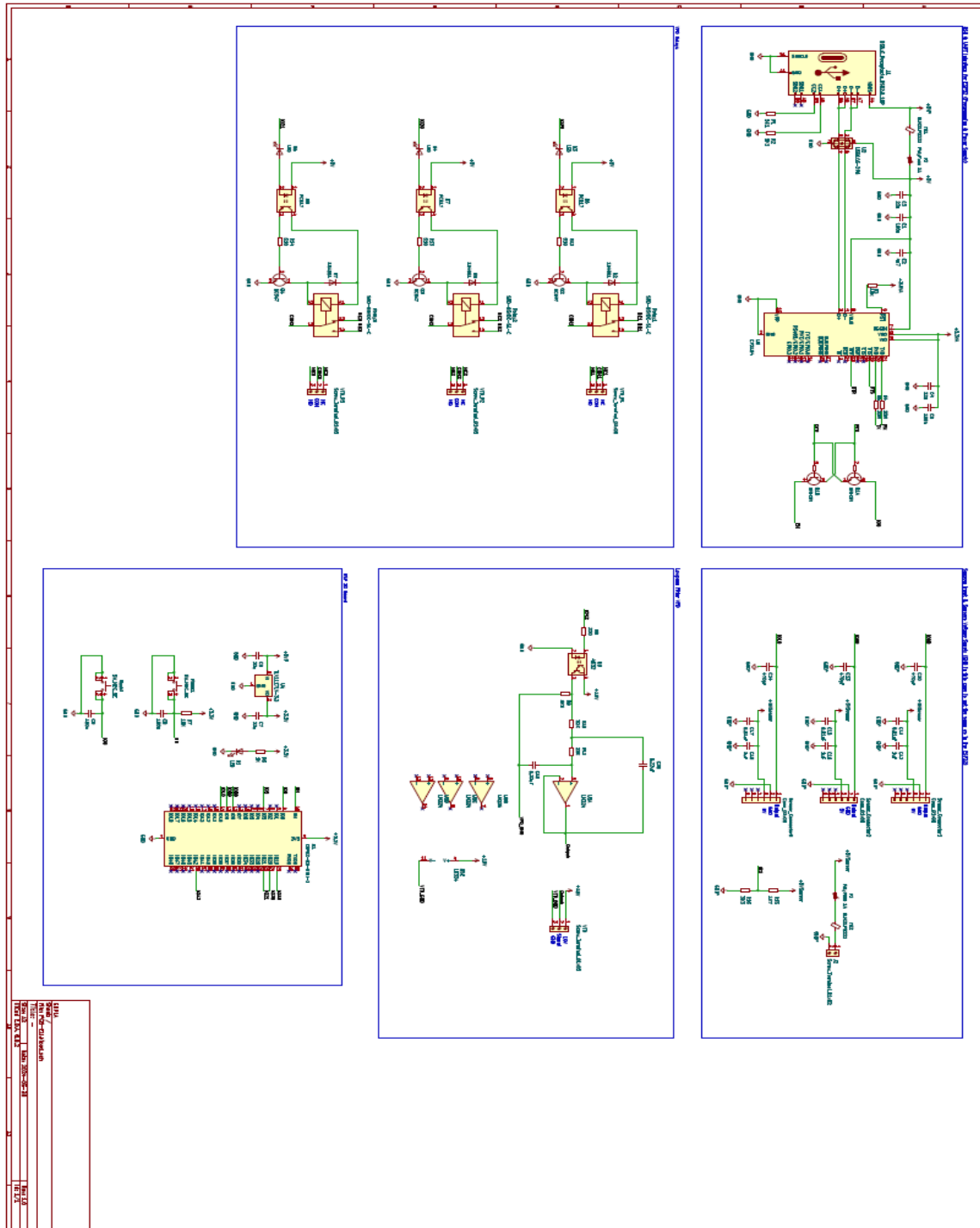
Vishay Intertechnology, I. (01 de Enero de 2024). 4N32, 4N33. Obtenido de <https://www.vishay.com/docs/81865/4n324n33.pdf>

Voltione. (2024). *¿Qué es un relé y para qué sirve?* Obtenido de <https://voltione.com/pages/que-es-rele>

10. ANEXOS

10.1. ANEXO 1: CIRCUITO ELÉCTRICO PCB

El plano se adjuntará a este documento



10.2. ANEXO 2

A quién pueda interesar

30 de mayo de 2024

Mediante la presente hago contar mi reconocimiento a la valiosa labor, desarrollada por Dña. **Elizabeth García Ortiz**, para la puesta en marcha de la instalación de ensayos de estanqueidad en muestras de fachada vinculada al proyecto de generación de conocimiento *PID2021-122203OB-I00 “Validación experimental de una homologación universal de estanquidad para fachadas y parametrización de los datos necesarios para su aplicación en España”*.

A lo largo del curso académico 2023/2024 y en el marco de la realización de su Trabajo Fin de Grado titulado *“Control de Presurización de una cámara cerrada”*, correspondiente a la titulación de Grado en Ingeniería Mecatrónica de la Escuela Universitaria Politécnica – La Almunia, Elizabeth ha resuelto múltiples y variados desafíos que han surgido para la adecuada puesta a punto de la presurización de la instalación, demostrando en todo momento una total disposición y su elevada capacidad de trabajo.

Por todo ello, me es grato suscribir este reconocimiento.

Sin otro particular, reciban un cordial saludo.

*PEREZ BELLA JOSE MARIA - DNI ***8913**, a fecha 30/05/2024. Firmado digitalmente mediante certificado electrónico vigente emitido por AC Sector Público*

Prof. Dr. José M. Pérez Bella
Área de conocimiento de Ingeniería de la Construcción
Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad de Zaragoza

Proyecto PID2021-122203OB-I00 financiado por:

