



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Instrumentación y  
actualización de un banco de  
pruebas para las materias de  
Instrumentación y Dinámica  
de procesos.**

**MATERIAL DIDÁCTICO**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero en Mecatrónica**

**P R E S E N T A**

Said Ulises Pérez Sierra

**ASESOR DE MATERIAL DIDÁCTICO**

M.A. Luis Yair Bautista Blanco



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018**

# Índice

Índice.....	1
Índice de figuras.....	2
Índice de tablas.....	4
1. Surgimiento del proyecto.....	5
2. Antecedentes.....	6
2.1 Sensores de proximidad.....	7
2.1.1 Tipos de sensores de proximidad.....	7
2.1.2 Aplicaciones de los sensores de proximidad.....	13
2.2 Sensores de flujo.....	14
2.2.1 Tipos de sensores de flujo.....	16
2.2.2 Aplicaciones de sensores de flujo.....	27
2.3 Servomotor.....	29
2.3.1 Aplicaciones del servomotor.....	34
2.4 Control.....	35
2.4.1 Control PID.....	38
2.4.2 Implicaciones físicas del control PID.....	40
2.5 C#.....	42
3. Bancos de prueba.....	44
3.1 Bancos de pruebas en la educación.....	44
4. Objetivo.....	46
4.1 Objetivos específicos.....	46
5. Justificación.....	47
6. Diseño conceptual de la Servo válvula.....	48
6.1 Necesidades.....	49
6.1.1 Requerimientos.....	50
6.1.2 Especificaciones.....	51
6.1.3 Concepto.....	53
6.2 Solución.....	65
6.3 Construcción.....	68
7. Diseño del sistema.....	80
7.1 Sistema de actuación.....	81
7.2 Sistema de sensores.....	86
7.3 Sistema de control.....	90
7.4 Interfaz.....	93
8. Resultados.....	98
8.1 Manual de uso.....	98
8.2 Pruebas del banco y resultados.....	104
8.3 Trabajo a futuro.....	117
9. Conclusión.....	118
10. Bibliografía.....	121
11. Anexo.....	126

## Índice de figuras.

Figura 2.1 Tipos de sensores.....	7
Figura 2.2 Efecto Doppler en sensor de proximidad.....	8
Figura 2.3 Conexión de sensor óptico.....	9
Figura 2.4 Sensor capacitivo en la industria.....	10
Figura 2.5 Funcionamiento de las corrientes parasitas o de Foucault.....	11
Figura 2.6 Esquema simple del funcionamiento del sensor inductivo-magnético.....	12
Figura 2.7 Estructura básica del sensor de efecto hall.....	13
Figura 2.8 Ejemplos de aplicación de los sensores de proximidad.....	14
Figura 2.9 Relación entre el comportamiento del flujo y el número de Reynolds.....	15
Figura 2.10 Tipos de sensores de flujo.....	16
Figura 2.11 Tipos de orificio para la placa.....	17
Figura 2.12 Tubo Venturi.....	18
Figura 2.13 Tubo de Dall.....	18
Figura 2.14 Tubo de Prandtl.....	19
Figura 2.15 Tobera.....	20
Figura 2.16 Rotámetro.....	21
Figura 2.17 Sensor de flujo tipo turbina común.....	22
Figura 2.18 Esquema de funcionamiento de un sensor de desplazamiento positivo.....	23
Figura 2.19 Esquema de funcionamiento del sensor magnético.....	24
Figura 2.20 Configuración de un sensor de flujo ultrasónico basado en efecto Doppler.....	25
Figura 2.21 Formación y desprendimiento de vórtices.....	25
Figura 2.22 Esquemático de sensores de vórtice.....	26
Figura 2.23 Esquemático de sensores de coriolis.....	27
Figura 2.24 Aplicaciones de sensores de flujo.....	28
Figura 2.25 Componentes de un servomotor.....	30
Figura 2.26 Esquema general de un servomotor completo en funcionamiento.....	31
Figura 2.27 Tabla de servomotores.....	31
Figura 2.28 Conexión clásica de un servomotor.....	32
Figura 2.29 Definición de ciclo de trabajo.....	32
Figura 2.30 Aplicaciones de los servomotores.....	34
Figura 2.31 Esquema de control de lazo abierto.....	36
Figura 2.32 Esquema de control de lazo cerrado.....	37
Figura 2.33 Diagrama de bloques del control PID.....	38
Figura 2.34 Fenómeno de Sobre Oscilación con diferentes ganancias proporcionales.....	40
Figura 2.35 Arquitectura .NET.....	42
Figura 3.1 Interfaz de un banco de pruebas de motores.....	45
Figura 6.1 Ejemplo de servoválvulas.....	48
Figura 6.2 Primera opción de solución de cople.....	54
Figura 6.3 Segunda opción de solución de cople.....	55
Figura 6.4 Tercera opción de solución de cople.....	56
Figura 6.5 Primera opción de solución de sujetador de servo.....	57

Figura 6.6 Parte trasera del capuchón donde se ve el espacio para el cable.....	58
Figura 6.7 Esquema de la válvula con capuchón.....	58
Figura 6.8 Segunda opción de solución para el sujetador del servo.....	59
Figura 6.9 Esquema del servomotor con la pieza de orificios.....	60
Figura 6.10 Primera opción de solución para el sujetador de válvula.....	61
Figura 6.11 Esquema del servomotor con la pieza de la válvula en forma de sabana.....	62
Figura 6.12 Segunda opción de solución para el sujetador de válvula.....	62
Figura 6.13 Esquema del servomotor con la piezas tipo pinza.....	63
Figura 6.14 tercera opción de solución para el sujetador de válvula.....	64
Figura 6.15 cuarta opción de solución para el sujetador de válvula.....	65
Figura 6.16 Vista isométrica del modelado 3D de la pieza del sujetador del servomotor.....	69
Figura 6.17 Vista superior del modelado 3D de la pieza del sujetador del servomotor.....	69
Figura 6.18 Vista isométrica del modelado 3D de la pieza del sujetador de la válvula.....	70
Figura 6.19 Vista superior del modelado 3D de la pieza del sujetador de la válvula.....	70
Figura 6.20 Vista isométrica del modelado 3D de la pieza del cople.....	71
Figura 6.21 Vista superior del modelado 3D de la pieza del cople.....	71
Figura 6.22 Vista isométrica del modelado 3D ensamblado.....	72
Figura 6.23 Vistas del modelado 3D ensamblado.....	73
Figura 6.24 Plano de corte.....	74
Figura 6.25 Piezas reales salidas del corte laser, válvulas y conexiones.....	75
Figura 6.26 Primera versión de la Servoválvula.....	76
Figura 6.27 Problema de torsión de la servoválvula.....	77
Figura 6.28 Versión final de la servoválvula.....	78
Figura 7.1 Interacciones de los sistemas principales.....	79
Figura 7.2 Interacciones de los subsistemas con mayor detalle.....	80
Figura 7.3 HD-1501MG.....	81
Figura 7.4 PCA9685.....	82
Figura 7.5 Conexión de la etapa de potencia PCA9685.....	85
Figura 7.6 fuente de voltaje HTS-50FE-5.....	86
Figura 7.7 YF-S201.....	87
Figura 7.8 Conexión del sensor YF-S201.....	88
Figura 7.9 Funcionamiento de HC-SR04.....	88
Figura 7.10 Conexión de HC-SR04.....	90
Figura 7.11 Interfaz final del banco de pruebas.....	93
Figura 7.12 Interacciones internas dela interfaz.....	94
Figura 7.13 Interacciones usuario – interfaz.....	96
Figura 8.1 Válvulas en posición abierta.....	98
Figura 8.2 Conexión a la energía eléctrica.....	99
Figura 8.3 Conexión entre computadora y arduino.....	99
Figura 8.4 Dos flujos cayendo en el reposadero.....	100
Figura 8.5 Ejecutable de GUIServines.....	100
Figura 8.6 Interfaz del banco de pruebas.....	101
Figura 8.7 Seleccionar puerto serial.....	101

Figura 8.8 Ejemplo al escoger el modo 1.....	102
Figura 8.9 Ejemplo al escoger el modo 2.....	103
Figura 8.10 Control en modo 1 pidiendo 5 [L/min] .....	104
Figura 8.11 Control en modo 1 pidiendo 4 [L/min] .....	105
Figura 8.12 Control en modo 1 pidiendo 8 [L/min] .....	105
Figura 8.13 Control en modo 1 pidiendo 9 [L/min] .....	106
Figura 8.14 Control en modo 1 pidiendo flujo máximo [L/min] .....	107
Figura 8.15 Control en modo 2 con proporcional pidiendo 30 [cm] .....	108
Figura 8.16 Tanque en 30 [cm]. .....	109
Figura 8.17 Control de altura con proporcional pequeña.....	109
Figura 8.18 Tanque en 30 [cm] con sobrepaso por proporcional pequeña.....	110
Figura 8.19 Error en estado permanente grande por la proporcional pequeña.....	111
Figura 8.20 Error en estado permanente eliminado por la parte integral.....	112
Figura 8.21 Tanque en 30 [cm] que aumenta el valor por mucha integral.....	112
Figura 8.22 Control PID completo.....	113
Figura 8.23 Control PID en estado estable con error en estado permanente.....	114
Figura 8.24 Sistema inestable por derivativo.....	115
Figura 8.25 Sistema regresando a la estabilidad cuando se suprime la derivativa.....	116

## Índice de tablas

Tabla 1. Tabla de necesidades requerimientos.....	50
Tabla 2. Tabla de requerimientos especificaciones.....	51
Tabla 3. Tabla de valores y justificación.....	52
Tabla 4. Tabla de efectos de las K de ganancia en el sistema específico.....	91

## 1. Surgimiento del proyecto

El profesor de química responsable del inicio del proyecto plantea la problemática principal de la siguiente manera: *“Después de dar por un par de semestres la clase teórica sentí la necesidad de que los alumnos tuvieran una experiencia más real, sobre todo por la parte de instrumentación y señales, no hay un protocolo experimental para dinámica de procesos y control y rara vez se plantean balances dinámicos en el laboratorio, así que decidí construir un tanque con control de nivel [El banco prueba anterior al desarrollado en este trabajo] para que los alumnos vieran como funciona realmente un control PID que lo conforma más allá de la expresión matemática y demostrar que los fenómenos que se estudian en clase principalmente de sintonización realmente ocurren en la práctica”*

La necesidad de mostrar de manera física todas las implicaciones de una materia como dinámica de procesos que es tan teórica es un reto para los académicos de la materia. Un banco de pruebas que permita ver a los alumnos diferentes fenómenos en un control PID, como oscilaciones inestables o errores permanentes lo cual es indispensable para un aprendizaje integral en la materia y un apoyo emergente para el docente.

Por otro lado la materia de instrumentación tiene un gran impedimento en el aprendizaje del alumno, los sensores a estudiar no siempre son accesibles en precio o necesitan condiciones específicas para su correcto funcionamiento, hay veces que es imposible darle al alumno una parte práctica en el curso debido a que no se tienen las instalaciones para su correcta implementación, el formato de bancos de pruebas para la materia de instrumentación es una nueva herramienta que permite el estudio práctico de sensores con alguna necesidad específica para su uso, tal es el caso de los sensores de flujo que necesitan circulación de fluido, debido a su espacio reducido y control asegurado hace de los bancos una materia muy versátil y poco utilizada en instrumentación.

## 2. Antecedentes

El tipo de sensores y actuadores usados en el banco de pruebas son de vital importancia para la correcta realización del mismo, se necesita tener un sustento teórico y ver el abanico de posibilidades para tener un criterio amplio que permita tomar decisiones al momento de escoger un sensor, todo esto con el objetivo de tener una implementación real con un error mínimo que permita tener resultados adecuados para que puedan ser usados en cálculos posteriores.

Para un mejor entendimiento del siguiente trabajo se necesitan antecedentes respecto a que es un actuador y un sensor.

Actuador.

*“Las magnitudes físicas que pueden ser transformadas en otro tipo de magnitudes con propiedades que logran interactuar con el entorno; al final dichas propiedades se reflejan como un cambio en el estado de un sistema. Las variables involucradas con estas magnitudes suelen ser de fuerza, posición, velocidad y aceleración. Los dispositivos que realizan la transformación de magnitudes se conocen como actuadores y se clasifican según su funcionamiento en eléctricos, hidráulicos y neumáticos” [1]*

En resumen podemos decir que un actuador es el elemento capaz de recibir una señal y convertirla en una acción, ya sea movimiento, sonido, luz, entre otras.

Sensor.

Son elementos que proveen información sobre el sistema (Señales de entrada).

Se pueden clasificar en dos grandes grupos.

- a) Aquellos para detectar o medir cambios de variables físicas como temperatura, presión, PH, salinidad, entre otras.
- b) Aquellos para detectar presencia o el movimiento de cuerpos u objetos con o sin contacto.

Y están basados en transductores. Un transductor es un dispositivo que es capaz de transformar una energía en otra diferente.

## 2.1 Sensores de proximidad

Un sensor de proximidad es el cual sin la necesidad de estar en contacto puede arrojar información acerca de la existencia de un objeto y si es más específico de la distancia total a la que se encuentra debido a propiedades específicas del objeto en cuestión, sus rangos son variables dependiendo del sensor desde milímetros hasta kilómetros todo esto dependiendo de la clase de tecnología a utilizar hasta el precio del mismo.

Los sensores de proximidad se pueden confundir fácilmente con los sensores de posición por sus similitudes de funcionamiento, la diferencia reside en que el sensor de proximidad solo se encarga de mandar la posición en la que se encuentra en el momento respecto al objeto en cuestión, a diferencia del de posición que tiene un sistema absoluto de posicionamiento tal es el caso de un potenciómetro o un encoder.

### 2.1.1 Tipos de sensores de proximidad.

Dependiendo el tipo de aplicación que se necesite será la tecnología que tendrá el sensor de proximidad, la clasificación a grandes rasgos se presenta en la figura 1.1

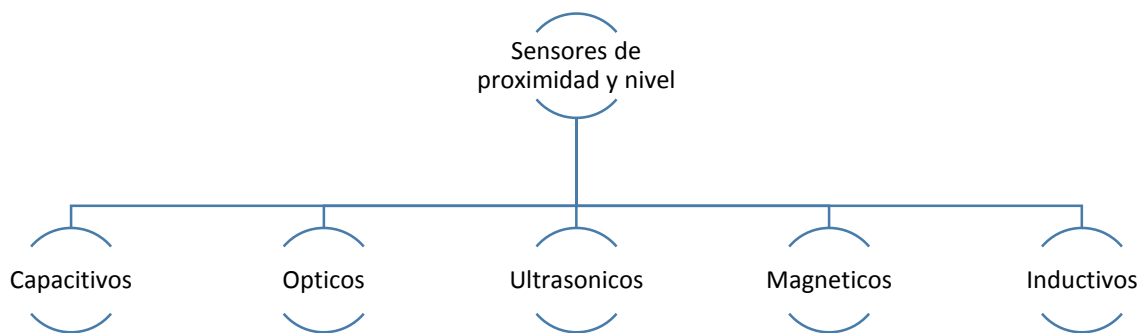


Figura 2.1 Tipos de sensores de proximidad.



## Sensores ultrasónicos.

Los sensores ultrasónicos son sensores generalmente utilizados en sistemas en los cuales no puede haber interferencia de contacto entre sensor-elementos ya sea por su cualidades físicas por ejemplo Fragilidad, temperatura, pureza del material, entre otras.; o por riesgos externos como ambientes poco aptos para tener un sensor ya sea por humedad, temperatura, concentración de gases que puedan interferir, entre otros.

Su funcionamiento consiste en *“Una onda sonora ultrasónica que está por encima de la frecuencia audible para el oído humano, esto es por encima de los 20 KHz aproximadamente, un sensor ultrasónico se auxilia del efecto Doppler, ya que un elemento ultrasónico (considerado como emisor) emite una onda ultrasónica, la cual es absorbida en parte y reflejada en parte por el objeto a medir; así a través de la medición de la atenuación de la onda percibida por el receptor, el tiempo que le toma a ésta ser percibida por el receptor o por la presencia o ausencia de dicha onda en el emisor, es posible obtener características de la variable física que se desea determinar”*[1] en este caso la distancia.

Ahora bien el efecto Doppler consiste en *“Un cambio aparente de frecuencia de la onda sonora respecto al emisor cuando esta es reflejada en un objeto móvil (o partículas inmersas en un fluido)”* [2].

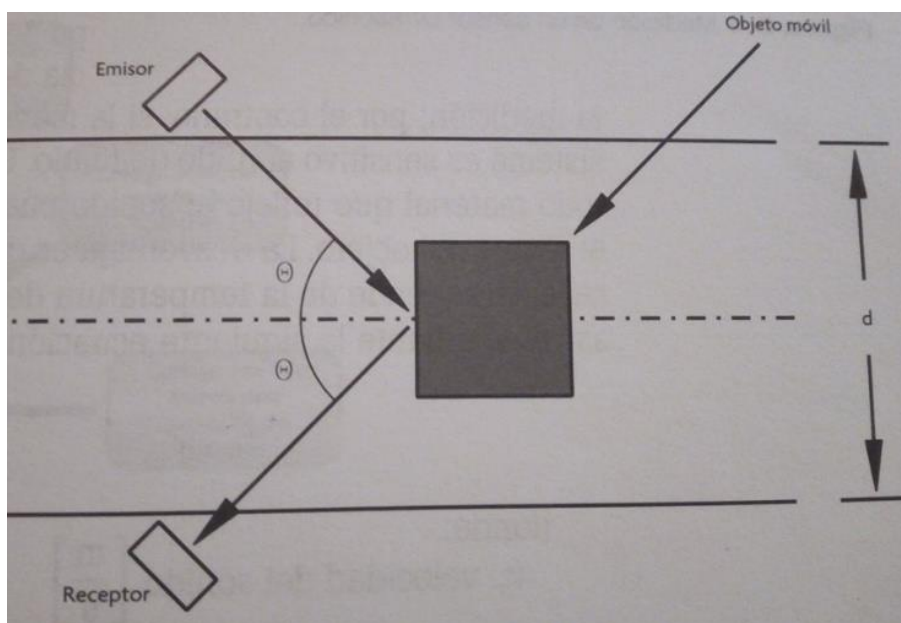


Figura 2.2 Efecto Doppler en sensor de proximidad. [1]

## Sensores Ópticos.

Sensores que dependiendo de su emisor y receptor pueden tener gran rango de detección, usados generalmente como sensores de presencia a corto alcance conocido como sensores de rodaja o moneda esto debido al precio elevado que conlleva aumentar su rango y las condiciones tan específicas que necesitan tales como la perfecta alineación del par emisor- receptor para una detección eficaz.

Como se mencionó al principio del apartado de sensores ópticos, este sensor consiste en un emisor de luz infrarroja y un elemento fotosensible que lleva el nombre de receptor.

Su funcionamiento consiste en un emisor de luz infrarroja que arroja un haz de luz recibido por el receptor, dependiendo de la intensidad de luz recibida hay una diferencia de potencial, esta intensidad de luz se puede modificar disminuyendo la distancia entre ambos o cambiando el juego de resistencias del par emisor-receptor, disminuyendo y aumentando su valor respectivamente, a esta configuración se le conoce como modo activo.

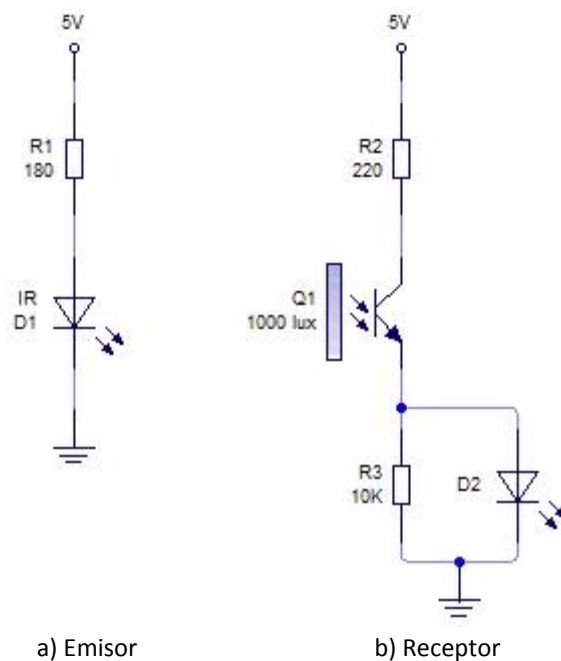


Figura 2.3 Conexión de sensor óptico. [2]

## Sensores capacitivos.

Los sensores capacitivos son versátiles, ya que no solo detectan presencia y proximidad de manera precisa si no también cualidades específicas de conductividad en los materiales, por lo cual es posible detectar casi cualquier tipo de material. Por esta razón son de los sensores más comunes en la industria generalmente para detección de llenado de polvo ya que es el único que puede detectar este tipo de materiales.

Su gran capacidad de detección se debe a su funcionamiento. *“Un sensor de proximidad capacitivo está formado por dos electrodos en forma de discos concéntricos. Cuando un objeto se aproxima al sensor e interactúa con el campo electrostático formado entre estos, cambia la capacitancia equivalente en el circuito. Este cambio de capacitancia produce un cambio de estado en el sensor, activando un circuito oscilador, el cual a su vez dispara el circuito activador que produce a la salida un cambio de estado bajo a estado alto. El campo electrostático producido por los electrodos es alterado de manera distinta si se aproxima un conductor que si se aproxima un material dieléctrico, en materiales dieléctricos la detección es mucho más efectiva, entre más grande sea la constante dieléctrica del material, ya que la capacitancia es directamente proporcional a esta”*[3]



Figura 2.4 Sensor capacitivo en la industria. [3]

## Sensores inductivos.

Los sensores inductivos al igual que los capacitivos tienen gran aceptación en la industria a pesar de tener amplias limitaciones en el corto alcance y al tipo de materiales que pueden detectar ya que su funcionamiento consiste en perturbar el campo magnético producido por una bobina por lo tanto los sensores inductivos solo son capaces de detectar la presencia y/o proximidad de materiales conductores, en estos materiales se induce una corriente de Foucault que reduce en amplitud el campo emitido por la bobina. Las corrientes de Foucault también llamada corrientes parásitas son *“Las corrientes inducidas en el cuerpo conductor por la variación en el flujo magnético. El resultado es la aparición de una f.e.m. que hace circular una corriente en el material conductor.”* [4]

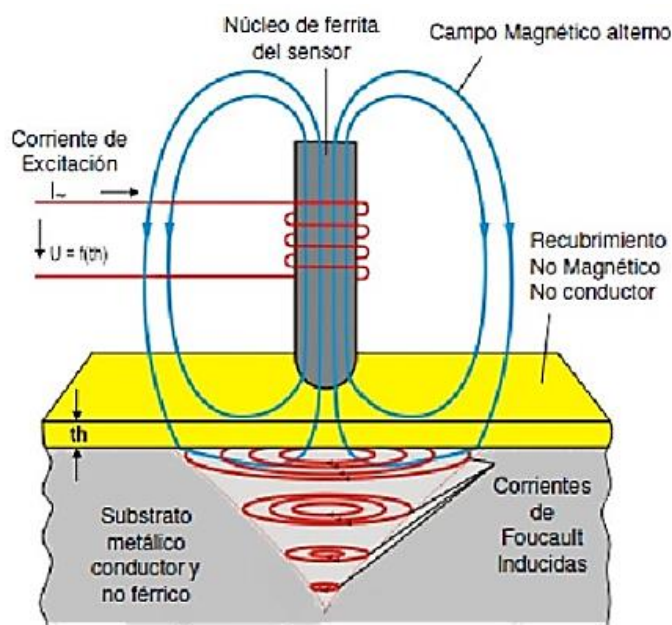


Figura 2.5 Funcionamiento de las corrientes parásitas o de Foucault. [4]

Al tener todos estos cuidados generalmente en la industria son usados con blindaje, que consiste en una banda metálica que rodea la bobina para direccionar de alguna manera el campo magnético hacia adelante y así quitarle sensibilidad lateral, de igual manera su implementación debe tener ciertas precauciones ya que si se trabaja con metales se tienen que usar en áreas donde la viruta metálica no caiga ya que puede afectar el correcto funcionamiento del sensor y en caso de no tener blindaje.

También se recomienda ponerlos a una distancia considerable uno de otro para evitar interferencias entre sensores debido a la ya mencionada sensibilidad lateral.

### Sensores magnéticos.

Son sensores que tienen la capacidad de reaccionar ante campos magnéticos por lo cual solo pueden detectar imanes permanentes, electroimanes y algunos conductores con remanencia magnética, aunque este último de manera extraordinaria y dependiendo de la cantidad de remanencia en el mismo conductor.

En esta categoría hay 2 que destacan para funcionamiento de proximidad, los magnético-inductivos y los de efecto hall.

Los sensores magnético-inductivos son un híbrido que se apoya en el principio de la bobina de los sensores inductivos, su funcionamiento a grandes rasgos consiste en un imán que tiene un campo magnético “nominal” el cual fluctúa ante la cercanía de un material magnético, esto hace que se active un circuito oscilador que a su vez acciona un circuito detector que manda una salida de onda cuadrada, este tren de pulsos es el que tiene la información de si hay un material y a que distancia se encuentra.

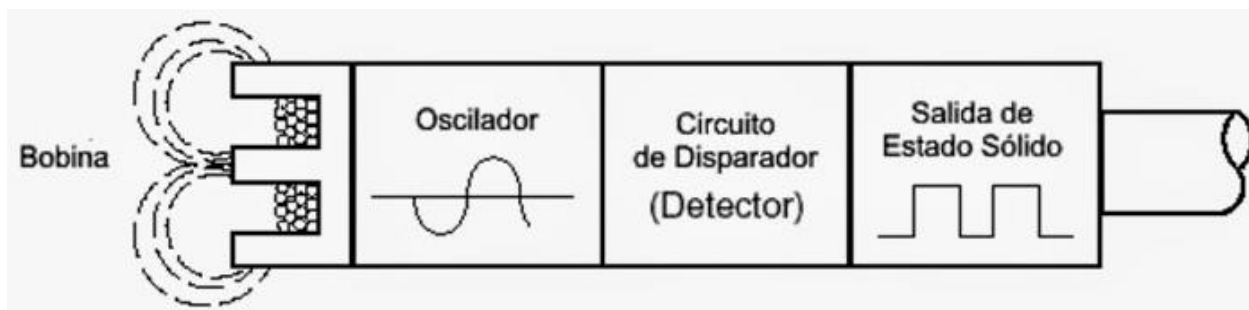


Figura 2.6 Esquema de funcionamiento del sensor inductivo-magnético. [5]

El sensor de efecto hall es un sensor que también puede servir como detector de metales.

*“Es un dispositivo semiconductor que genera un voltaje de salida cuando está expuesto a un campo magnético. La construcción básica consiste en una placa de material semiconductor a través de la cual se hace pasar una corriente. Si se aplica un campo magnético de modo perpendicular a la dirección de la corriente, se generará un voltaje  $V_h$  entre las dos terminales. Esta diferencia en potencial se debe a la separación de carga establecida por la fuerza de Lorenz” [5] a esta diferencia de potencial se le llama voltaje hall.*

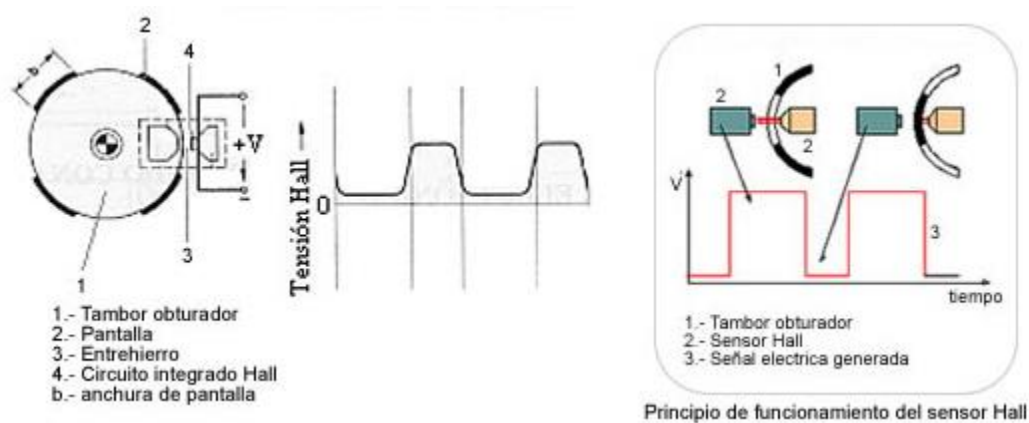


Figura 2.7 Estructura básica del sensor de efecto hall. [6]

### 2.1.2 Aplicaciones de los sensores de proximidad.

La mayoría de las aplicaciones de industria consisten en la identificación de empaquetados, envasado y monitoreo, el saber el número exacto de objetos que recorre o que tienen una característica específica en una línea de producción permite a las compañías un mejor control en el inventario y una manera ágil en la organización de lotes.

Otra aplicación común para estos sensores es en el llenado de contenedores para la industria alimenticia y química, el tener la altura como dato da una noción exacta de la cantidad de solventes, aditivos e ingredientes necesarios para tener una correcta concentración con el objetivo de cumplir con los estándares de calidad.

Actualmente una de las aplicaciones comunes para los sensores de proximidad es en la aplicación de robótica de agentes inteligentes para determinar la clase de obstáculo y la cercanía al mismo para lograr que el robot pueda reaccionar y mandar una acción de control rápida y precisa antes de una colisión, en máquinas industriales como sensores de final de carrera o en la industria automotriz para medir la velocidad del auto.

Y en aplicación de sistemas electrónicos tales como celulares, tabletas, computadoras y dispositivos touch en general.



Figura 2.8 Ejemplos de aplicación de los sensores de proximidad.

## 2.2 Sensores de flujo

Los sensores de flujo son sensores que miden una cantidad de materia, peso o volumen en un cierto intervalo de tiempo, su método de medición es indirecto por lo cual dependiendo de la variable que está midiendo es la precisión del mismo.

*“El flujo se define como la cantidad de sustancia que pasa por una sección determinada durante un instante dado. Por su parte la unidad de medida utilizada en el sistema internacional para cuantificar el flujo es  $m^3/s$ ” [6]*

La detección del flujo sin importar el tipo puede ser hecha de 3 manera diferentes, usando el flujo volumétrico, el flujo másico o la manera más completa que es la forma vectorial en el cual supone un acercamiento más real en donde tienen que ser tomados en cuenta la velocidad y la dirección del fluido esto se hace echando mano de la diferencia de presiones en el conducto o ambiente a medir, ya que el flujo siempre sigue el principio físico de fluir de una zona de mayor a menor presión.

Para estos sensores generalmente por simplicidad se toman ciertas consideraciones de su uso debido a las limitaciones físicas que si fueran tomadas en cuenta aumentarían el precio y la complejidad matemática del modelo del sensor considerablemente.

Tiene que ser un fluido idealmente sin viscosidad como el agua a 1,0020 cP a 20 °C, es decir no se deben tomar en cuenta las fuerzas de fricción que se encuentran internamente en el fluido y entre el contenedor donde fluye, ya que esto significaría que el flujo tiene cambios internos provocados por sí mismo y se opondría a fluir.

La otra consideración es que el flujo está en estado laminar, eso quiere decir que su número de Reynolds tiene obligatoriamente que ser menor a 2000, el único que no necesita el flujo laminar es el sensor de vortex debido a consideraciones específicas en su funcionamiento, el cual se explicará más adelante en el apartado.

*"El número de Reynolds es una combinación adimensional de variables, que pueden utilizarse para predecir si el flujo será laminar o turbulento"* [7] entre estas variables están la velocidad, longitud de la trayectoria del flujo, viscosidad, densidad, entre otras.

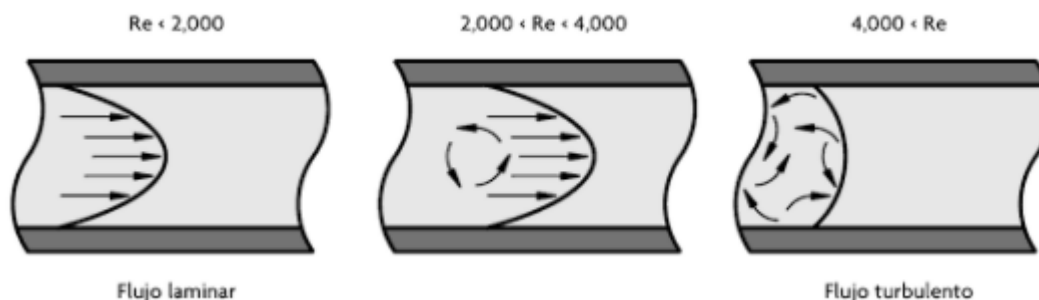


Figura 2.9 Relación entre el comportamiento del flujo y el número de Reynolds. [10]



## 2.2.1 Tipos de sensores de flujo

Los sensores de flujo obtienen la información de manera indirecta usando diferentes propiedades físicas y principios, eso se traduce en una gran variedad y tipos de sensores con toda clase de tecnología y aplicación.

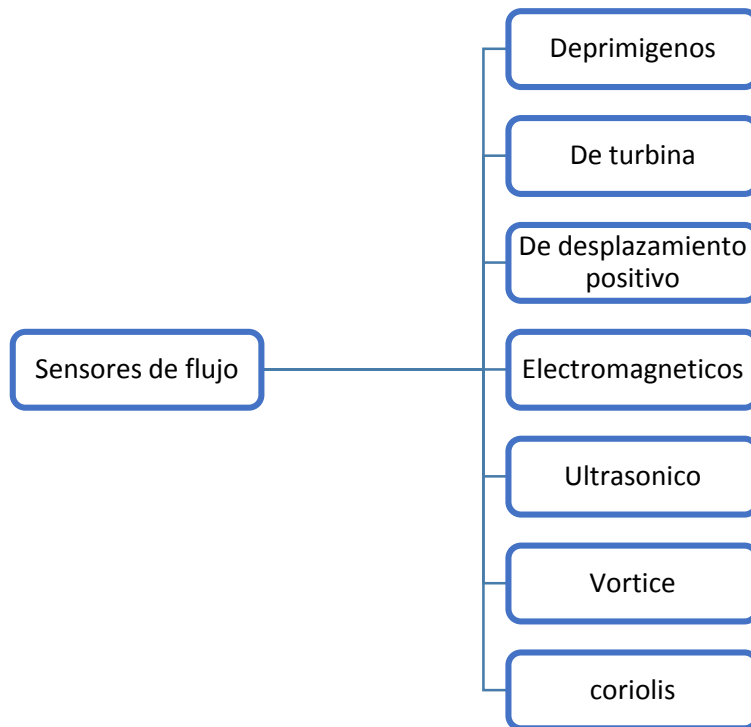


Figura 2.10 Tipos de sensores de flujo.

### Sensores deprimigenos.

Los sensores de flujo más antiguos, de más fácil construcción e implementación para la medición en tuberías, también llamados sensores de presión diferencial.

El funcionamiento de estos sensores es muy sencillo, generalmente todos estos sensores consisten en un “tubo” con alguna obstrucción o cambio en el diámetro de la tubería y se mide antes y después de ese elemento llamado diferencial.

El flujo se puede obtener de manera indirecta conociendo ambas presiones.

Hay muchos tipos de sensores de presión diferencial los más comunes son los siguientes:

#### Placa de orificio

El más barato de producir y el más fácil de construir entre todos los sensores deprimigenos, consiste en una placa en la cual hay un orificio con diámetro menor al nominal de la tubería, donde se mide la presión antes y después del paso del flujo por el orificio, pese a su facilidad de uso y fabricación no tiene una gran precisión debido a que el flujo al pasar por el orificio también choca contra una pared (la parte circundante del orificio) provocando un flujo turbulento, el cual afecta la velocidad y a la presión del flujo.

Hay diferentes posicionamientos y formas del orificio para ayudar a tener una mejor medición y minimizar las turbulencias.

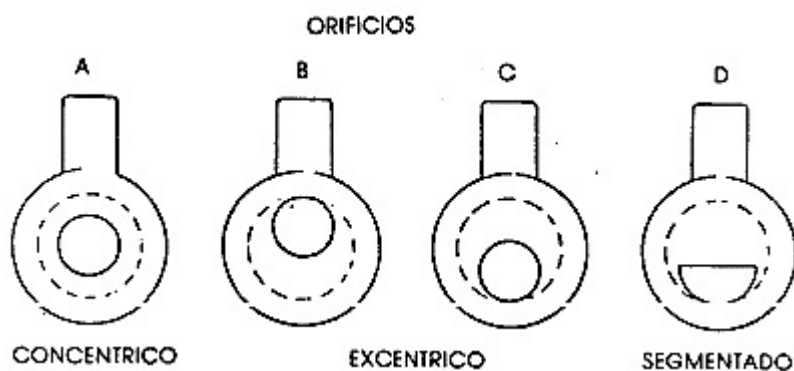


Figura 2.11 Tipos de orificio para la placa. [11]

#### El tubo Venturi

Un tubo Venturi consiste en un tubo con estrangulamiento a la mitad de su longitud, es mucho mejor que el sensor de placa de orificio debido a que aquí el flujo se mantiene sin turbulencias, porque el diámetro va bajando de manera gradual hasta un área mucho menor a la inicial para después regresar al diámetro nominal del tubo. En el tubo Venturi no se mide la presión después del paso del área menor al área mayor si no en el área inicial y en el área estrangulada.

Al área menor de estrangulamiento se le conoce como garganta, es importante mencionar que después de la garganta se regresa de manera gradual al área mayor como en el primer paso del flujo para mantener las turbulencias al mínimo pese al cambio de velocidad relativamente brusco que se tiene en el cambio de área.

Para el uso correcto del tubo Venturi es necesario que el flujo de entrada sea lo más uniforme posible y que esté instalado entre tubos largos y rectos.

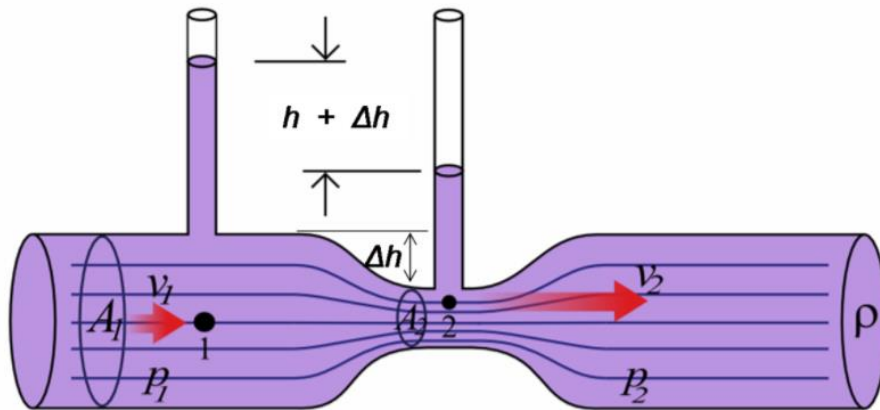


Figura 2.12 Tubo Venturi. [12]

### El tubo de Dall

Una variante del tubo de Venturi con un cambio abrupto en el flujo de entrada disminuyendo un poco el diámetro del tubo que sigue de una disminución gradual cónica, hasta el estrangulamiento en garganta y regresando al diámetro nominal del tubo de manera gradual como un tubo de Venturi común, en la última sección por donde pasa el flujo.

En esta variante del tubo Venturi se mide la presión en los mismos lugares que el tubo Venturi común, en el diámetro inicial y en la garganta.

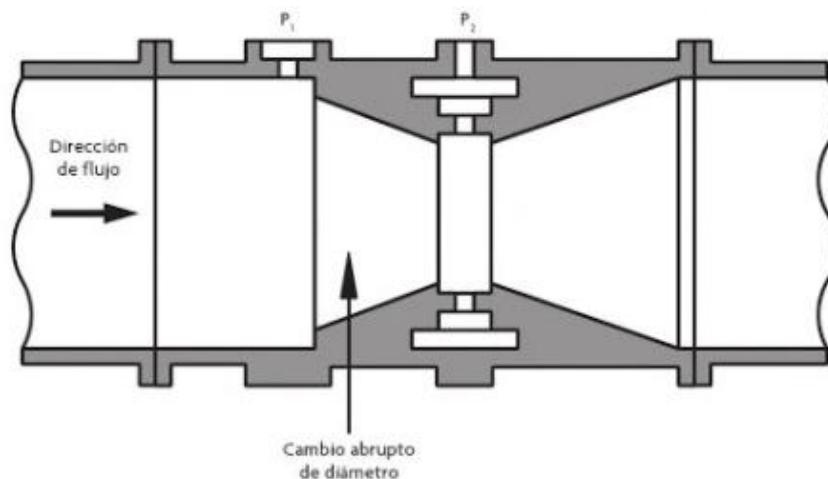


Figura 2.13 Tubo de Dall. [13]

## El tubo de Prandtl

Es la combinación de dos instrumentos, el tubo de Pitot que se encarga de medir la presión total del fluido y un manómetro que se encarga de medir la presión estática. Al conocer estas dos presiones se puede obtener la velocidad y a su vez con esa velocidad obtener el flujo volumétrico del fluido.

La presión estática se define como:

*“Cualquier presión ejercida por un fluido la cual no es ejercida por el movimiento o velocidad del fluido es llamada presión estática del fluido.” [8]*

La presión dinámica se define como:

*“Cuando los fluidos se mueven en un conducto, la inercia del movimiento produce un incremento adicional de la presión estática al chocar sobre un área perpendicular al movimiento. Esta fuerza se produce por la acción de la presión conocida como dinámica. La presión dinámica depende de la velocidad y la densidad del fluido.” [9]*

La presión total se define como la suma de ambas presiones y en caso de que el fluido no esté en movimiento, la presión total se puede considerar como la presión estática.

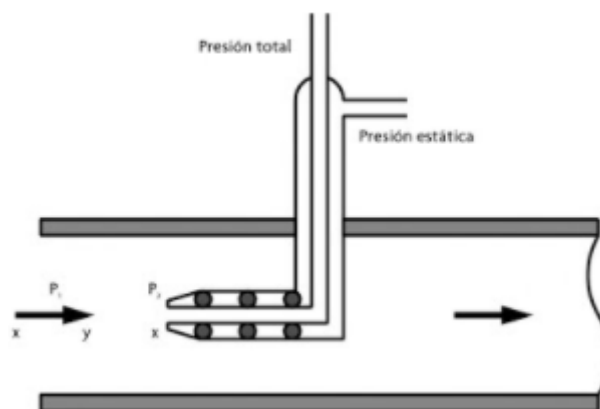


Figura 2.14 Tubo de Prandtl. [14]

## Tobera

Una combinación entre un tubo Venturi y el de placa de orificio, la presión se mide antes y después de la tobera.

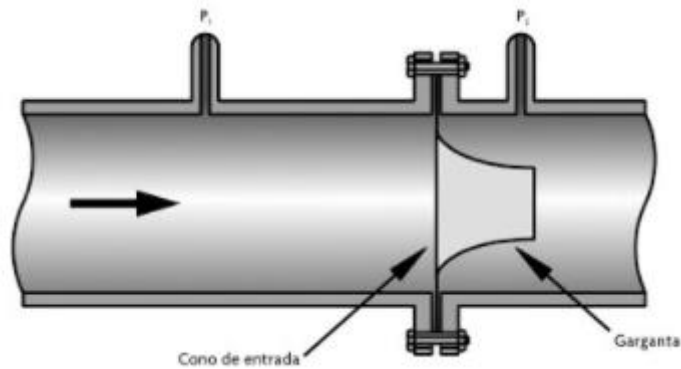


Figura 2.15 tobera. [15]

## Sensores de área variable.

Sensores por los que un fluido pasa a través de una obstrucción cuya área aumenta con la velocidad del flujo y trata de llegar a un equilibrio, el materia más común para estas obstrucciones llamadas rotámetros son metales o cristal, el tipo de material depende del uso y las presiones al que estará sometido, el desplazamiento del obstructor necesita ser medido por un sensor independiente generalmente de proximidad.

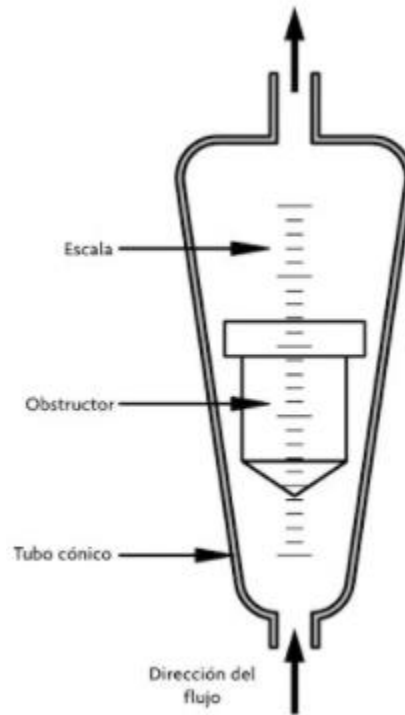


Figura 2.16 Rotámetro. [16]

### Sensores de turbina.

Sensores de construcción mecánica complicada debido a que basan su funcionamiento en la velocidad angular producida al paso de un flujo a través de un juego de paletas/aspas. La velocidad es la encargada de ayudar a determinar el flujo debido a que la velocidad angular a la cual giran las aspas de la turbina es casi proporcional a la velocidad del flujo. Para este tipo de sensores es necesario tener un instrumento de medición extra que sea capaz de medir la velocidad angular, generalmente es un encoder magnético. Es importante que las aspas tengan cierto cuidado ya que flujos demasiado fuertes pueden llegar a fracturar y/o lograr una deformación plástica en las paletas, en caso de flujos altos se recomienda o cambiar de tecnología en el sensor o usar materiales más resistentes lo cual conlleva a un aumento en el costo del sensor.

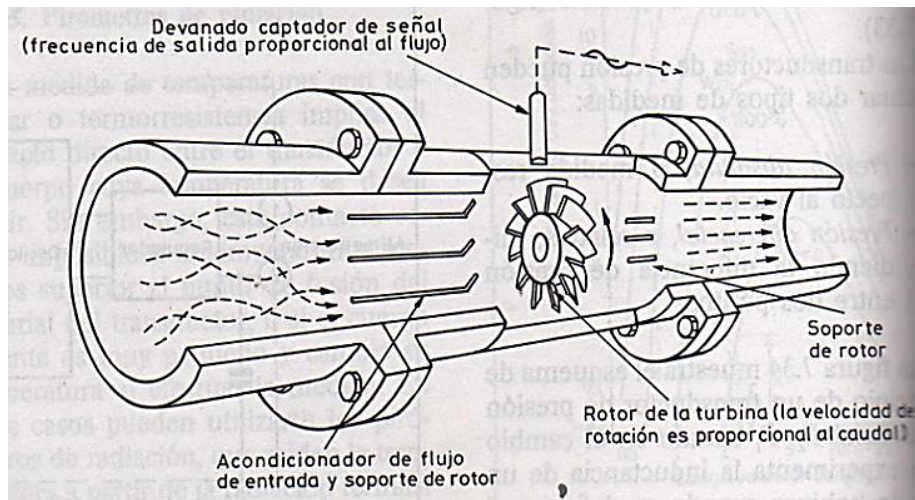


Figura 2.17 Sensor de flujo tipo turbina común. [17]

### Sensores de desplazamiento positivo.

Los medidores de flujo de desplazamiento positivo son los únicos en los sensores de flujo que no necesitan de un sensor externo que les ayude con una medición indirecta debido a que son capaces de medir el volumen de fluido que pasa a través del medidor, tienen una alta precisión debido a su principio de funcionamiento que consiste en componentes rotativos que se encuentran en pequeñas cápsulas y que al paso del flujo sirven como pequeños compartimientos que se llenan haciendo girar el elemento rotativo para después arrojar ese flujo hacia la dirección de la corriente (de ahí viene el nombre de desplazamiento positivo) para dar paso a un nuevo llenado repitiendo el ciclo, al completar un ciclo se cuenta cuántas veces se han llenado estos compartimientos dando así la medición del flujo directa, entre mejor sea el sellado entre los elementos giratorios mejor será la medición final.

De igual manera tiene gran versatilidad en los fluidos que puede medir y en algunos casos (fluidos con gran lubricación) el mantenimiento es prácticamente nulo, solo en casos extraordinarios como fluidos con alta viscosidad se recomienda un mantenimiento constante.

Pese a estas ventajas, al ser un elemento mecánico con varios elementos en línea girando repetidamente resulta en una caída de presión en el flujo, la cual debe de ser considerada, al contrario de los otros sensores de flujo con métodos de medición menos

invasivos, de la misma manera el uso de este sensor cuando el fluido tiene partículas externas grandes no es recomendado ya que dañaría a los elementos giratorios.

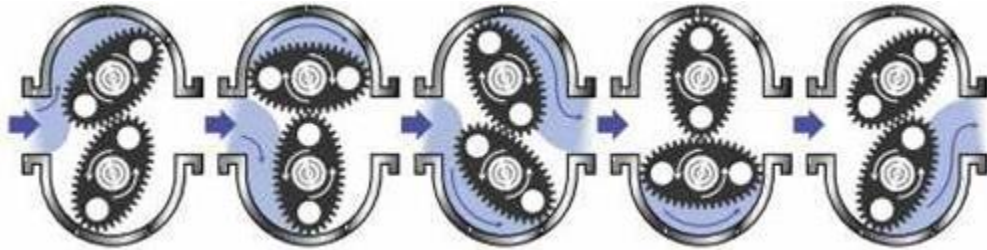


Figura 2.18 Esquema de funcionamiento de un sensor de desplazamiento positivo. [18]

Sensores electromagnéticos.

También llamados caudalímetros magnéticos son sensores que utilizan la ley de Faraday para la medición, *"la ley de Faraday, establece que el voltaje inducido en cualquier conductor mientras se mueve en ángulos rectos a través de un campo magnético es proporcional a la velocidad de ese conductor."* [10] es un sensor ideal para aplicaciones que tengan pocas caídas de presión.

Estos sensores no requieren gran mantenimiento debido a que no tienen piezas móviles para su funcionamiento.

Pese a su gran ventaja de no tener piezas móviles, no obstruir el flujo y poder usarlo en grandes conductos sin que se vea afectado por la viscosidad y temperatura tiene la desventaja de que el flujo que mide tiene que ser completamente estable *"se recomienda un mínimo de 10 diámetros de tubería de tendido recto corriente arriba y 5 diámetros de tubería corriente abajo. Algunas situaciones pueden necesitar 20 diámetros de tubería o más corriente arriba para asegurar un perfil de flujo turbulento completamente desarrollado. El medidor de flujo magnético es sensible a las burbujas de aire en los electrodos. Si hay alguna duda de que tubería esté completamente llena se necesita montar el sensor en ángulo"*[11].

Al usar magnetismo es muy propenso a ruido eléctrico, por eso se necesita tener controlado el nivel de electricidad estática al mínimo por medio de conexión a tierra.



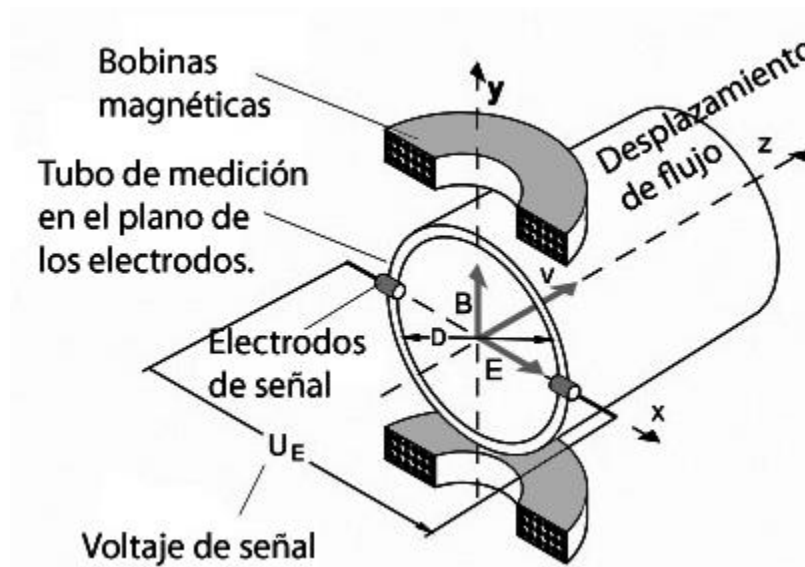


Figura 2.19 Esquema de funcionamiento del sensor magnético. [19]

Sensores ultrasónicos.

Sensores que al igual que en los sensores de proximidad usan el efecto Doppler como herramienta para definir la velocidad del flujo también apoyándose en el principio del tiempo de tránsito.

*“Lo que miden estos sensores es la velocidad del flujo, lo que logran comparando las frecuencia de la onda emitida y la recibida: una vez conocida la velocidad, se calcula el flujo volumétrico.*

*Los sensores que se basan en el principio de tránsito utilizan un par de transductores ultrasónicos colocados de tal forma que se encuentren diametralmente opuestos y su línea de transmisión forme un ángulo respecto a la dirección del flujo. La diferencia en los tiempos que toma a la onda emitida por el ultrasónico 1 al llegar al ultrasónico 2 y viceversa, es lo que interesa medir en este tipo de sensores” [12]*

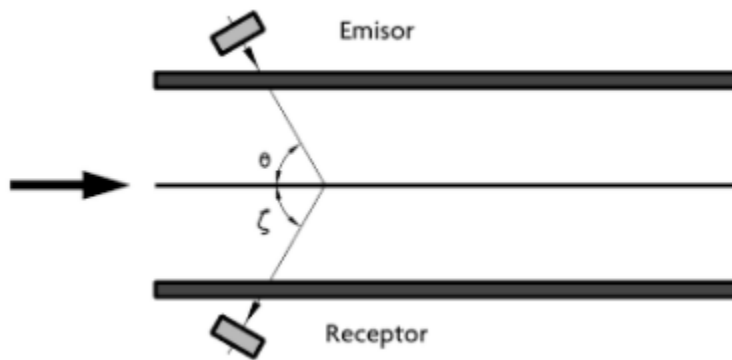


Figura 2.20 Configuración de un sensor de flujo ultrasónico basado en efecto Doppler. [20]

### Sensores vórtice.

El principio de efecto vórtice consiste en la propiedad que tienen los fluidos de volverse inestables al pasar por un obstáculo formando "remolinos" alrededor del mismo, estas zonas de turbulencia son las que permiten la medición del flujo ya que *"La frecuencia de desprendimiento de los vórtices a cada lado del cuerpo sólido es proporcional a la velocidad media de circulación del fluido y, por lo tanto, al caudal volumétrico."* [13]

El fluido alcanza su velocidad máxima en la parte más ancha del objeto contra el que choca, al pasar "rodeando" este objeto y pasar por las partes más delgadas del mismo el flujo trata de desprenderse del objeto provocando así la turbulencia en forma de remolino.

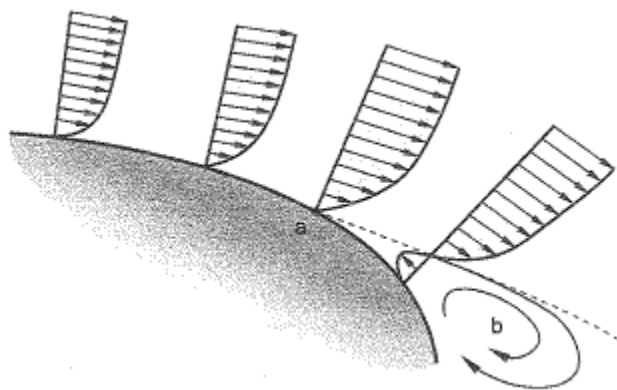


Figura 2.21 Formación y desprendimiento de vórtices. [21]

Los sensores de vórtice son ideales en flujos turbulentos ya que miden la frecuencia de los vórtices a través de un elemento llamado farol esta frecuencia es medida por sensores de presión, capacitivos, piezoeléctricos o ultrasónicos.

Los flujos que son viables para estos sensores tienen que tener un número de Reynolds entre 3000 y 10000 que es cuando los flujos se consideran turbulentos, en valores menores el flujo se considera como laminar lo que significa que la presencia de vórtices es poca o nula, haciendo inútil al sensor.

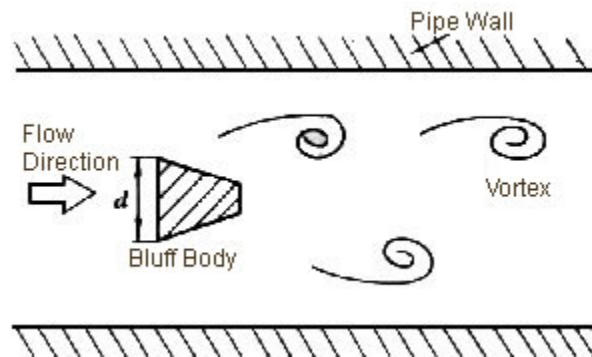


Figura 2.22 Esquemático de sensores de vórtice. [22]

Sensores coriolis.

*“El efecto Coriolis. Es la fuerza producida por la rotación de la Tierra en el espacio, que tiende a desviar la trayectoria de los objetos que se desplazan sobre la superficie terrestre; a la derecha en el hemisferio norte y a la izquierda, en el sur. Este efecto consiste en la existencia de una aceleración relativa del cuerpo en dicho sistema en rotación. Esta aceleración es siempre perpendicular al eje de rotación del sistema y a la velocidad del cuerpo.” [14]*

El sensor de efecto coriolis ocupa el principio mencionado en el párrafo anterior para lograr medir el flujo másico, es uno de los pocos sensores que puede medir el flujo másico directamente.

Su funcionamiento es usando una manguera por la cual fluye el líquido del que se quiere conocer el flujo, esta manguera siempre estará oscilando, esto hará que la fuerza de coriolis se haga presente en el fluido dentro de la manguera y producirá una torsión en la manguera, lo que hace que la misma tenga un desfase en la oscilación entre dos

puntos los cuales contarán con sensores de proximidad, la diferencia de tiempo de torsión de estos sensores son los que ayudan al cálculo del flujo másico.

Es importante que el desplazamiento sea perpendicular a la dirección del flujo, si esto no se cumple las fuerzas de coriolis no se presentarán.

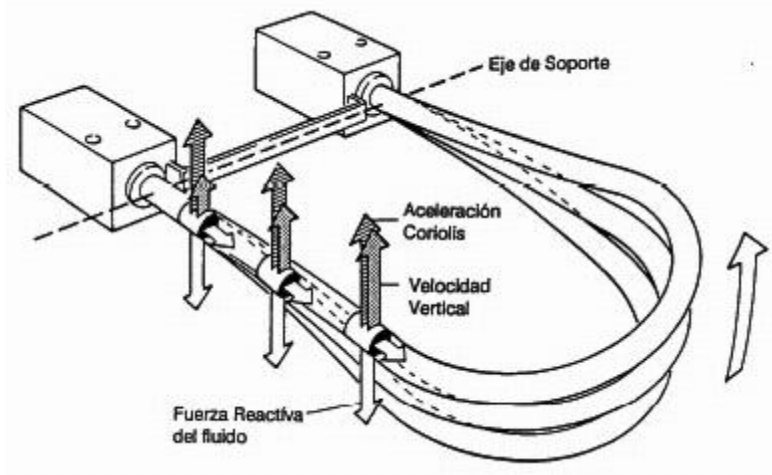


Figura 2.23 Esquemático de sensores de coriolis. [23]

## 2.2.2 Aplicaciones de sensores de flujo.

La concentración es de las condiciones más importantes que cumplir en el control de calidad en procesos industriales alimenticios y químicos y el tener un sensor de flujo es fundamental para poder tener un control exacto de todos los aditivos necesarios en alimentos o medicinas ya que de no cumplir esto puede llevar a grandes pérdidas económicas o hasta prisión en casos extremos por negligencia en donde se ponga en peligro la integridad del cliente.

Los sensores de flujo también son muy utilizados en sistemas de aire acondicionado en edificios ya que da una manera más precisa de mejorar la sensación térmica dentro de construcciones, gracias a que se tiene conocimiento de la cantidad de aire que entra y sale de la construcción y con esta información a su vez regular la temperatura, las llamadas climatizadoras, las nebulizadoras y vaporizadoras operan usando el mismo principio de dejar entrar o salir cierta cantidad de fluido.

En la industria animal también se usan sensores de flujo con compatibilidad química para hacer alimentos con aditivos y conservadores, mejorando la precisión en las concentraciones de alimento y mejorar la salud del ganado.

En maquinaria que necesite lubricación constante, máquinas que cuenten con rodamientos, partes de caucho o plásticas y partes mecánicas de alto movimiento y/o impacto y que al momento de que se detecte un flujo bajo de lubricante permita una rápida acción aumentando el nivel del mismo para evitar desgaste, en maquinaria agrícola como cosechadoras, incubadoras y de lavado industrial para asegurar un flujo constante de agua para regar, hidratar, limpiar o cambiar temperatura.

Finalmente en apoyo a la ingeniería civil para la instalación de ductos de agua generalmente usados para cobro de tarifas y saneamiento de aguas negras.



a) Tratamiento de aguas. [24]



b) Climatizadores. [25]



c) Lubricación. [26]



c) Máquinas agrícolas. [27]



d) Industria alimentaria. [28]



e) Limpiadoras industriales. [29]

f) Cámaras climáticas. [30]

Figura 2.24 Aplicaciones de sensores de flujo.

## 2.3 Servomotor

Un servomotor es un motor eléctrico al que se le puede controlar, la velocidad y la posición de eje, las características principales de un servomotor son el par y la velocidad. En la actualidad es uno de los actuadores más usados a nivel industria, educación y hobbista, consiste en 3 piezas fundamentales:

- Un motor de corriente directa que consta de un rotor y un estator.  
*“El rotor es la parte móvil que proporciona la fuerza que actúa sobre la carga mecánica mientras el estator es la parte fija que provee el magnetismo necesario para inducir la fuerza electromotriz” [16].*  
 La principal característica y utilidad del motor es la facilidad que tiene para usarlo y caracterizarlo debido a que su velocidad de rotación es proporcional al voltaje y el torque es proporcional a la corriente que circula por el devanado.
- Un juego de engranes que sirven para reducir la velocidad y aumentar la fuerza, ya que los motores de corriente directa tienen una gran velocidad pero un par pequeño a estos engranes también se les llama sistema de regulación.
- Un circuito de control interior que cuenta con un potenciómetro para la retroalimentación para cerrar el lazo de control interno.

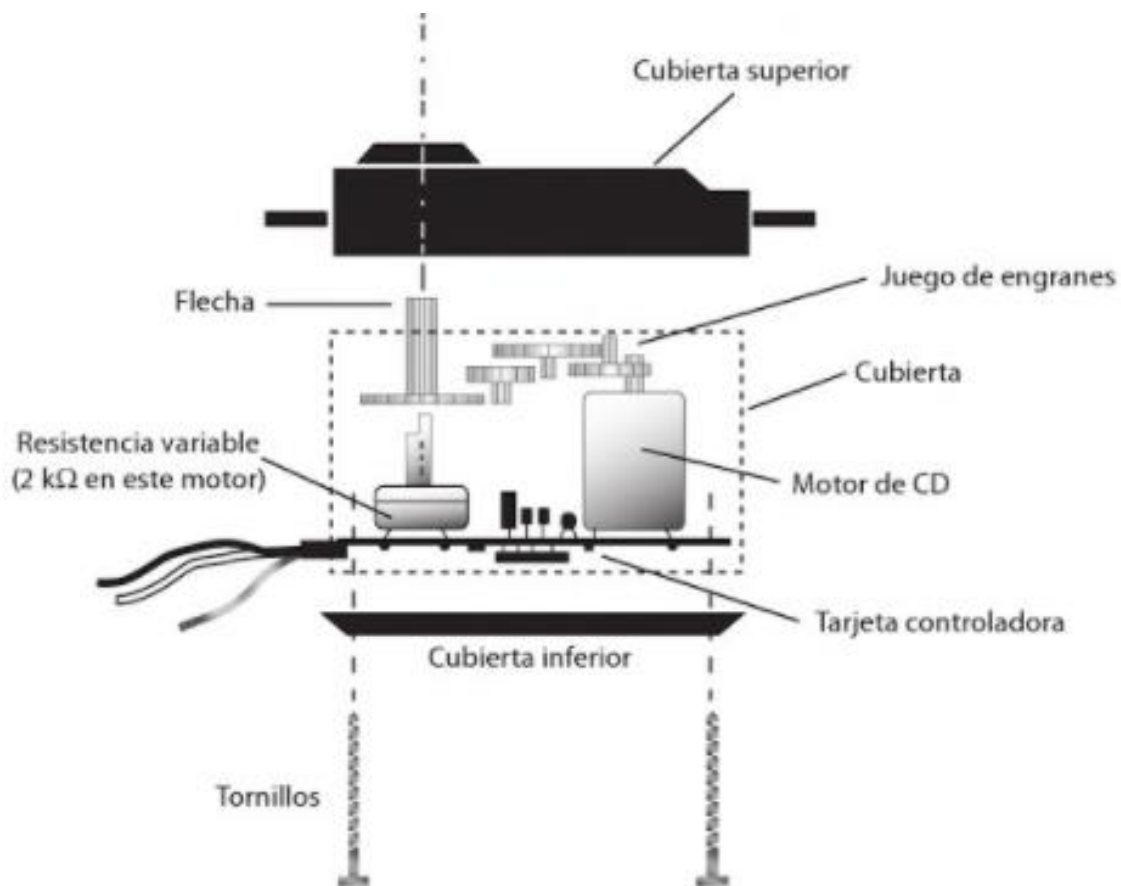


Figura 2.25 Componentes de un servomotor. [31]

### Funcionamiento

Al momento que se manda un tren de pulsos como señal de control entra a un circuito convertidor, que traduce la señal de control de ancho de pulsos a voltaje, este voltaje entra a un circuito comparador junto a la retroalimentación esto sirve para ver qué tan alejada esta la posición real a la posición deseada y a su vez activa el puente H que es el circuito de potencia que mueve el motor, este motor tiene acoplado un potenciómetro que es el encargado de mandar la señal de retroalimentación que entra al comparador junto al voltaje traducido de ancho de pulsos, cuando el error es 0 quiere decir que la posición deseada es igual a la real y se mantiene en ese valor esperando otro cambio en el valor deseado.

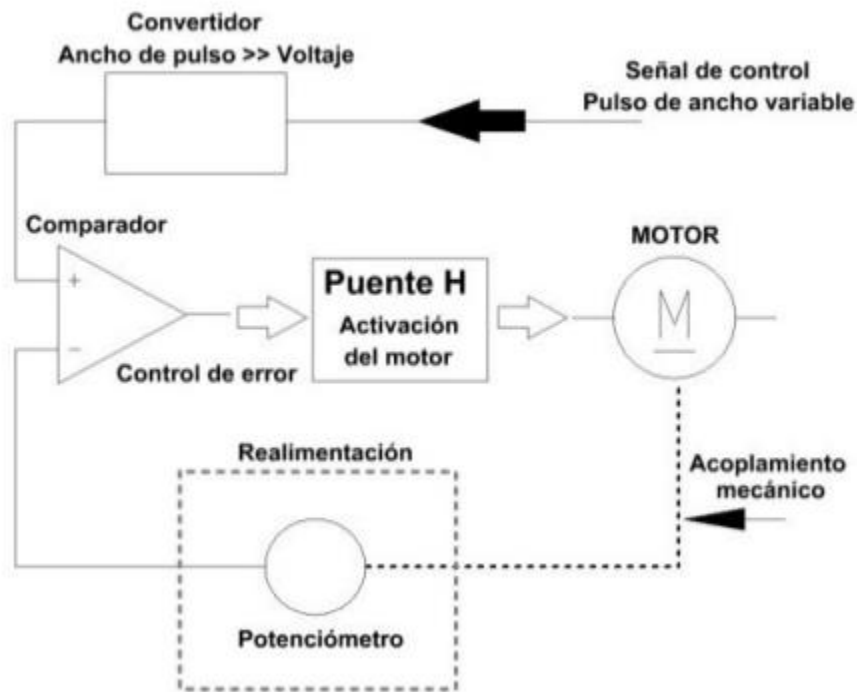


Figura 2.26 Esquema general de un servomotor completo en funcionamiento. [32]

La conexión y el código de colores de los servomotores varían entre fabricantes.

Fabricante	Duración del pulso (ms)			Frecuencia Hz	Color de los cables		
	Mínima (0°)	Neutral (90°)	Máxima (180°)		Positivo	Negativo	Control
Futaba	0.9	1.5	2.1	50	Rojo	Negro	Blanco
Hitech	0.9	1.5	2.1	50	Rojo	Negro	Amarillo
Graupner/Jr	0.8	1.5	2.2	50	Rojo	Marrón	Naranja
Multiplex	1.05	1.6	2.15	40	Rojo	Negro	Amarillo
Robbe	0.65	1.3	1.95	50	Rojo	Negro	Blanco
Simprop	1.2	1.7	2.2	50	Rojo	Azul	Negro

Figura 2.27 Tabla de servomotores. [33]

Generalmente la alimentación de un servomotor va desde 5 [v] hasta 15 [v].



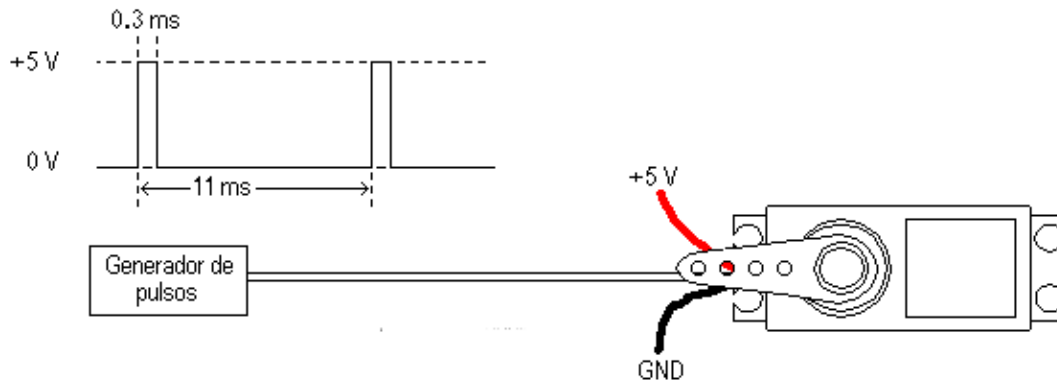


Figura 2.28 Conexión clásica de un servomotor. [34]

### PWM (Pulse Width Modulation)

Modulación por ancho de pulso en español es una señal cuadrada que manda pulsos hacia el servomotor. Es la técnica más utilizada para el control de servomotores.

El PWM es una señal que está compuesta por un ciclo de trabajo y una frecuencia:

- Frecuencia es la respetabilidad de una señal en un segundo (generalmente se usa una frecuencia de 50 Hz).
- Ciclo de trabajo Es el porcentaje de duración de la señal en el cual esta envía un voltaje con un valor de uno lógico, si el ciclo de trabajo es 0% no hay señal y si el ciclo es de 100% se comportaría como una señal de directa con el valor de uno lógico.

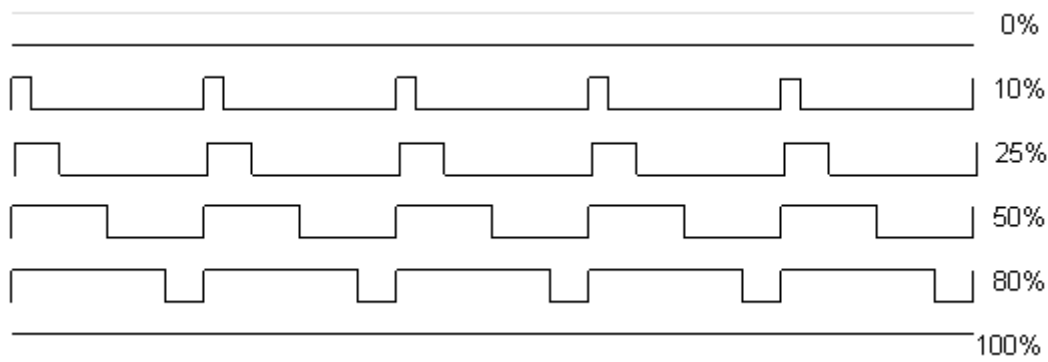


Figura 2.29 Definición de ciclo de trabajo. [35]

El servomotor es una herramienta precisa y confiable para actividades que requieran alta fiabilidad en repetición aunque cuenta con algunas desventajas como la fragilidad del

tren de engranes a cargas límite del actuador y el costo elevado si se quiere aumentar la carga que puede soportar el servomotor.

De igual manera tienden a ser afectados fácilmente por ruido eléctrico, para esto se tiene que asegurar que las tierras del circuito de potencia y del actuador están bien aterrizadas y que los cables de conexión estén bien aislados.

Tipos de servomotores.

Todos los tipos de servomotores cuentan con el mismo principio y componentes, la única diferencia es el tipo de motor acoplado al tren de engranes y cambios en el control interno.

Servomotores de corriente continua: El servomotor más común y económico, cuenta con un motor de corriente directa y se controla por PWM son los más usados para aplicaciones de hobbistas y prototipado rápido.

Servomotores de corriente alterna: Servomotor que cambia el motor de corriente directa por uno de alterna para aumentar la carga que es capaz de aguantar.

Servomotores brushless: Cuenta con un motor brushless que aumenta considerablemente las revoluciones a las que puede girar y la fuerza, debida a esto y a su fiabilidad son los que más se usan en la industria.

### 2.3.1 Aplicaciones del servomotor

En el área industrial son bastante usados en robots industriales de alta precisión, puertas automáticas y ascensores, fresadoras, tornos, máquinas de troquelado, máquinas cortadoras automáticas, paneles solares inteligentes, máquinas acolchadoras, de grabado de madera, máquinas de bolsas y sistemas de producción de respuesta rápida en general. Para aplicaciones de hobbistas en timones, alerones para aviones a escala, coches de radiocontrol, barcos a escala, robots tipo araña y competencia.

Usado en estas aplicaciones debido a su capacidad de ser llevados a posiciones angulares específicas al enviar una señal codificada dentro de un rango de operación, facilidad de conexión, gran cantidad de documentación que se puede encontrar del servomotor, potencia proporcional para cargas mecánicas, no tiene un consumo energético elevado y pese a su tamaño tiene la capacidad de entregar gran cantidad de par.



a) Aviones a escala. [36]



b) Robots de aplicaciones variadas. [37] [38]

Figura 2.30 Aplicaciones de los servomotores.

## 2.4 Control.

El control actualmente es una de las ramas de la ingeniería más importantes, la mayoría de los sistemas si no es que todos tienen en su funcionamiento directa o indirectamente algo de la teoría de control.

Desde vehículos terrestres, espaciales, sistemas de fabricación industrial, domótica, comunicaciones, entre otras.

Prácticamente cualquier máquina o sistema que necesite manipular el comportamiento de alguna variable física, ya sea presión, temperatura, humedad, flujo, altura, magnetismo, voltaje, corriente tiene una aplicación para el control.

Si los actuadores son lo equivalente al cuerpo y los sensores lo equivalente a los sentidos en un humano, se necesita algo para poder relacionar ambos elementos, en el caso de los seres vivos es el cerebro y sistema nervioso, en las máquinas y sistemas físicos se podría considerar al control como el “cerebro”.

El control usa la información de los sensores, la interpreta, la procesa y manda una orden dependiente de estos estímulos obtenidos a los actuadores en forma de señales de control para dar una respuesta a los mismos.

*“Un sistema de control es un tipo de sistema que se caracteriza por la presencia de una serie de elementos que permiten influir en el funcionamiento del sistema. La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores prefijados.”[17]*

Elementos básicos para un sistema de control.

Sensor: Elemento encargado de dar la información del sistema.

Controlador: Elemento encargado de recibir la información de los sensores y mandar órdenes a los actuadores.

Actuador: Elemento de movimiento que ejecuta las órdenes del controlador y modifica las variables de control para llegar a los valores deseados.

Los sistemas de control se pueden clasificar en diferentes categorías.

- Por su orden (Primer, segundo, tercer orden)
- Sistemas variantes o invariantes en el tiempo.
- Sistemas estáticos o dinámicos.
- Lineales o no lineales.
- Por su representación matemática.

Así como se pueden clasificar por categorías también se clasifican en grupos más grandes como por el tipo de estrategia de control que usan.

Al hablar de estrategias de control se refiere al como el control reacciona y manda las señales de control correspondientes a los sistemas.

Esta clasificación habla acerca del lazo de control que tiene un sistema.

Lazo abierto: Los sistemas con control de lazo abierto no tienen una retroalimentación y generalmente se manejan por tiempo, son de fácil implementación y no representan altos costos económicos debido a que no se necesitan sensores, se les llama control por tiempo, son usados en industrias en las cuales tienen procesos de poca precisión y con poca peligrosidad como rellenado de bolsas donde el contenido puede ser irregular como bolsas de dulces o tornillos y llenado de líquido automatizado en contenedores estándar como rellenado de refresco, estos sistemas tienen una tendencia a fallar ya que no pueden sobrellevar las perturbaciones.

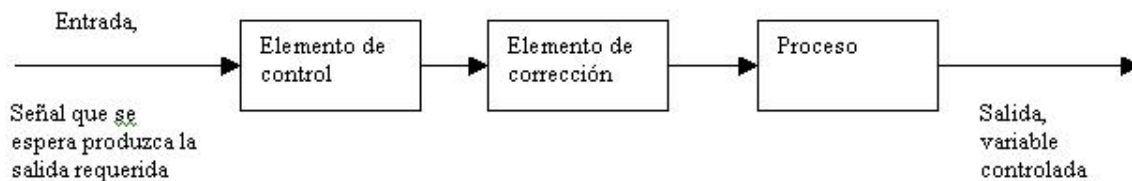


Figura 2.31 Esquema de control de lazo abierto. [39]

Lazo cerrado: Los sistemas de control de lazo cerrado tienen una retroalimentación, por eso mismo se manejan por eventos, dependiendo de la instrumentación puede llegar a ser caro pero gracias al uso de sensores, este tipo de sistemas son muy precisos y rápidos ya que no tienen que esperar un tiempo determinado como los de lazo abierto, es el control más usado en la industria debido a su alta repetibilidad y resistencia a las perturbaciones, es ideal para grandes producciones que requieren tener una calidad estándar.

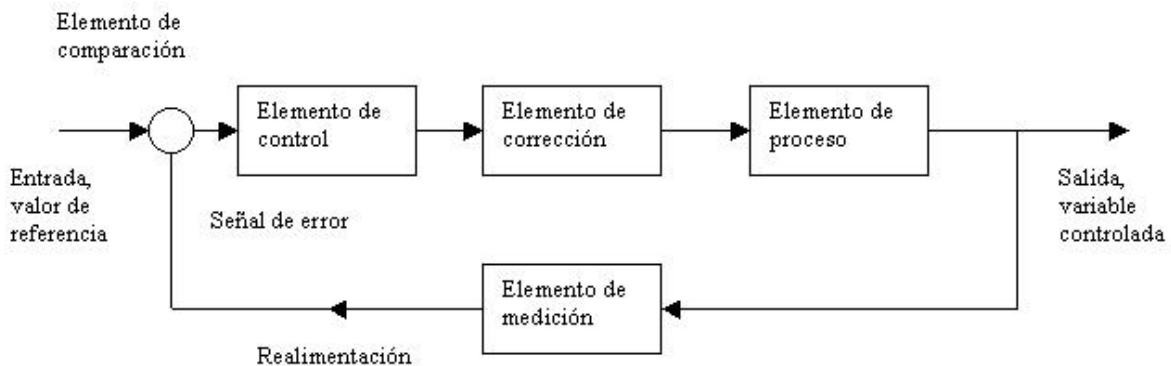


Figura 2.32 Esquema de control de lazo cerrado. [40]

### Tipos de control

La aplicación del control se apoya de diferentes principios, técnicas y teorías, todas con el mismo objetivo, la manipulación de la variable del control para tener una acción de control y llegar a un valor o valores deseados.

Entre los tipos de control más comunes entran los siguientes.

- Control On/Off
- Controles basados en función de transferencia
  - PID
- Controles basados en variables de estado
  - Retro de salidas
  - Retro de estados
- Control robusto
- Control adaptable
- Control óptimo

## 2.4.1 Control PID.

El control PID es el control industrial por excelencia, uno de los más implementados debido a su sencillez.

Es la suma de tres acciones de control implementadas al unísono, estos parámetros de control son la parte proporcional, la parte integral y la parte derivativa, su aplicación es tan extensa debido a que no es necesario el conocimiento de la planta, al no necesitar información del sistema se puede evitar toda la complicación matemática en algunas situaciones.

La fórmula que describe el PID es una sumatoria de 3 operaciones diferentes.

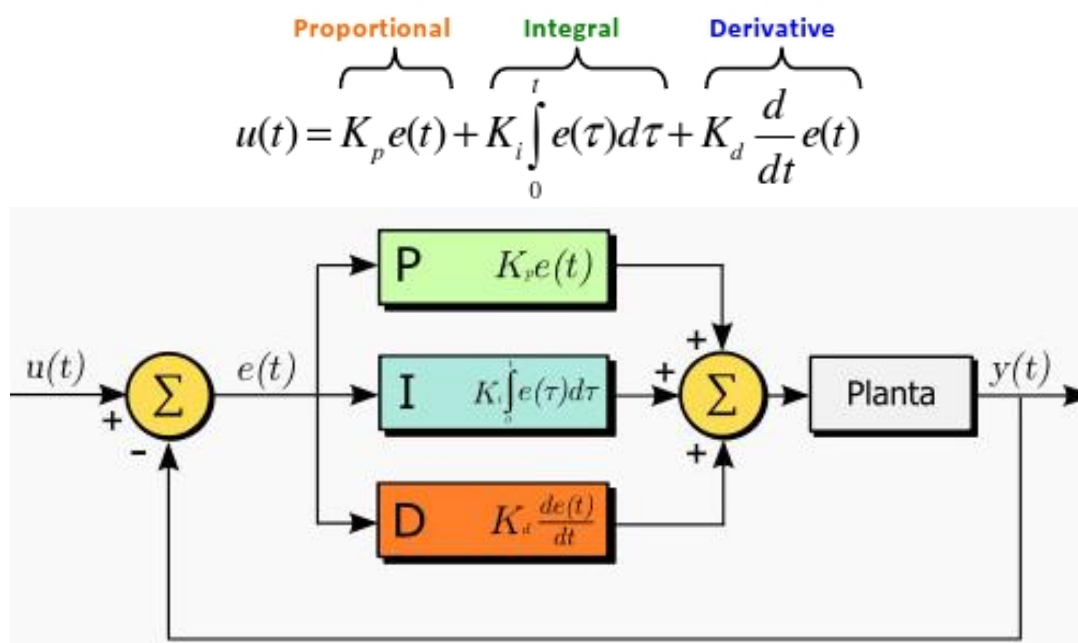


Figura 2.33 Diagrama de bloques del control PID. [41]

Como se puede ver en la ecuación del control PID consiste en operar el error, integrarlo de 0 hasta el tiempo final, derivarlo con respecto al tiempo y finalmente multiplicar cada parte del error por una constante, estas constantes son las llamadas K de ganancia

Las ganancias sirven para aumentar el "porcentaje" de acción de cada parte del control en función de la  $K_p$ .

*" $K_p$  constante de proporcionalidad: se puede ajustar como el valor de la ganancia del controlador o el porcentaje de banda proporcional."*[18]

*" $K_i$  constante de integración: indica la velocidad con la que se repite la acción proporcional."*[18]

*" $K_d$  constante de derivación: hace presente la respuesta de la acción proporcional duplicándola, sin esperar a que el error se duplique. El valor indicado por la constante de derivación es el lapso durante el cual se manifestará la acción proporcional correspondiente a 2 veces el error y después desaparecerá."*[18]

Para la sintonización de estas constantes  $K$  de ganancia hay dos métodos, usando las técnicas de control o de manera manual.

Para la sintonización con técnicas de control es necesario tener información y el modelo del sistema, este método permite tener constantes que hagan que el sistema tenga comportamientos y características específicas pero tiene una alta complicación matemática y es necesario tener conocimientos básicos de la teoría de control.

Para la sintonización manual no hay un método a seguir, pero sí algunas formas rápidas de sintonización, se tiene que empezar con el sistema activo cuando se está sintonizado con una constante proporcional baja y las otras dos constantes en cero, la constante proporcional tiene que tener una acción de control grande y que se acerque al valor de manera rápida se tiene que mover la constante hasta que cumpla esa condición, la siguiente a sintonizar tiene que ser la integral, se mantiene la proporcional y se le pone valor a la integral, la integral tiene que hacer que al momento de acercarse al valor deseado empiece a tener un ajuste fino y se acerque al valor de manera lenta y por último se hará lo mismo con la derivativa manteniendo la parte proporcional e integral constantes ésta tiene que ser muy pequeña así que el rango de valores de sintonización tiene que ser reducido (generalmente menor a uno).



## 2.4.2 Implicaciones físicas del control PID.

### Parte proporcional

La parte proporcional da un acercamiento rápido y poco preciso del valor deseado, elimina errores grandes pero no puede hacer nada contra los errores muy pequeños, un control puramente proporcional generalmente va a tener un sobrepaso y una oscilación cuando llegue a un cierto valor límite de constantes  $k$  de ganancia, específico de cada sistema, eso puede afectar a ciertos dispositivos u elementos que no puedan soportar esos picos en la variable de control, esto se hace aparente en dispositivos electrónicos con un rango operativo de corriente pequeño o elementos con topes mecánicos y mucha inercia, a este fenómeno se le llama sobre oscilación y es recomendable evitar pasar el límite del 30% del valor en estas oscilaciones.

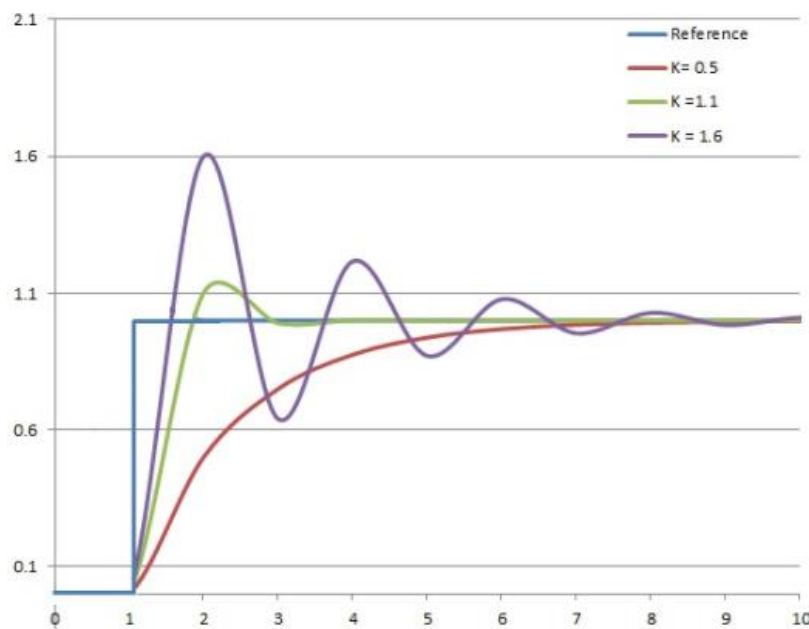


Figura 2.34 Fenómeno de Sobre Oscilación con diferentes ganancias proporcionales. [42]

El control proporcional hace que se llegue al valor deseado más rápido ya que disminuye el tiempo de asentamiento al igual que el error en estado permanente, cabe aclarar que solo atenúa el error en estado permanente más no lo elimina.

## Integral

La acción integral en un controlador provoca que la señal de control cambie a una velocidad proporcional a la magnitud de la señal de error.

Esto quiere decir que si la señal de error es grande la señal de control se incrementará con gran rapidez y si es pequeña se incrementará lentamente, si el error tiende a 0 la salida de la parte integral del controlador permanecerá constante.

Sirve para corregir la desventaja de la parte proporcional que no puede corregir los errores pequeños debido a su comportamiento, la parte integral consiste en sumar los pequeños errores hasta hacerlos visibles llegar al valor deseado y al cumplir su objetivo el valor de la integral se irá a 0.

## Derivativa.

Su acción manda una señal de control proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error, puesto que este no genera ninguna salida a menos que el error sufra una modificación, en raras ocasiones se utiliza solo ya que su efecto es anticipar cambios en el error y proporcionar una respuesta rápida.

Su característica principal es su rápida respuesta a los cambios pero tiene un problema grave con el ruido, ya que cuando una señal con ruido pasa por la acción del derivativo lo que hace es amplificar el error de la señal y eso se traduce físicamente como una oscilación de gran intensidad y de duración larga, por eso mismo solo es usada en casos extraordinarios en los que se necesita un comportamiento específico o se tiene una señal muy limpia de otra manera se trabaja con un PI.

El control PID puede ser implementado por parte individual o como una combinación de las partes que lo conforman por completo, con la única restricción de que la parte proporcional siempre tiene que estar presente.

Control P: Es el control más burdo tiene poca precisión y presenta sobrepasos del valor.

Control PI: El control aplicado más común, generalmente en la industria se quita la parte derivativa por que tiende a hacer inestable al sistema.

Control PD: El control PD no se utiliza debido a su tendencia a la inestabilidad.

## 2.5 C#.

C# es un lenguaje de programación orientado a objetos de Microsoft que combina la potencia de C++ y la facilidad de programación de Visual Basic, tiene gran parecido con java, JavaScript y tiene sus raíces en la familia de lenguajes de C basado fuertemente en C++.

C# es implementado para trabajar con la plataforma .NET de Microsoft que es *"un amplio conjunto de bibliotecas de desarrollo que pueden ser utilizadas con el objetivo principal de acelerar el desarrollo de software y obtener de manera automática características avanzadas de seguridad, rendimiento, etc."* [19]

*"ofrece un entorno gestionado de ejecución de aplicaciones, lenguajes de programación y compiladores, y permite el desarrollo de todo tipo de funcionalidades: desde programas de consola o servicios Windows, hasta aplicaciones para dispositivos móviles pasando por desarrollos de escritorio o para Internet."* [19].

El que C# forme parte de .NET tiene el objetivo de facilitar el intercambio de información y servicios Web, es una plataforma versátil ya que permite hacer desde aplicaciones de gran seguridad y robustez hasta aplicaciones portables, permite la interoperabilidad y fácil integración a diferentes tecnologías y tiene un modelo de programación independiente del lenguaje en toda las capas de aplicación.



Figura 2.35 Arquitectura .NET. [43]

## Características principales de C#

- Lenguaje de programación orientado a objetos
- Es un lenguaje con gran simplicidad
- Seguridad de tipos
- Gestión automática de la memoria
- Distinción entre letras mayúsculas y minúsculas
- Variables anulables
- Moderno

La simplicidad del lenguaje C# en la creación de interfaces usando la aplicación *Windows form* permite crear interfaces de uso simple para el usuario gracias a la gran cantidad de advertencias y seguros que pueden ser creados con las herramientas de C#, es un lenguaje estructurado que permite tener un gran orden al momento de escribir código ya que permite la distinción entre mayúsculas y minúsculas permitiendo nombres explicativos en el código de la interfaz creada, todo esto sin la necesidad de preocuparse por el uso de memoria ya que el programa automáticamente optimiza todos los procesos programados para la interfaz del banco de pruebas lo que permite al programa final ser usado en cualquier computadora sin importar la cantidad de RAM que tenga.

### 3. Bancos de prueba.

Un banco de pruebas es un dispositivo o máquina que apoya proyectos de gran escala, tienen la finalidad de mostrar la comprobación, repetitividad y transparencia de un fenómeno por medio de la investigación y experimentación, usado para tecnologías en desarrollo y teorías científicas.

Los bancos de pruebas en el ámbito de la investigación son desarrollados para la comprobación de un fenómeno teórico en la vida real y en la industria para probar las características específicas de algún producto o material usando diferentes pruebas estandarizadas creadas con ese único propósito, ya sea durabilidad, resistencia del material, uso continuo, vida útil, trato rudo, fiabilidad, entre otras. generalmente para cumplir normas de la industria con el objetivo de sacar al mercado o mejorar sus productos.

Es el paso anterior a comenzar un desarrollo y después de hacer cálculos o simulaciones que den hincapié a la comprobación y/o existencia de algo, ya demostrado el principio de funcionamiento o que el producto/material es capaz de soportar alguna prueba en específico ya se puede empezar a producir en el caso de la industria y en el caso de la investigación ya se pueden hacer conjeturas para la comprobación de teorías o generar documentación concluyente.

Los bancos de pruebas son la forma de comprobar la funcionalidad y características de un producto en la industria, toda compañía que desarrolla tecnología propia tiene departamentos completos encargados para la implementación de bancos de pruebas para determinar si la tecnología que tienen es viable para el mercado y cumple con estándares de seguridad y calidad.

Otra forma de probar un producto en la industria es la contratación de peritos especializados que hagan las pruebas de manera independiente.

### 3.1 Bancos de prueba en la educación.

En la educación los bancos de pruebas ha sido una forma de acercar a los estudiantes de las ciencias exactas a fenómenos físicos que no son replicables de manera simple ya sea por su dificultad en la demostración o por lo abstracto del fenómeno.

Generalmente los bancos de pruebas en la educación sirven para complementar la formación teórica del estudiante y al contrario del ámbito industrial o de investigación primero se hacen las pruebas y usando las pruebas del fenómeno físico como referencia se hacen los cálculos como modelos, estadísticas, simulaciones en programas especializados, para ver como el modelo físico real tiene el comportamiento teórico obtenido de los cálculos realizados después de su uso.

Los bancos de pruebas en la educación muestran de manera didáctica la información de su funcionamiento, ya sea por medio de interfaces amigables cargadas con elementos gráficos o como datos duros para su procesamiento posterior, siempre con una carga teórica aportada por el modelo matemático, por resultados teóricos y simulaciones del fenómeno.

Los bancos de pruebas que muestran fenómenos físicos vistos en clase le sirven al estudiante a entender la teoría de manera más profunda permitiendo así un mejor rendimiento en la materia de estudio y un interés mayor en la misma ya que tienen el conocimiento más a la mano con el que pueden experimentar, generar una familiaridad y relacionar fenómenos con elementos reales no solo en modelos matemáticos y ecuaciones.

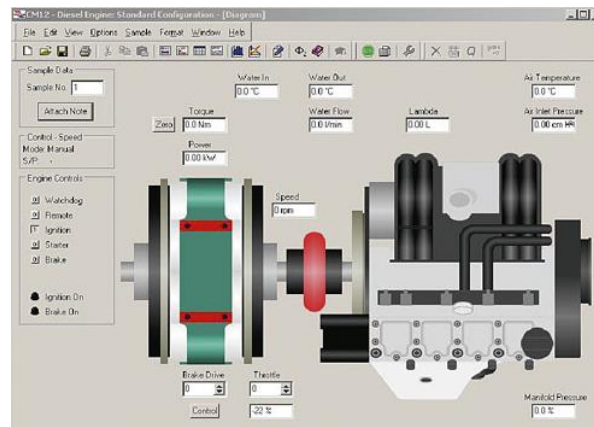


Figura 3.1 Interfaz de un banco de pruebas de motores. [44]

## 4. Objetivos.

Desarrollar la instrumentación y actualización del modelo funcional de un banco de pruebas para las materias de instrumentación y dinámica de procesos que controle altura y flujo de líquido.

### 4.1 Objetivos específicos.

- Adaptación del concepto solución del banco de pruebas, usando como base el modelo funcional previo desarrollado en la facultad de química y mejorándolo con la aplicación de tecnología más acorde a la necesidad
- Eliminar la dependencia de un software de cálculo para usar un software licenciado.
- Diseño y construcción de una servoválvula para el banco de pruebas como nuevo actuador para el modelo.
- Diseño e implementación de un control PID con constantes variables que permita ver los diferentes comportamientos e implicaciones físicas de la parte proporcional, integral y derivativa
- Diseño de una interfaz donde se controle el PID y muestre el nivel de flujo y altura.

## 5. Justificación.

Un banco de pruebas como se menciona en el apartado 3.1 de este trabajo, habla acerca del aprendizaje del alumno y su facilidad de comprensión al tener el fenómeno cerca y que tenga la posibilidad de experimentar con él, ver sus efectos y consecuencias.

Al ser un banco con doble propósito puede abarcar temas de instrumentación y de dinámica de procesos.

En la materia de instrumentación permitirá a los alumnos poder tener acercamiento a sensores poco comunes como los de flujo ya que las instalaciones universitarias no permiten hacer prácticas individuales para el estudio de este sensor, podrán observar las problemáticas que tienen algunos sensores en un ambiente real y las ventajas y desventajas de los mismo así como las características principales de los sensores que se estudian en la materia tales como rango, precisión, offset, linealidad, sensibilidad, deriva, repetitividad, resolución, entre otras. También tendrán un acercamiento al diseño de interfaces y tendrán un ejemplo con el cual podrán experimentar las características principales que definen a una interfaz y les mostrará una herramienta extra para la creación de interfaces.

En la materia de dinámica de procesos los alumnos podrán ver cómo afecta el control PID al sistema, sus consecuencias físicas y como cada parte del PID afecta de manera individual comprobando la teoría de control explicada en el apartado 2.4 de este trabajo. A su vez podrán hacer los cálculos correspondientes para comprobar el comportamiento de las gráficas, obtener el modelo dinámico aproximado, sintonizar el PID con reglas basadas en el modelo del sistema y jugar con los parámetros para demostrar el efecto de cada una de las partes del PID.

Esto les abrirá a los alumnos una alternativa a sus prácticas individuales y podrán tener un ejemplo de modelo a escala de un proceso real como es el llenado de un tanque instrumentado, que es común de encontrar en compañías del giro de alimentos y químicos en los cuales es importante mantener la concentración de algunas sustancias en sus productos por normas de control de calidad.



## 6. Diseño conceptual de la Servo válvula.

Las servo válvulas son una aplicación específica del servomotor, en la cual se ocupa el control de posición para abrir una válvula.

Hay de diferentes tipos, desde servo válvulas de pequeña escala en el ramo vehicular para el escape y admisión de gases hasta de aplicación industrial de alto flujo.



a) Servo válvula Bosch para uso industrial. [45]



b) Servo válvula de automóvil. [46]

Figura 6.1 Ejemplo de servoválvulas.

Las servoválvulas se desempeñan en sistemas electrohidráulicos y electroneumáticos, donde se necesite el control de posición, velocidad, presión o control de fuerza.

*"Las válvulas servo electrohidráulicas y válvulas proporcionales ofrecen un caudal de salida o una presión de salida que es lineal y proporcional al nivel de corriente o el voltaje de entrada. Las válvulas servo se distinguen de las proporcionales porque presentan una banda muerta de paso por cero de menos del 3% del recorrido del carrete. Para las aplicaciones críticas, se especifican válvulas servo por su mayor precisión y respuesta más rápida."* [20]

La diferencia de las válvulas eléctricas y las servoválvulas como actuadores en aplicaciones que transportan flujo a un sistema es que las válvulas eléctricas solo tienen la capacidad de un control On/Off, esto limita mucho la aplicación a solo corte de flujo ya sea por emergencia, proceso o como redireccionador de flujo, en cambio las servo-

válvulas y válvulas proporcionales permiten un “porcentaje” de apertura dependiendo de la señal de control esto da un hincapié a un control más específico que permita una mejor manipulación de alguna variable de interés.

Las servoválvulas tienen gran aplicación, se pueden usar en controles de vuelo, control de motor de aeronaves y motores aeroespaciales, en equipos pesados de aplicación industrial como en el proceso de moldeo por soplado en el cual se usa una servoválvula para permitir cierta cantidad en la salida de aire.

Como se mencionó en los objetivos específicos es necesario hacer una adaptación de la tecnología para actualizar el banco de pruebas, uno de los aspectos fundamentales de esta actualización es el cambio de actuador por uno que tenga una mejor respuesta, por eso surge esta solución de servo válvula.

## 6.1 Necesidades

*"Se entiende por necesidades a los atributos y requisitos que se desea en un proyecto, estas son independientes de cualquier producto particular que se pudiese desarrollar. Las necesidades se expresan como enunciados escritos que describen lo que el dispositivo tienen que hacer más no el cómo hacerlo" [21]*

Las personas responsables del proyecto en facultad de química fueron los que marcaron la pauta de las necesidades, estas necesidades fueron obtenidas en reuniones interfacultades donde se discutieron los puntos de vista respecto al proyecto.

Estas necesidades se resumen en los siguientes enunciados.

- El actuador debe de tener una respuesta más rápida que el motor a pasos.
- El actuador no debe dar tantas vueltas por que puede llegar trabarse al tener cambios bruscos en el valor deseado.
- El actuador debe ser barato.
- El actuador debe de tener límites correctos de saturación para la válvula.
- El actuador debe ser fácil de armar y desarmar.
- De un tamaño parecido al motor a pasos.

### 6.1.1 Requerimientos.

Los requerimientos son la forma de discernir las necesidades ya que no siempre van a ser directivas dadas por gente especializada en el tema, por eso mismo se tienen que traducir de lenguaje informal a un lenguaje técnico, en el caso específico de los requerimientos aún no se tienen que dar valores o soluciones, solo es un cambio en el enunciado de las necesidades.

<b>Necesidad</b>	<b>Requerimiento</b>
El actuador debe de tener una respuesta más rápida que el motor a pasos.	Velocidad de reacción mayor a la del motor a pasos.
El actuador debe tener los límites correctos de saturación para la válvula.	Evitar usar actuadores tipo multivuelta.
El actuador debe ser barato	El actuador y equipos extras no deben estar tan sobrados en sus límites máximos.
El actuador debe de tener una precisión que le permita moverse en intervalos pequeños de operación	Avance mínimo posible del actuador
El actuador debe ser fácil de armar y desarmar.	Espacio máximo del dispositivo
De un tamaño parecido al motor a pasos.	Espacio máximo del dispositivo

Tabla 1. Tabla de necesidades requerimientos.

Aumentar la velocidad de operación del actuador depende del tipo de tecnología que se usará para la actualización del banco y aun con el cambio de tecnología se tienen que ver específicamente las características del actuador, ya que es común que pese a tener el mismo principio de operación puede cambiar la velocidad de operación dependiendo la calidad del mismo.

Para permitir rangos pequeños de operación es necesario tener un actuador que tenga una resolución pequeña, la primera versión del banco de pruebas permitía unidades enteras en el ángulo condicionado por la programación.

Las dos últimas necesidades que pueden ser cumplidas con el tamaño del dispositivo con el actuador, una persona debe de ser capaz de manipularlo fácilmente con las manos, esto para evitar interferencias con las tuberías y elementos circundantes ni para que sea necesario usar herramienta para ponerlo o quitarlo y armarlo.

### 6.1.2 Especificaciones.

Las especificaciones consisten en pasar los requerimientos de un enunciado con lenguaje técnico a una métrica, algo aterrizado a una meta real, ya sean dimensiones, voltaje nominal, resistencia, materiales, entre otras.

Es dar el paso de la propiedad cualitativa a lo cuantitativo, quitando los juicios que pueda tener el personaje que proporciona las necesidades y le da forma a los requerimientos.

<b>Requerimiento</b>	<b>Especificaciones</b>
Velocidad de reacción mayor a la del motor a pasos.	Velocidad de operación.
Evitar usar actuadores tipo multivoltas.	Rango del actuador.
El actuador y equipos extras no deben estar tan sobrados en sus límites máximos.	Par del actuador. Velocidad del actuador.
Resolución del actuador	Resolución del actuador
Usar elementos de sujeción removibles.	Centímetros
Espacio máximo del dispositivo	Centímetros.

Tabla 2. Tabla de requerimientos especificaciones.

El poner valores nos permite tener una directiva de cómo tiene que ser el diseño final de la servoválvula.

<b>Especificaciones</b>	<b>Valores</b>	<b>Justificación</b>
Velocidad de operación.	0.14 [s/60°]	Es la velocidad de operación máxima que un servomotor a 6 [v] puede alcanzar a comparación de un motor a pasos común que es de .72 [s/90°]
Rango del actuador.	0 – 180 [°]	El tope mecánico evita que el actuador sea multivuelta y permite un rango definido.
Par del actuador.	17 [kg-cm]	El servomotor de medida estándar que cuenta con suficiente par como para que soporte sin problemas el flujo de 14 L/min que pasa la bomba, eso considerando el comportamiento ideal porque en realidad pasa menos flujo debido a pérdidas en accesorios.
Resolución del actuador	1 [°]	El servomotor puede llegar a valores más bajos de resolución, pero se optó por dejar esta resolución por la forma en que el código maneja los datos.
Centímetros	7 X 7 [cm] en plano 10 [cm] altura	Estas mediciones son lo máximo permitido para que el dispositivo sea fácil de armar y desarmar sin necesidad de herramienta pesada ni que interfiera con los demás elementos del banco en el momento desmontarlo y armarlo.
Centímetros	7 X 7 [cm] en plano 10 [cm] altura	Estas mediciones son lo máximo permitido para que el dispositivo no estorbe a las tuberías contiguas y se pueda sostener solo.

Tabla 3. Tabla de valores y justificación.

Después de que los requerimientos hayan dado las suficientes directivas para el desarrollo se puede pasar a la generación de un concepto integrador usando como base los requerimientos.

### 6.1.3 Concepto.

*“Un concepto es una descripción aproximada de la tecnología, principios de trabajo y forma del producto; en otras palabras es una explicación concisa de la forma en que el producto va a satisfacer las necesidades; se expresa como un bosquejo o como un modelo aproximado y a veces es acompañado por una breve referencia.” [22]*

Se desarrollaron diferentes conceptos para llegar a una solución de actuador final, generando varias opciones por piezas.

Como un requerimiento extra se plantea un sistema modular en el actuador, es decir que todas las opciones cuenten con el mismo tipo de agarre, 4 tornillos de sujeción entre bases en puntos específicos para permitir una independencia de elección a futuro cuando se necesite escoger la mejor opción o en su debido caso la más viable.

Cople.

El cople es la parte que une a la válvula con el servomotor, es importante que no pierda su posición y que nunca se barra, el cople se encarga de la transmisión de movimiento por lo tanto es fundamental generar una solución que sea robusta, duradera y funcional pero sin perder de vista que sea fácil de armar y posicionar.

### Primera opción



Figura 6.2 Primera opción de solución de cople.

Cople de válvula que consiste en una parte roscada y en la parte inferior tiene un espacio justo para que entre la válvula.

Para esta opción es necesaria la intervención al servomotor donde se le quite la parte del eje estriado estándar y se le coloque este cople personalizado.

Se tendría que usar CNC para producir la pieza o en su debido caso impresión 3D de calidad alta (Impresión por polvo de preferencia) para que tenga las propiedades mecánicas necesarias para soportar los cambios de la válvula.

No necesita tornillos para la sujeción ya que este cambio es una adecuación interna al servomotor y la válvula al tener una sujeción rectangular con hacer embonar las piezas es suficiente sujeción ya que no tiene riesgo de barrerse.

No tiene gran dificultad en el armado y para montarlo en el dispositivo porque ya es parte del actuador en sí.

Segunda opción.

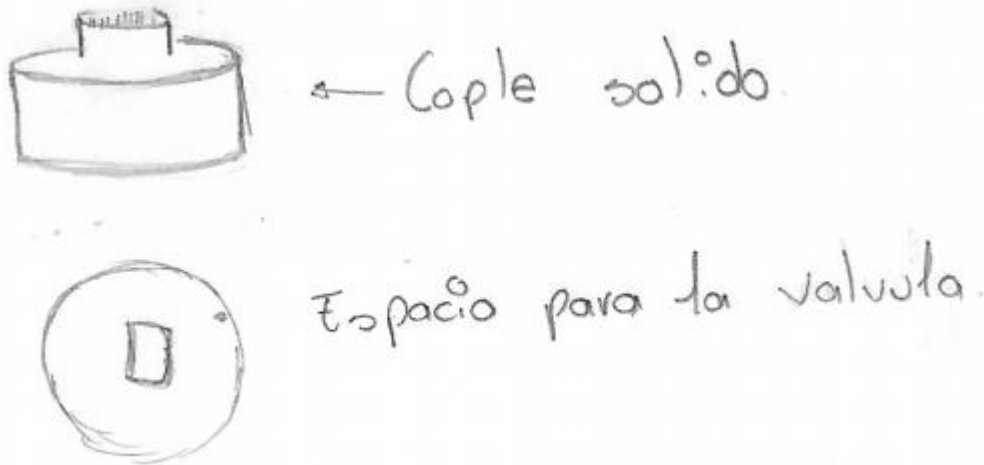


Figura 6.3 Segunda opción de solución de cople.

La segunda opción consiste en una pieza sólida que embone en la parte estriada del servomotor y en la parte inferior esté el espacio para la válvula.

No se tiene que modificar el servomotor ya que se usa el estriado del cople y al ser una pieza sólida tiene gran resistencia a fracturas.

La forma de fabricación de esta pieza tiene que ser por CNC o en impresión 3D de alta precisión para que tenga la capacidad de dejar un estriado coincidente para el motor, cabe la posibilidad de hacerla por termoformado pero se tendría que consultar a un experto para el cople del estriado del motor o usar una muestra del motor para hacer una especie de “estampe” del patrón calentando la pieza.

Al usar el estriado y la parte rectangular de la válvula no es necesaria una unión con tornillos, solo se necesita hacer embonar en ambas piezas para el inicio de transmisión de movimiento.

Al ser solo una pieza que entra por ensamble no representa gran dificultad el montar y armar en el dispositivo de igual manera es intuitivo ya que no hay forma de que se conecte al revés o se coloque de manera equivocada.



Tercera opción.

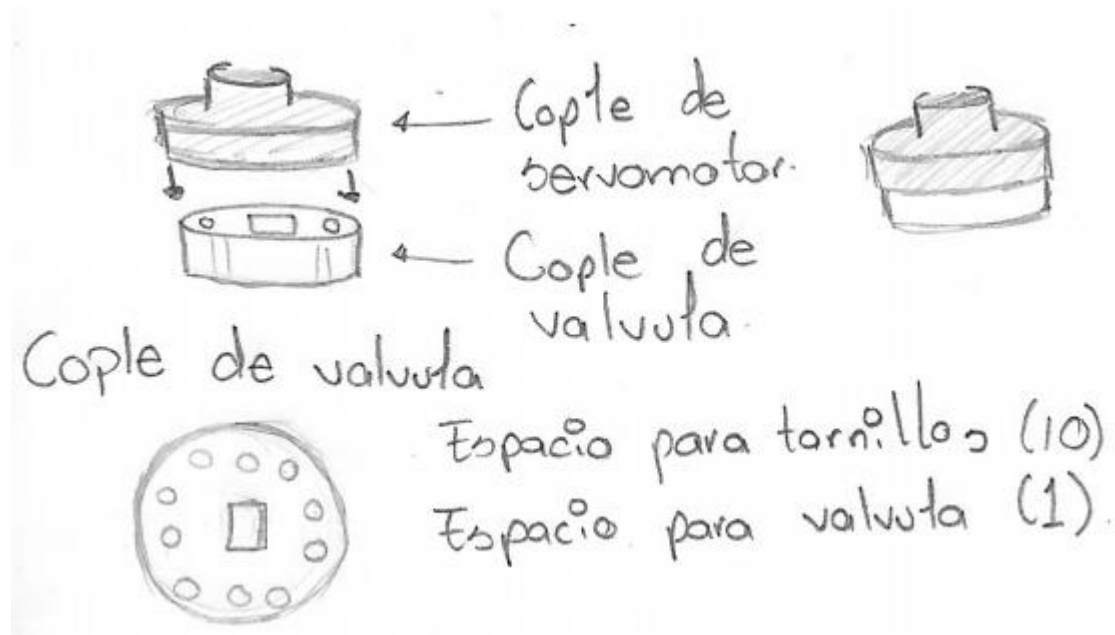


Figura 6.4 Tercera opción de solución de cople.

La tercera solución consiste en usar el accesorio del servomotor para evitar el proceso de manufactura del cople de la parte estriada debido a su relativa dificultad, consiste en dos piezas, el accesorio de circular que viene en el servo y una parte que cuenta con 10 orificios que coinciden con los orificios del accesorio y en el centro el cople rectangular para la válvula.

Pierde un poco en la facilidad de posicionamiento y armado ya que en esta solución si se necesita sujeción por tornillos, al menos 2 para que no se barra el cople, el hecho de necesitar tornillos también obliga a utilizar herramienta y a su vez vuelve menos intuitivo que las otras dos opciones ya que en una la solución ya viene incluida en la adecuación del servo y en la otra es solo una pieza en contraste con esta que tiene al menos 4 piezas (contando los tornillos de sujeción).

Esta opción de cople puede ser producida por corte laser ya que debe de tener un grosor no mayor a 6 mm lo cual permite hacer uso de esta tecnología al contrario de las otras opciones que debido a su dificultad de manufactura el corte laser era una opción inválida.

Estructura.

La estructura se compone de dos piezas, la parte que sostiene a la válvula y la que sostiene el servomotor, que a su vez se conectan por tornillos para hacer presión y mantener posición.

Sujeción del servomotor.

El servomotor tiene que estar bien sujetado para evitar que se barra y afecte el ángulo que manda el control, se propusieron dos opciones para la sujeción del servomotor.

Opción 1.

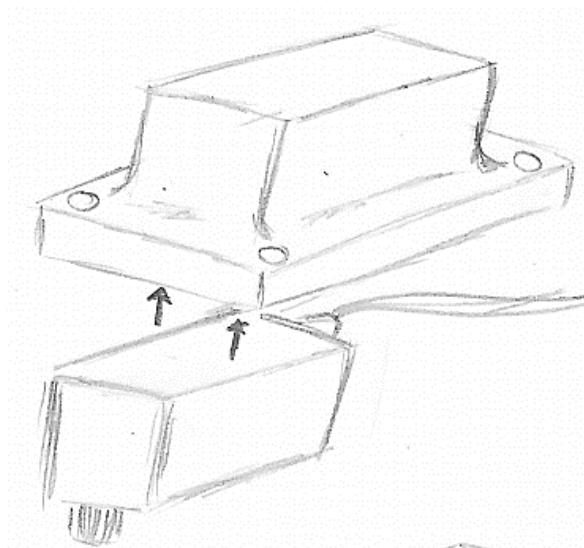


Figura 6.5 Primera opción de solución de sujetador de servo.

La primera opción es una sujeción tipo capuchón usando la geometría rectangular fácilmente replicable del servomotor, se le puede hacer un recubrimiento total para evitar tener agarres extras y limitar el movimiento del motor dándole todo el peso a las 4 sujeciones principales entre bases (tornillos de conexión).

El capuchón debe de tener obligatoriamente un lugar por donde pase el cable de conexión del servomotor, sin este orificio puede llegar a romper el cable o acortar la vida del actuador.



Figura 6.6 Parte trasera del capuchón donde se ve el espacio para el cable.

El esquema del modelo completo tomando una de las soluciones de la válvula se vería de la siguiente manera.

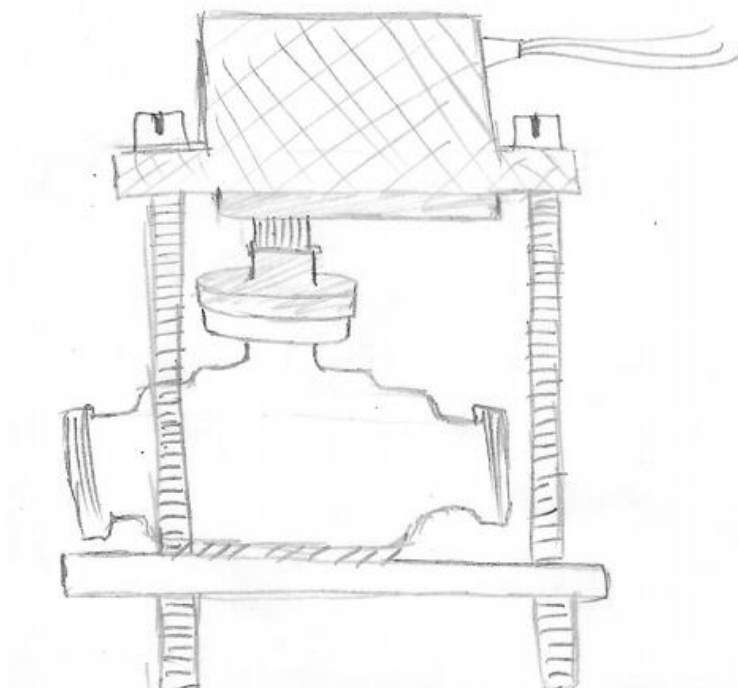


Figura 6.7 Esquema de la válvula con capuchón.

Se observa como el movimiento del servomotor no necesita restringirse debido a que el capuchón está aprisionando todo el servomotor dejándole todo el trabajo a los tornillos principales de sujeción.

El capuchón tiene la ventaja de no necesitar sujeción extra pero tiene la desventaja en la forma de fabricación, puede ser por impresión 3D con el peligro que conlleva la misma en la resistencia mecánica de las piezas, se puede hacer uniendo piezas para formar la caja

pero con el peligro de las uniones que son más propensas a la falla o con métodos más especializados como termoformado o soplado de las cuales no se cuenta una instalación viable para su proceso y en el caso del soplado se necesitaría un molde negativo como requisito previo.

Opción 2.

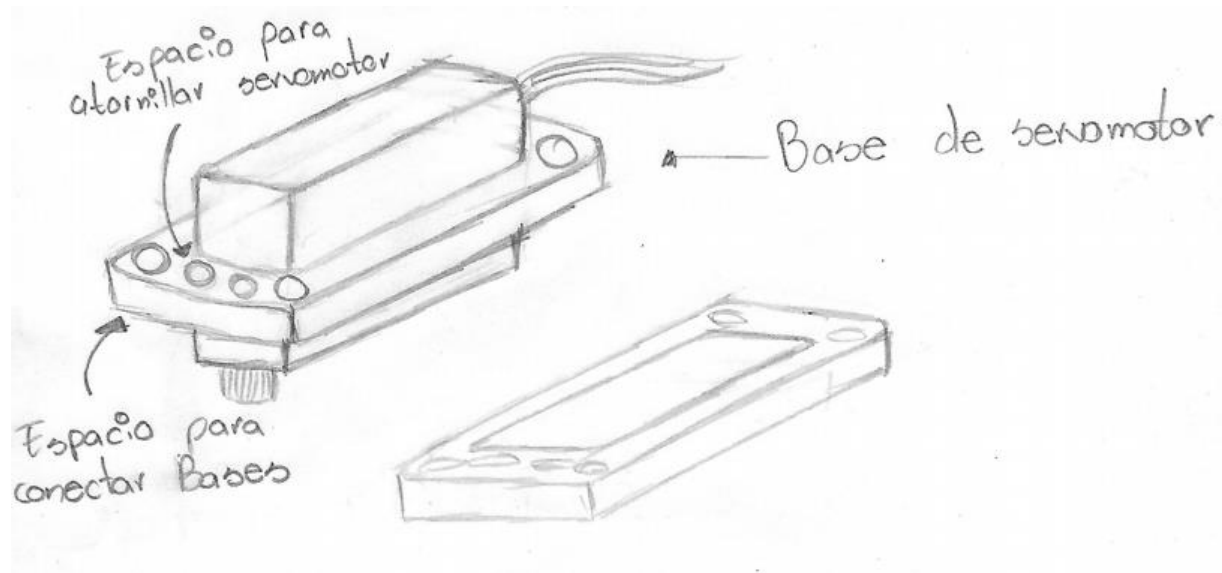


Figura 6.8 Segunda opción de solución para el sujetador del servo.

Este sujetador de servo a comparación de la primera opción no envuelve todo el servomotor solo lo sostiene y usando los agarres que tiene el servo mantenerlo en su lugar atornillándolo.

La base consiste en un ajuste alrededor del servo con 4 orificios para los tornillos conectores de base y otros cuatro que coinciden con las agarraderas del propio servo para poder asegurarlo.

Esta base elimina la complicación de manufactura, por el grosor necesario para la pieza se puede manufacturar con corte laser en material de 3 mm aunque aumenta los puntos de falla dejando muy poco material en partes que sufrirán mucha torsión como lo son los 4 orificios para los tornillos de conexión a las bases.

Otra gran ventaja de esta base es que pese a su posible fragilidad puede ser replicada fácilmente y no solo con corte laser, si no con plantillas de manera manual y si se quiere

aumentar su resistencia a la torsión provocada por el servomotor sobre los tornillos base, se pueden apilar las piezas para hacer más robusta la servo válvula y llegar a un grosor de hasta 1.2 [cm] por base (Considerando que se apilan piezas de grosor de 3 [cm]).

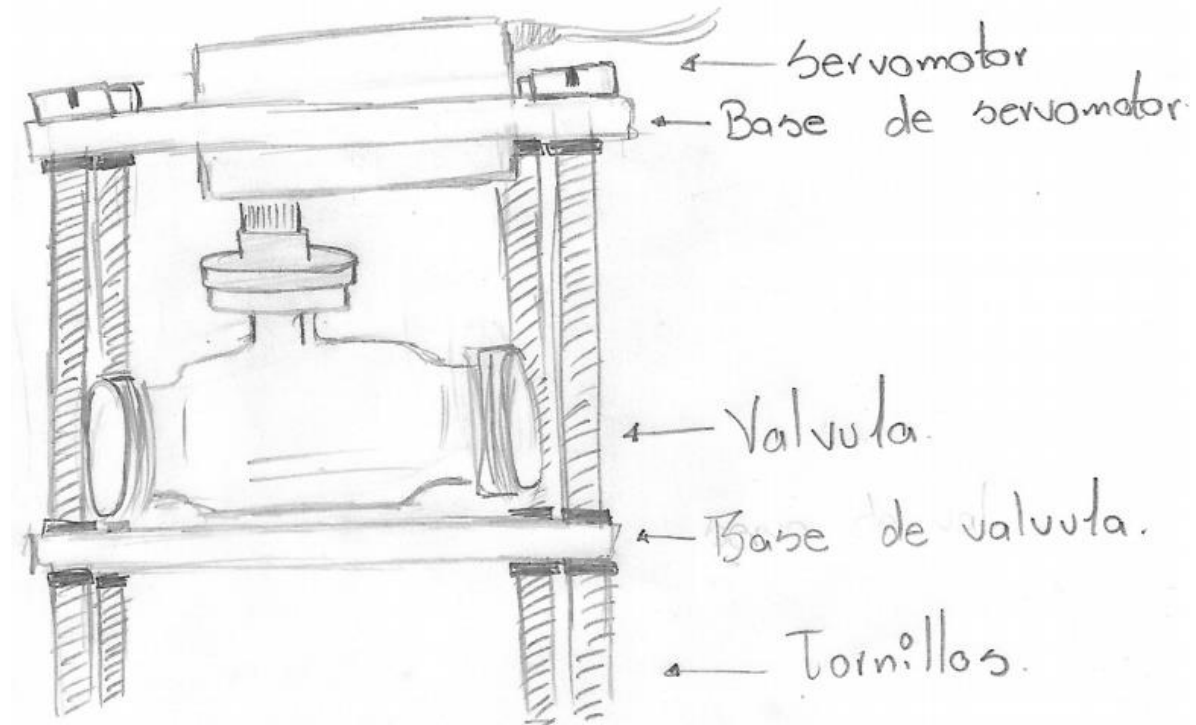
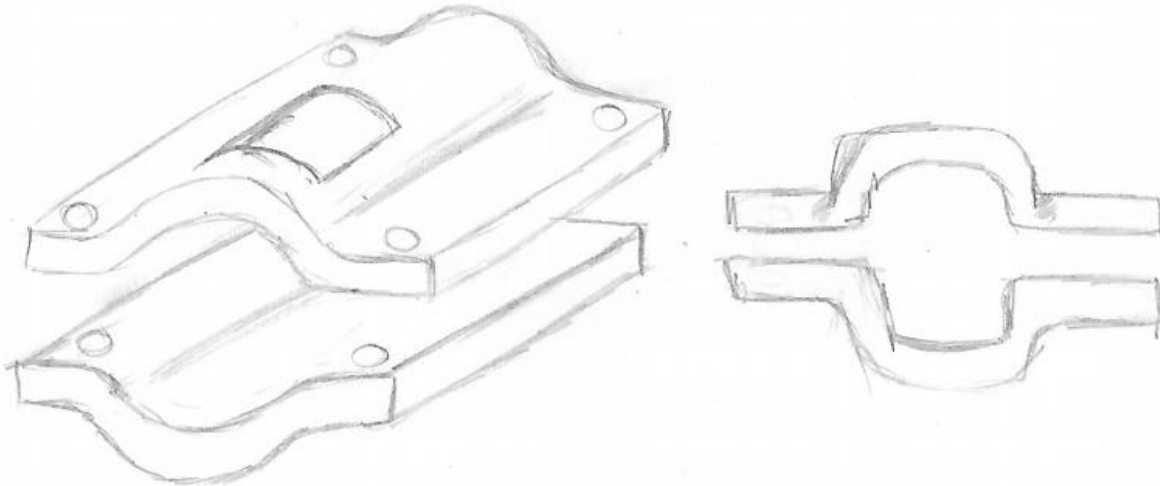


Figura 6.9 Esquema del servomotor con la pieza de orificios.

### Sujeción de la válvula.

La válvula tiene que estar sujeta y no puede tener movimientos bruscos ni torsión en ninguna dirección ya que estará conectada directamente a tuberías con flujo y si hay mucho movimiento puede haber fracturas en los tubos y generar fugas que son un peligro para los equipos electrónicos y en casos extremos si entra en contacto con la etapa de potencia puede ser potencialmente peligroso para la seguridad de los usuarios.

## Opción 1.



a) Pieza en vista isométrica.

b) Pieza en vista frontal.

Figura 6.10 Primera opción de solución para el sujetador de válvula.

La primera aproximación para el sujetador de la válvula tiene el concepto de la opción 1 del sujetador del servo, es una cobertura completa de la válvula, le da seguridad y limita completamente el movimiento.

Consiste en dos cubiertas que se acoplen en la válvula y que a su vez se conecten con la base del servomotor.

Sirve para evitar los movimientos en todas las direcciones y debido a su forma evita que la torsión, el problema principal viene en la forma, ya que no es tan fácil cuadrar la forma de las dos bases con la válvula a contrario del servo que tiene una forma rectangular definida.

Aparte de la forma tan específica que tiene necesita un orificio por donde pase la parte superior de la válvula para poder hacer la conexión con el cople para el servomotor, de lo contrario sería imposible usarla.

La manufactura debido a su forma debe de ser por termoformado tomando como base la misma válvula o por impresión 3D con sus debidas limitaciones ya que al ser una geometría tan específica el modelado 3D no sería tan fácil y se necesita tener un grado de expertis en algún programa de diseño previamente.

El modelo teóricamente cubriría toda la válvula excepto la parte de entrada y salida del flujo y tendrá los cuatro orificios para conectar los tornillos entre bases.

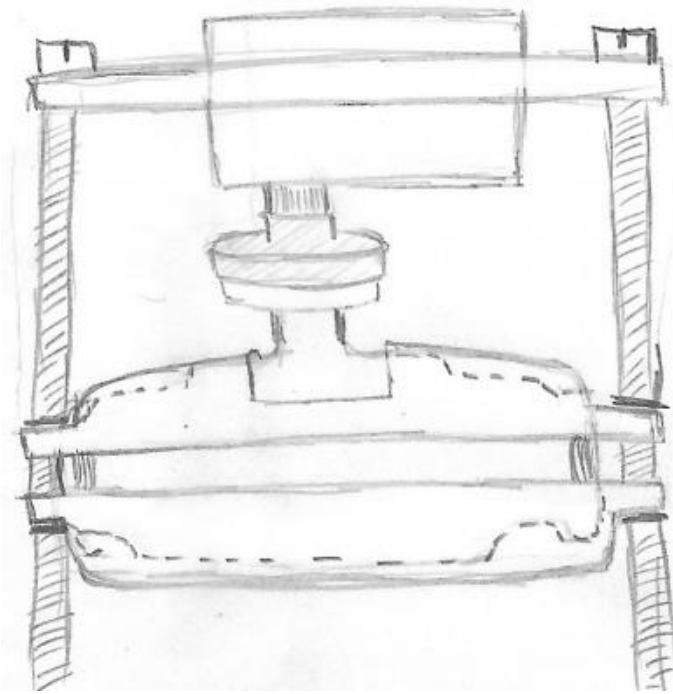


Figura 6.11 Esquema del servomotor con la pieza de la válvula en forma de sábana.

## Opción 2

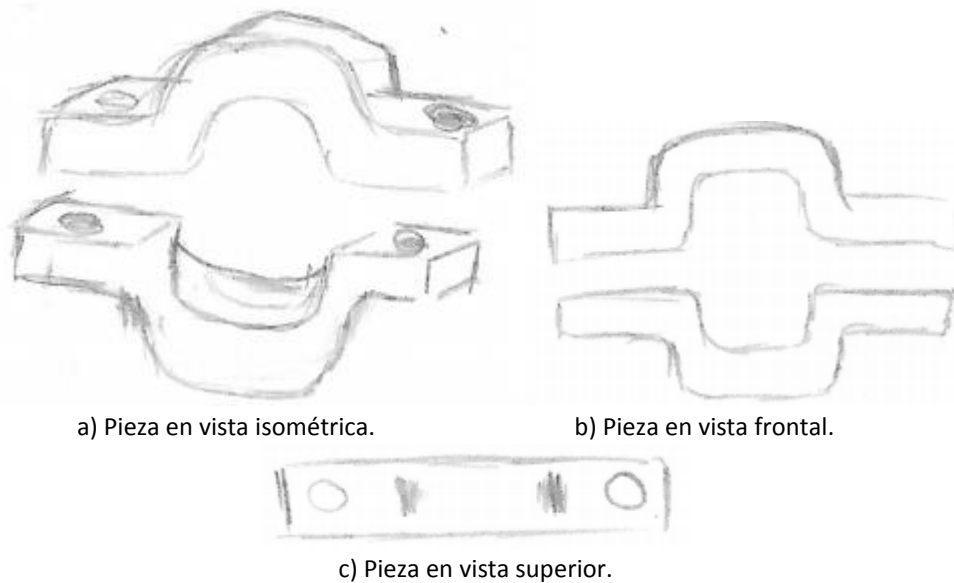


Figura 6.12 Segunda opción de solución para el sujetador de válvula.

Esta solución es una adaptación simplificada de la primera, el hacer todo un recubrimiento en cierto punto puede llegar a ser complicado y limitarse a solo una válvula, ya que no todas las válvulas en el mercado son iguales.

Esta segunda opción propone que en vez de una pieza completa sean 4 partes que hagan una pinza en las partes más uniformes de la válvula que se encuentran en todas las válvulas antes de la entrada y salida de flujo esto por la forma en que todas las válvulas se producen y la necesidad que tienen de tener un regreso a flujo laminar después de la perturbación que existe en el punto de corte (ya sea de tipo globo o barrera).

Su manufactura puede tener varias soluciones, el más sencillo debido a la familiaridad con la tecnología sería por un proceso mixto de corte laser y manual (para los orificios de los tornillos de sujeción de base) ya sea con un corte en material de grosor de 1.2 [cm] a 3 [cm]

Otra forma fácil de producirla es por medio de impresión 3D con las debidas limitaciones del material a esfuerzos ya mencionadas y considerando la poca área en la que está concentrado todo el esfuerzo se necesitarían hacer pruebas previas si se llega a elegir esta opción.

El modelo completo se vería de la siguiente manera con el doble agarre en la parte uniforme de la válvula para darle más versatilidad al diseño.

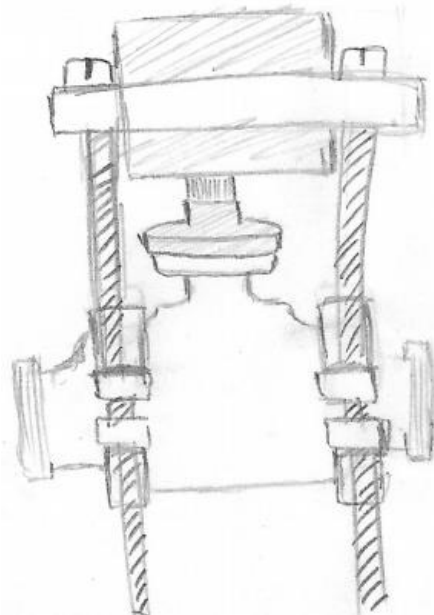


Figura 6.13 Esquema del servomotor con las piezas tipo pinza.



### Opción 3

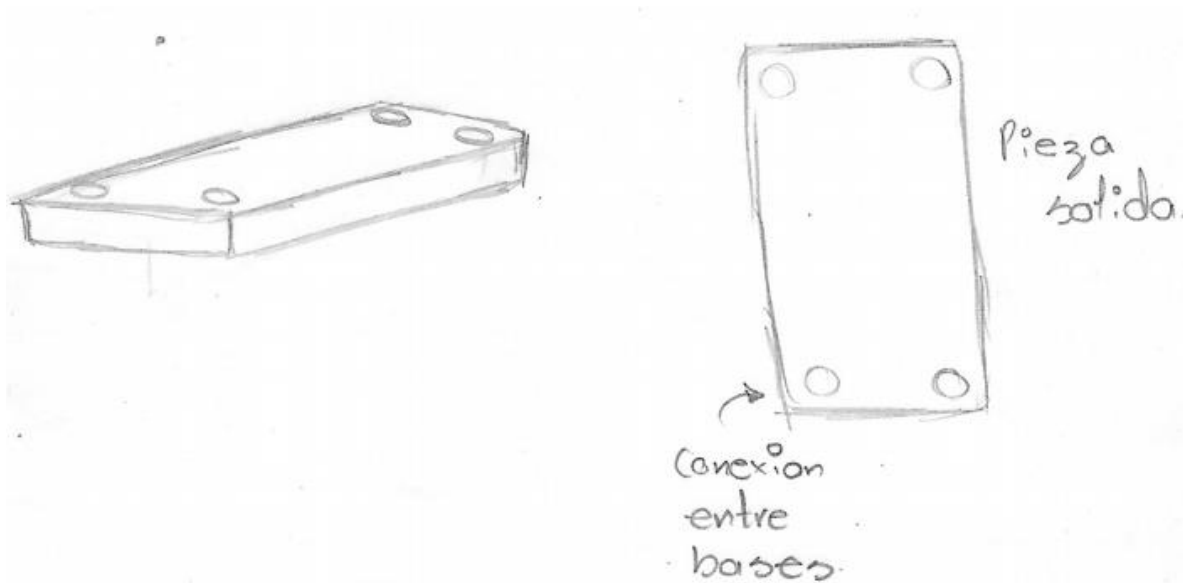


Figura 6.14 tercera opción de solución para el sujetador de válvula.

La opción 3 es mucho más sencilla consiste en un rectángulo con los 4 orificios de conexión a bases.

Esta opción surge de la necesidad de hacer lo más sencillo posible el agarre, esto después de que todas las opciones anteriores tienen gran complicación en su manufactura.

Buscar hacer que la pieza salga solo con un corte laser o manual usando plantillas es un plus a este diseño, el hecho de que sea una pieza solida también le da robustez y se puede aumentar su resistencia aún más apilando varias piezas algo que es imposible con los otros diseños.

#### Opción 4

Variante de la tercera opción quitándole material para hacer a la pieza más ligera, al quitar material se fragiliza la estructura, se necesitan hacer pruebas de resistencia si se escoge esta opción para el desarrollo físico.

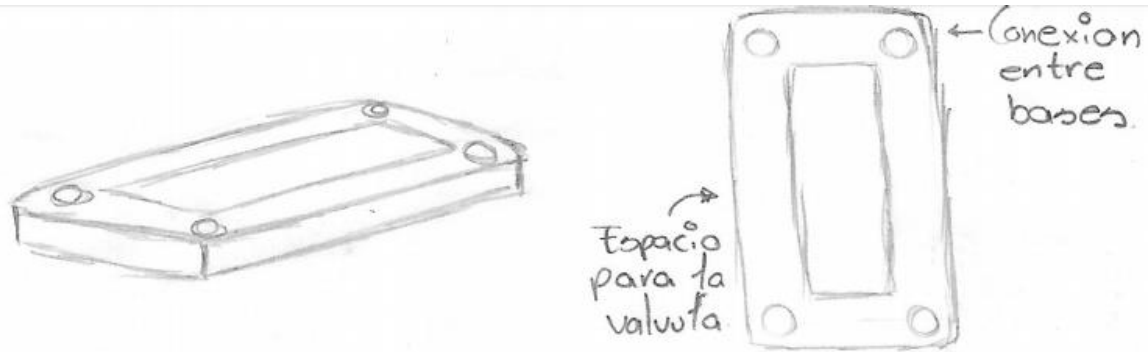


Figura 6.15 cuarta opción de solución para el sujetador de válvula.

## 6.2 Solución.

La primera resolución tomada en el apartado de solución, ya fue mostrado en los apartados pasados de este desarrollo (Apartados 5 y 6) pero en este capítulo se argumentará porque se decidió.

Hablando sobre el uso del servomotor como remplazo de la tecnología de motor a pasos, con este cambio de actuador se cumple los primeros cuatro requerimientos, velocidad, rango del actuador, par del actuador y resolución.

Se pedía que el actuador tuviera una respuesta mucho más rápida que la de la tecnología del motor a pasos, lo cual se logra con el servomotor HD-1501MG que *“puede recorrer 60° en un segundo con una alimentación a 6 [v]”*[23] en un motor a pasos debido a su funcionamiento mecánico alcanzar velocidades de reacción muy grandes puede resultar en errores, entre los cuales destacan, vibraciones involuntarias, girar en sentido opuesto, perdida de potencia, giro errático o simplemente que no reaccione ante la señal de control.

El eliminar el funcionamiento multivuelta que tenía el motor a pasos se consigue debido al tope mecánico que tienen el servomotor que regula las posiciones de 0 a 180 grados y la única forma de que esto no se cumpla es que se retire el tope físico interviniendo al

servomotor o que se dañe por tratar de forzarlo al valor límite a gran velocidad y que por la misma inercia rompa el tope.

El par del actuador es un valor proporcionado por química obtenido por pruebas empíricas, el par de 17 [kg-cm] es un valor de servomotor estándar.

Respecto a la resolución del actuador, un motor a pasos puede dar avances mínimos entre  $.72^\circ$  a  $1.8^\circ$  dependiendo la calidad del motor a comparación del servomotor que tiene una resolución de  $1^\circ$  esto no resulta un problema debido a que en el código donde se controla el motor a pasos se condiciona el avance de pasos a enteros por lo tanto el servomotor no perdería información si el paso llegara a tener decimales ya que se convierte a entero perdiendo la información desde antes de que se llegue a la señal de control.

Estructura.

Una ventaja para este diseño en específico es la independencia de los elementos de opción para cada pieza, esto gracias a la condición inicial que se plantea de tener 4 sujeciones en puntos específicos de las bases lo cual le da una especie de “modularidad” al diseño conceptual, lo que permite escoger las mejores piezas o las más convenientes según el caso sin necesidad de tener restricciones de ensamble de otras piezas.

Cople.

Para el cople se escogió la opción 3 que consiste en 2 piezas, el accesorio del servo y el elemento hecho con corte laser, pese a perder la facilidad de conexión ya que se tiene que usar herramienta para la sujeción entre piezas se gana la facilidad de reemplazar piezas si se rompe alguna, al contrario de las otras dos opciones que al tener formas de manufactura más especializadas el mandar a maquinar o imprimir en polvo sería caro y tardado a comparación de un corte laser que puede ser realizado en 5 minutos y se pueden tener varios recambios de la pieza y con respecto al accesorio de servo se puede comprar ya que es una pieza común en el mercado.

Entre las desventajas principales específicas de las otras opciones que fueron desechadas.

En la opción 1 específicamente no es viable su aplicación debido a la intervención del servomotor que puede llegar a ser peligrosa para el dispositivo si no es realizada por alguien con conocimientos previos del actuador y las piezas al ser tan pequeñas pueden llegar a perderse o romperse.

La opción 2 pese a ser la pieza que tiene mayor robustez de las 3 debido a que es una pieza completa dependiendo el material que se use puede llegar a barrerse fácilmente la parte del estriado y se tendría que cambiar la pieza completa pese a que el lado de la válvula no tenga problemas.

Sujetador de servomotor.

El servomotor tenía dos opciones, el capuchón y la pieza perforada.

Se decidió que la pieza perforada tiene un mejor desempeño a comparación del capuchón ya que la forma de manufacturar la opción uno de sujetador tiene que ser impresión 3D que es la tecnología disponible y por eso mismo no tendría las propiedades mecánicas como para soportar la torsión provocada por la oposición de 4 tornillos ante el movimiento del servomotor sobre la válvula, en el caso de la pieza perforada si llega a no aguantar la torsión se pueden apilar varias piezas para aumentar la resistencia.

De la misma manera la pieza perforada se gana fácil replicabilidad y se pueden tener varios repuestos preparados en caso de algún problema.

Sujetador de servomotor.

De igual manera que la decisión del sujetador del servomotor la opción 1 y 2 de este apartado quedan eliminadas directamente debido a la forma de manufactura que es o muy complicada o usando la tecnología que se tiene a disposición, la impresión 3D, que tiene propiedades mecánicas muy bajas y no sería capaz de aguantar toda la torsión que soportan los 4 tornillos de sujeción provocada por el movimiento del servomotor contra la válvula.

Esto margina la decisión a la opción 3 y 4 que en realidad tienen el mismo principio solo que uno se deja con un orificio en donde tiene que embonar la válvula para dar una sujeción extra.

Se tomó como decisión tomar la opción 3, la opción 4 usa menos material pero por eso mismo tendría menos resistencia ante la torsión, sin mencionar que el orificio en forma rectangular de la pieza tiene unas dimensiones específicas para una válvula en cuestión, pero no todas las válvulas son iguales, esto nos podría dar como resultado que la válvula no entre correctamente y llegue a interferir con el tubo que conecta directamente la válvula, sin mencionar la facilidad de manufactura de la opción 3 que es la pieza perforada y la posibilidad de apilar para dar más resistencia.

### 6.3 Construcción.

Ya con las piezas de estructura elegidas y el actuador definido se puede pasar a la construcción.

La estructura consiste de 4 piezas:

- Pieza rectangular perforada para la válvula.
- Pieza rectangular perforada para el servomotor.
- Pieza de cople con orificios para sujeción.
- Accesorio de servo.

El proceso de manufactura elegido para estas piezas será corte laser en acrílico de 3 [mm].

Se usará el acrílico porque es maleable, duradero, flexible, fácil de trabajar, puede venir en diferentes colores, ligero, resistente y algo fundamental para la elección de este material es que también es resistente a la humedad y no se degrada al contacto continuo con agua, parte importante si se va a usar en este tipo de aplicaciones con flujo corriente debido a posibles fugas, fallos en la válvula o en la tubería que no siempre se pueden prever.

La sujeción de 4 puntos del dispositivo será con 4 tornillos de 1/8 [in] con sus respectivas tuercas y se usarán rondanas de presión para que con el movimiento no se aflojen.

Al ser manufactura por corte laser se necesitan hacer los planos de corte, estos se hacen en programas de modelado 3D y diseño.

- Pieza rectangular perforada para servomotor.

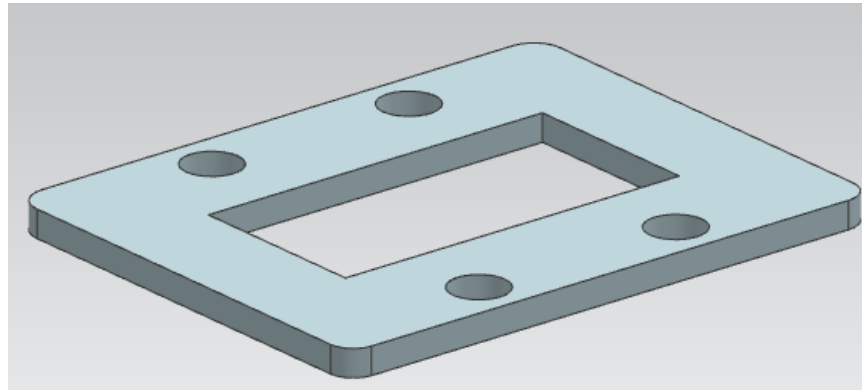


Figura 6.16 Vista isométrica del modelado 3D de la pieza del sujetador del servomotor.

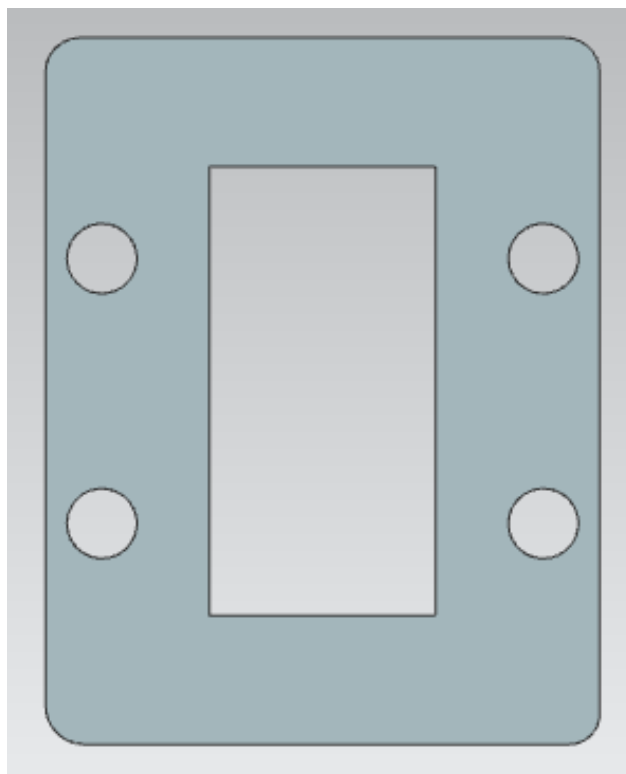


Figura 6.17 Vista superior del modelado 3D de la pieza del sujetador del servomotor.

- Pieza rectangular perforada para la válvula.

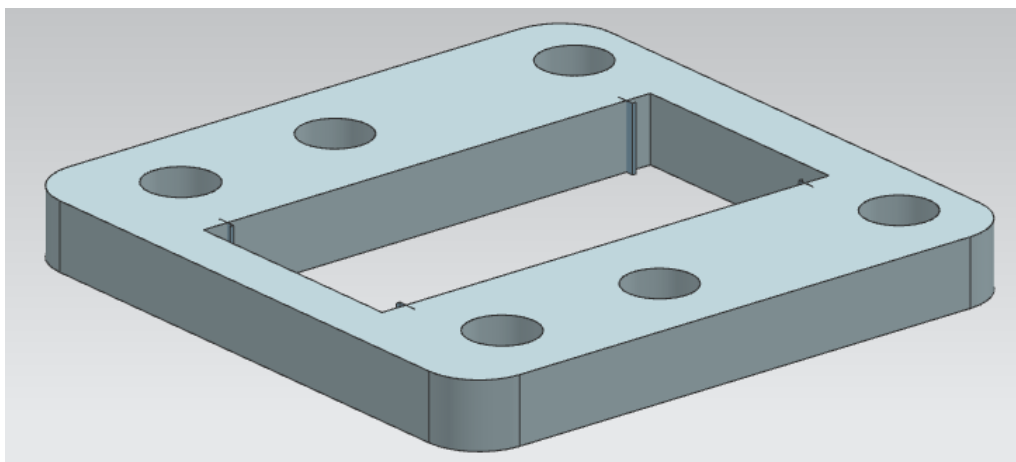


Figura 6.18 Vista isométrica del modelado 3D de la pieza del sujetador de la válvula.

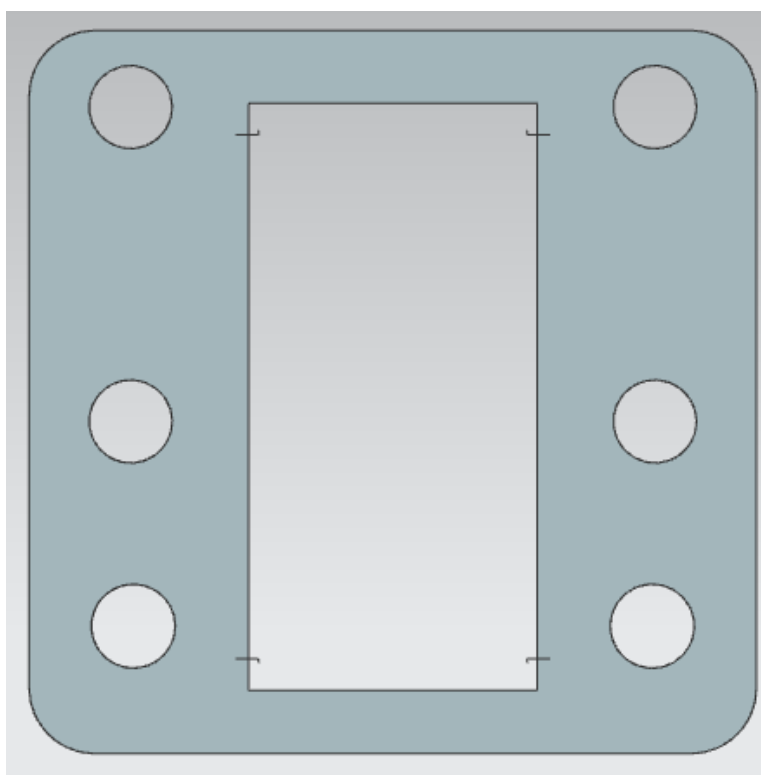


Figura 6.19 Vista superior del modelado 3D de la pieza del sujetador de la válvula.

- Cople de sujeción.

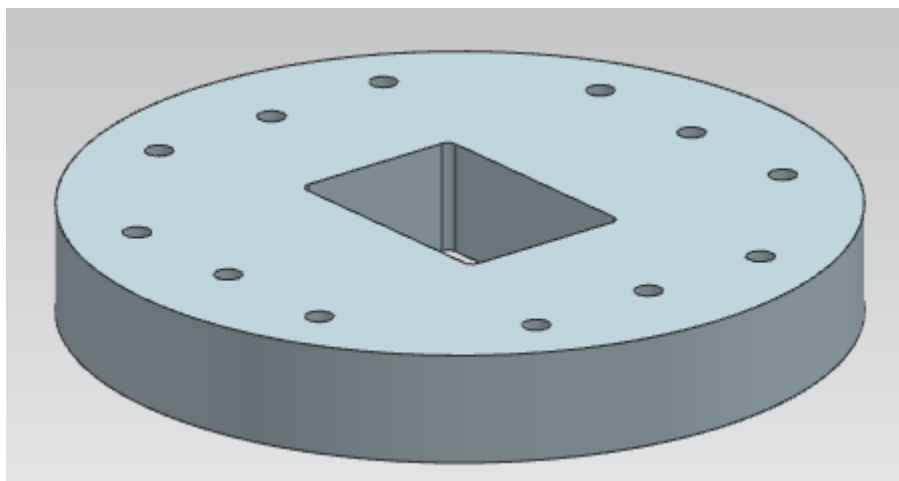


Figura 6.20 Vista isométrica del modelado 3D de la pieza del cople.

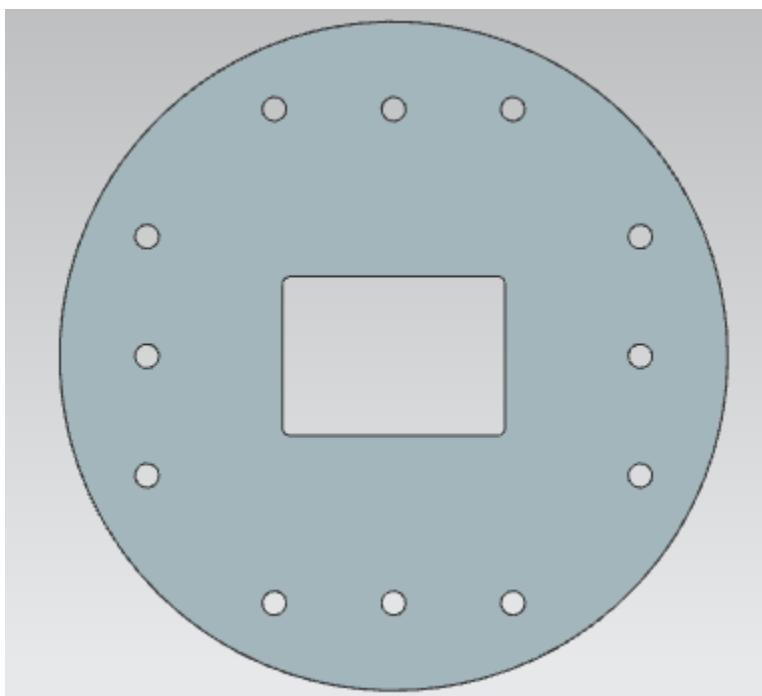


Figura 6.21 Vista superior del modelado 3D de la pieza del cople.

Las medidas específicas de todas las piezas con acotaciones se encuentran en el anexo I [Planos].



Las piezas en 3D nos permitirán sacar los planos para el corte laser y ver dimensionalmente antes del armado real un previo virtual de cómo se vería el modelo completo, esto evita errores de armado y de dimensionamiento usando la función de ensamble del programa de diseño.

Con el modelo final podemos cumplir la última especificación de espacio necesaria para cumplirlas todas, las medidas del modelo completo están en el anexo I [planos]

Modelo completo de la servoválvula.

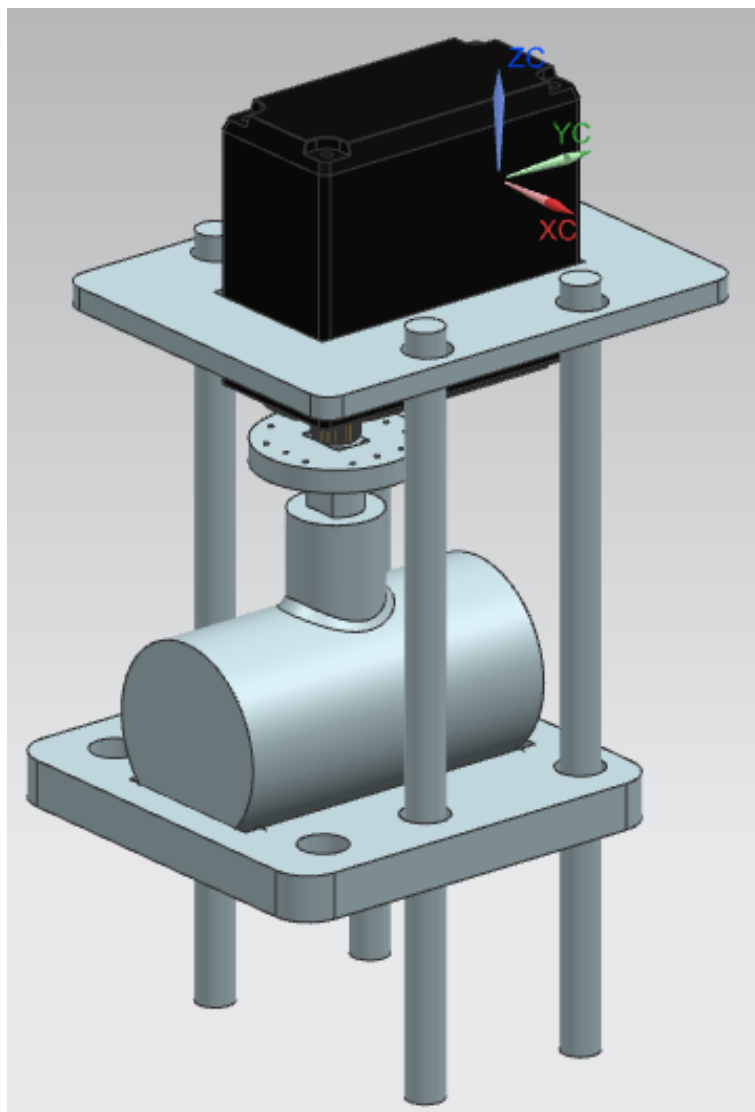
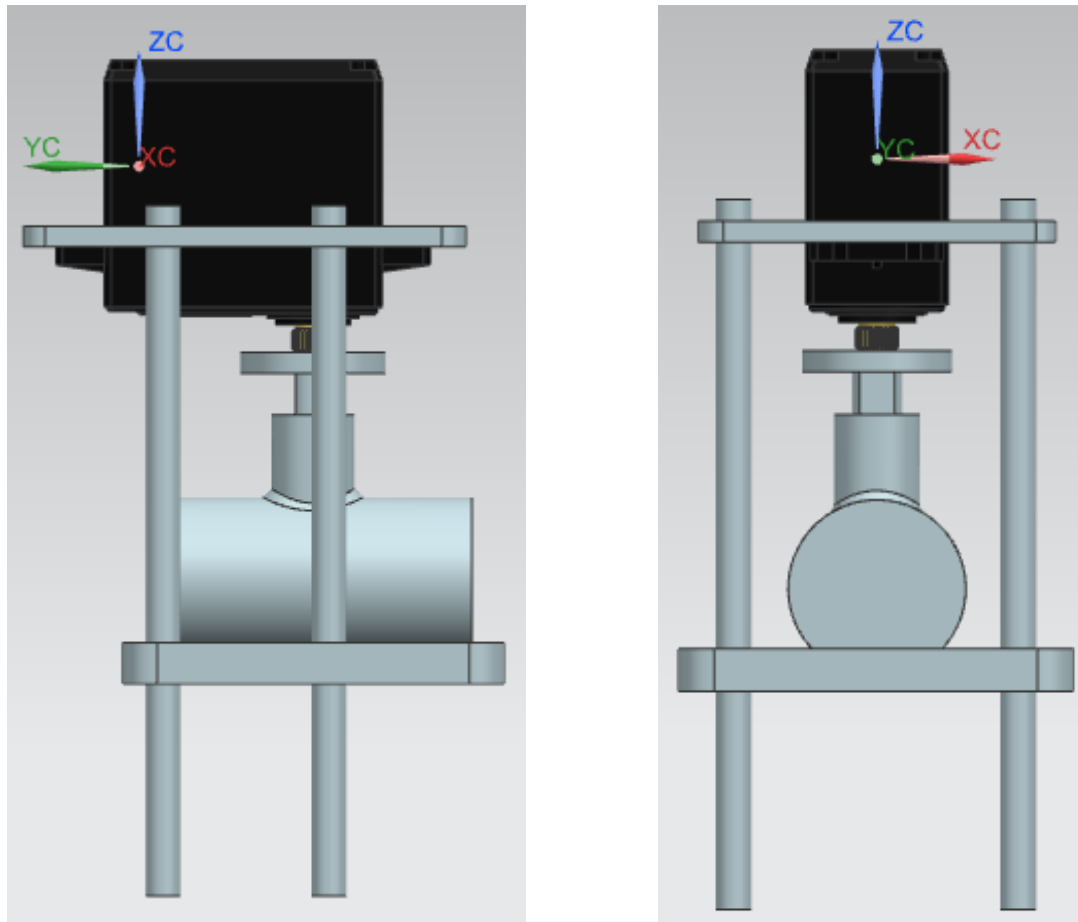


Figura 6.22 Vista isométrica del modelado 3D ensamblado.



a) Vista lateral.

b) Vista frontal.

Figura 6.23 Vistas del modelado 3D ensamblado.

Para el ensamble las piezas que no van a ser cortadas necesitan un equivalente virtual para el ensamble.

Para la válvula virtual se tomaron las medidas de la válvula real y se hizo una simplificación de la forma a la más básica posible pero que mantenga la esencia y medidas de la original que funcione como un esquemático de la válvula.

Para los tornillos de la misma manera se hicieron esquemáticos para ver si las bases tenían los orificios de conexión en las posiciones correctas y si no había interferencias en general entre elementos de la servoválvula.

Para los planos de corte de la misma manera se usa un programa de diseño, en modo de dibujo en plano.

El modo automático de pieza (asistente para creación de vistas) permite escoger la vista que se necesite del modelo 3D generado en el modo 3D.

El plano para corte tiene que ser coincidente con el tamaño de acrílico a cortar para mantener las mismas referencias y medidas, en este caso la lámina mide 190X280 [mm].

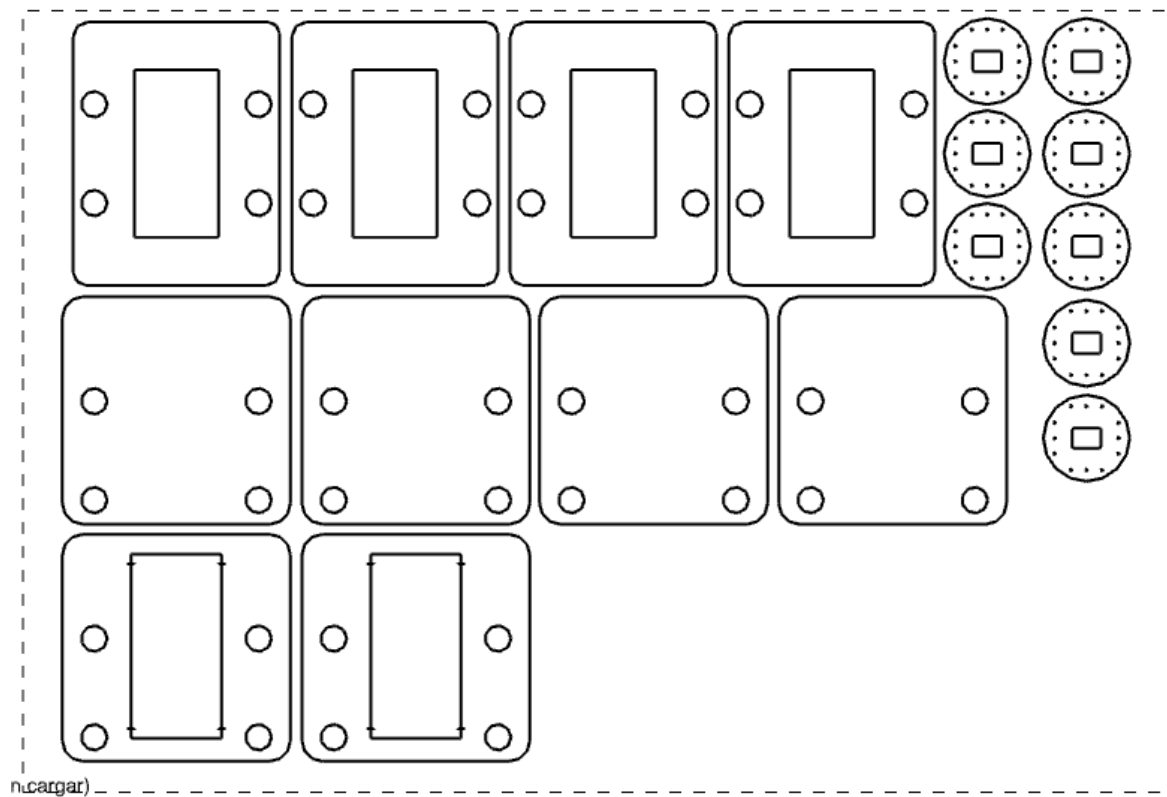


Figura 6.24 Plano de corte.

Los modelos se acomodan de manera específica para aprovechar el máximo de área de corte.

Viendo el plano podemos ver la facilidad de la replicabilidad de las piezas y como esta ventaja nos da la posibilidad de tener rápidamente las servoválvulas y repuestos para la misma sin necesidad de procesos de manufactura tardados.

Con las piezas ya cortadas se procede a armar y ver que todo ensamble de manera correcta.

Los espárragos que se usan como elemento de unión deberán estar pasados para permitir que se asiente sola y ayude a darle soporte a la estructura.

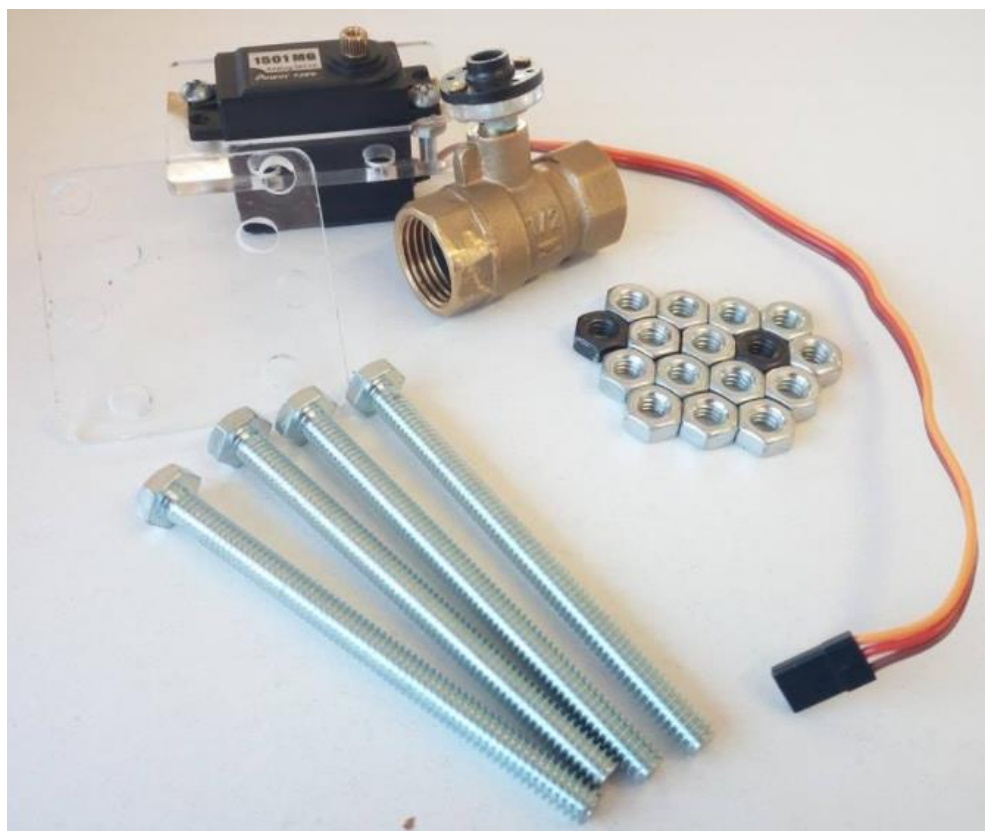


Figura 6.25 Piezas reales salidas del corte laser, válvula y conexiones.

Los orificios para el agarre del servomotor se hacen de manera manual para tener un mejor control de la posición y evitar fragilizar más la pieza quitándole más material de lo necesario.

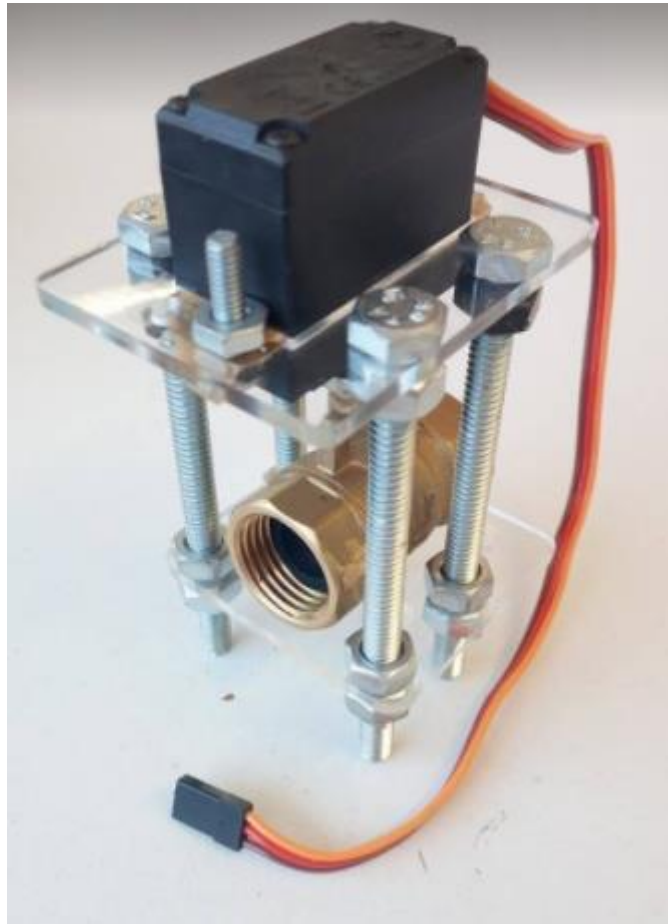
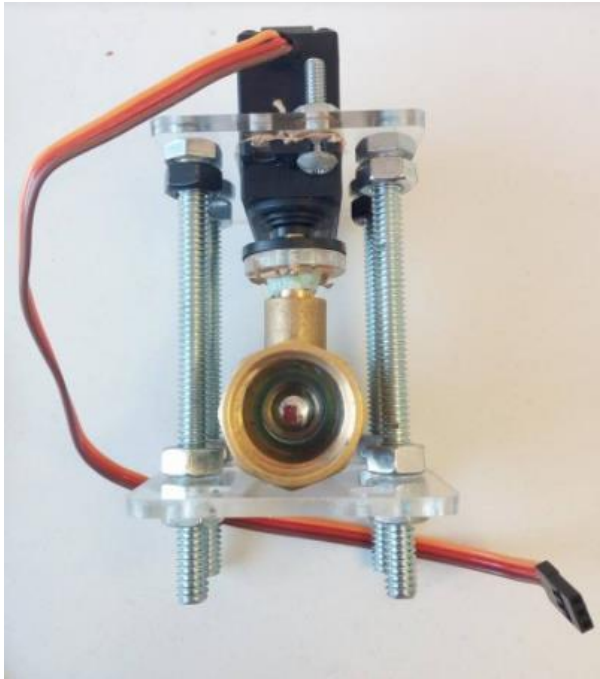


Figura 6.26 Primera versión de la Servoválvula.

El problema que se observó es que el acrílico en la parte del cople de la válvula se iba cortando poco a poco debido a la cuerda que tenía la válvula al final de la conexión mecánica (Esto debido a que la válvula tenía una palanca que se mantenía en su posición por el principio de tornillo tuerca), para solucionar este problema se tuvo que lijar un poco la parte de la cuerda para suavizar la parte filosa y rellenar la parte del cople de la válvula con un material que sirviera para mantener su posición, en este caso se utilizó plastilina epóxica por sus propiedades para mantener sujetas piezas, aunque no es la mejor solución ante esfuerzos cortantes, funciona de manera correcta debido a que más que mantener unido el cople, lo rellena para que no afecte el material faltante de la válvula después de la lijada.

Otro de los problemas que tenía el modelo real era que pese a los cuatro elementos de unión, la válvula seguía teniendo una torsión notoria.



a) Servoválvula antes de la torsión.



b) Servoválvula después de la torsión.

Figura 6.27 Problema de torsión de la servoválvula.

Para la resolución de este problema se tuvo que tomar parte de las soluciones de concepto proporcionadas en el apartado 6.1.2, en específico en el apartado de sujetador de válvula, se combinó la idea de la solución 2 (Agarraderas a modo cincho) y la solución 3 (Pieza sólida), este concepto de dos agarraderas a modo de cincho se tradujo en un sostén de U para aprisionar completamente la válvula a la pieza sólida.

Los orificios para este sostén en U de igual manera que para el agarre del servomotor se hicieron de manera manual para evitar fragilizar mucho la pieza al quitarle demasiado material, este aprisionamiento total eliminó de manera correcta la torsión provocada por la fuerza del motor al mover el cople.

Al ver la respuesta positiva de las dos soluciones que surgieron para corregir los problemas en el modelo real, usando el ejemplo sencillo del servomotor de arduino se decidió dejar esta versión de la válvula totalmente aprisionada como la versión final.



a) Servoválvula final vista frontal.



b) Servoválvula final vista lateral.



c) Solución de ambos problemas en la aplicación final.

Figura 6.28 Versión final de la servoválvula.

## 7. Diseño del sistema.

El banco de pruebas se puede simplificar en 4 grandes subsistemas que son necesarios para su funcionamiento.

- Sistema de actuación
- Sistema de sensores
- Sistema de control
- Interfaz

El sistema a grandes rasgos se relaciona de la siguiente manera.

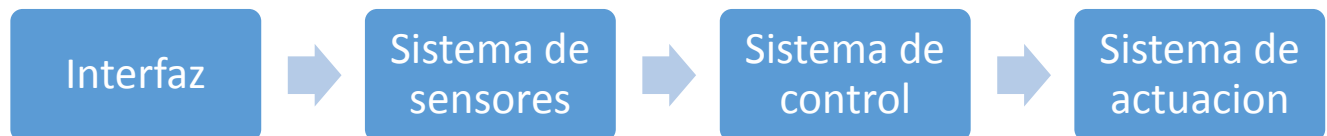


Figura 7.1 Interacciones de los sistemas principales.

De forma general el esquema de la imagen 7.1 es válido, pero a su vez muy simplificado, debido a que se pierde información acerca de cómo realmente se comunican los sistemas en general.

El esquema del sistema tipo caja negra puede ser más técnico sin perder la generalidad y da una idea de cómo se relaciona cada sistema con sus entradas y salidas.



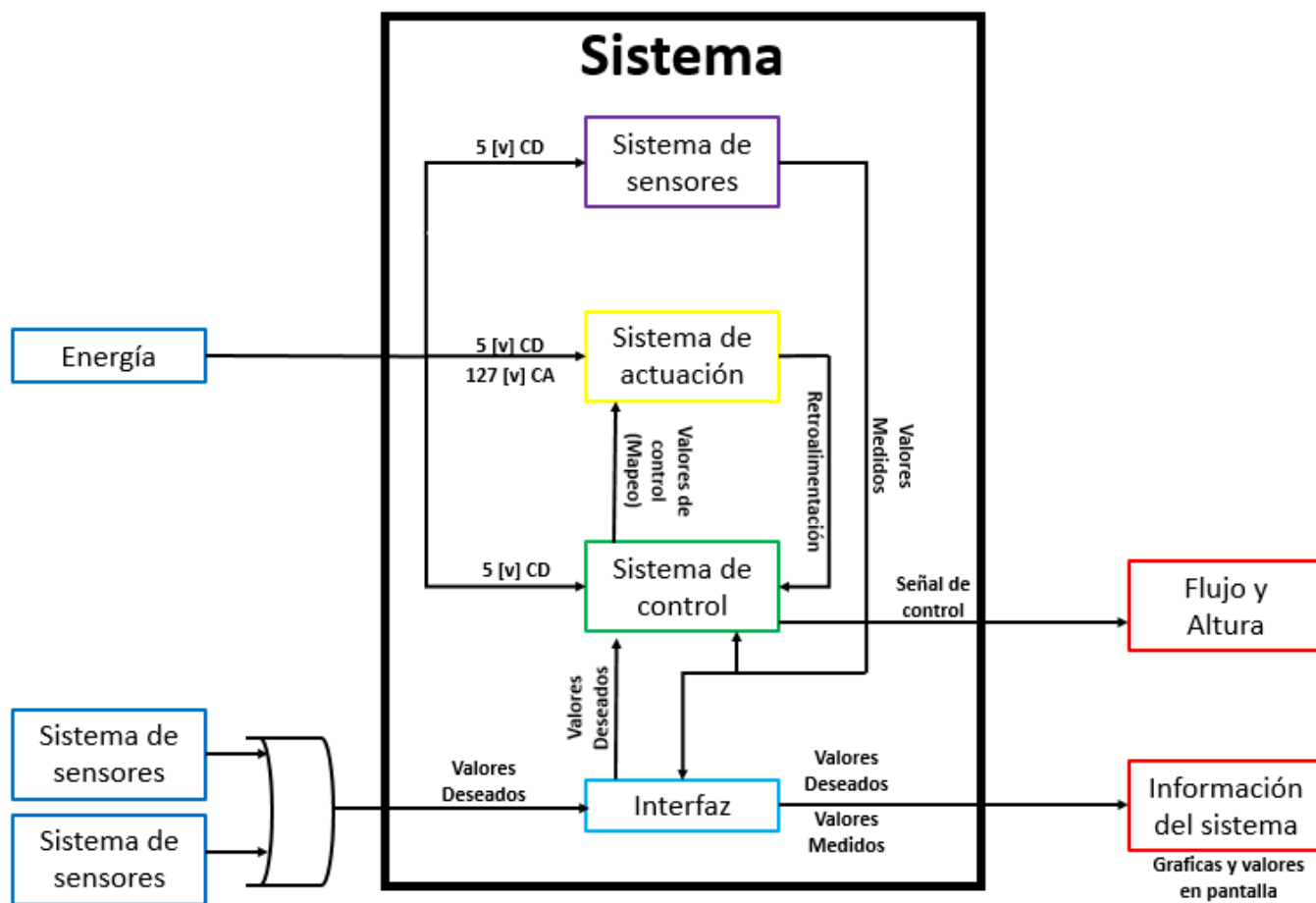


Figura 7.2 Interacciones de los subsistemas con mayor detalle.

A continuación se explicarán más a detalle todos los sistemas.

## 7.1 Sistema de actuación.

El sistema de actuación es el encargado de recibir las señales de control internas del mapeo del sistema de control.

Consiste en los siguientes elementos:

- Servoválvula.
- Etapa de potencia PCA9685.
- Fuente de voltaje.

La servoválvula diseñada en el capítulo 6 tiene como elemento fundamental de actuación al servomotor.

El servomotor usado es el HD-1501MG



Figura 7.3 HD-1501MG. [47]

Características principales:

- Velocidad de operación [0.14 s/60°]
- Par 17 [kg cm]
- Corriente con carga 2.5 [A]
- Reducción 298:1
- Rango limite 180° +- 10°

Para que un servomotor sea capaz de soportar peso necesita una alta corriente por lo que un puerto de computadora o el microcontrolador arduino se ven superados ante la alta demanda de corriente y esto pone a su vez en peligro la integridad de los componentes.

Una etapa de potencia consiste en una fuente de energía auxiliar para proporcionar la corriente necesaria de una forma externa solo al circuito que necesita la alta cantidad de corriente para evitar quemar o dañar los componentes que no soportan un gran valor de amperaje.

La etapa de potencia para el banco de pruebas es el driver de servomotores PCA9685, Es un módulo de 16 canales PWM con la capacidad de conectar hasta 64 en serie para controlar hasta 992 servos al mismo tiempo.



Figura 7.4 PCA9685. [48]

El driver PCA9685 utiliza el protocolo I2C para su comunicación y necesita la librería de arduino `Adafruit_PWMServoDriver Library` que permite calibrar el servomotor para un correcto uso y trae algunos ejemplos para empezar a probarlo.

El bus I2C es un protocolo de comunicación entre dispositivos que se encuentran en el mismo circuito, para que la comunicación I2C sea posible es obligatorio que los componentes estén conectados vía cable.

La flexibilidad y simplicidad es la característica de esta comunicación por lo cual es usada en muchas aplicaciones actuales por ejemplo en procesadores de señal, codificadores de video, monitores y en jungla de televisiones.

Los requisitos necesarios para la aplicación de este protocolo son:

- Dos líneas de comunicación, la línea de datos llamada SDA y la señal de reloj llamada SCL
- Que cada elemento conectado al bus de comunicación se le asigne una dirección que se pueda elegir por software.
- La relación de maestro - esclavo, el maestro es el cerebro que comanda a todos los esclavos y les manda instrucciones usando la dirección asignada específica de cada uno, el maestro se tiene que elegir desde antes de iniciar la comunicación, puede haber varios maestros ya que la comunicación viene con un detector de colisiones que evita que las órdenes de los maestros se crucen o interfieran entre ellas.

Funcionamiento.

*"El Master es el dispositivo que inicia la transferencia en el bus y genera la señal de Clock.*

*El Slave (esclavo) es el dispositivo direccionado.*

*Las líneas SDA (serial Data) y SCL (serial Clock) son bidireccionales, conectadas al positivo de la alimentación a través de las resistencias de pull-up.*

*Cuando el bus está libre, ambas líneas están en nivel alto.*

*La transmisión bidireccional serie (8-bits) de datos puede realizarse a 100Kbits/s en el modo standard o 400 Kbits/s en el modo rápido. La cantidad de dispositivos que se pueden conectar al bus está limitada, solamente, por la máxima capacidad permitida: 400 pF" [24]*

*"El Maestro genera la condición de Start.*

*Cada palabra puesta en el bus SDA debe tener 8 bits, la primera palabra transferida contiene la dirección del Esclavo seleccionado.*

*Luego el Master lee el estado de la línea SDA, si vale 0 (impuesto por el esclavo), el proceso de transferencia continúa. Si vale 1, indica que el circuito direccionado no valida la comunicación, entonces, el Maestro genera un bit de stop para liberar el bus I2C.*

*Este acuse de recibo se denomina ACK (acknowledge) y es una parte importante del protocolo I2C.*

*Al final de la transmisión, el Maestro genera la condición de Stop y libera el bus I2C, las líneas SDA y SCL pasan a estado alto." [25]*

#### Conexión

El dispositivo tiene 3 entradas, entrada de alimentación para los circuitos internos, entrada de alimentación para la etapa de potencia y la entrada de datos que viene del circuito de control.

La conexión al arduino se hace con 4 cables.

- 5 [v] se conecta a VCC (Alimentación de circuitos internos)
- GND a GND de arduino
- SDA (datos)
  - Al analógico 4 de arduino
- SCL (Reloj)
  - Al analógico 5 de arduino.

La alimentación para el servomotor se conecta en la zapata que tiene al centro la tarjeta, en esa conexión tiene que ir la fuente externa que tiene la capacidad de entregar el alto amperaje.

El servomotor se conecta directamente al driver en uno de los 16 espacios que tiene en fila y vienen especificados con numerales.

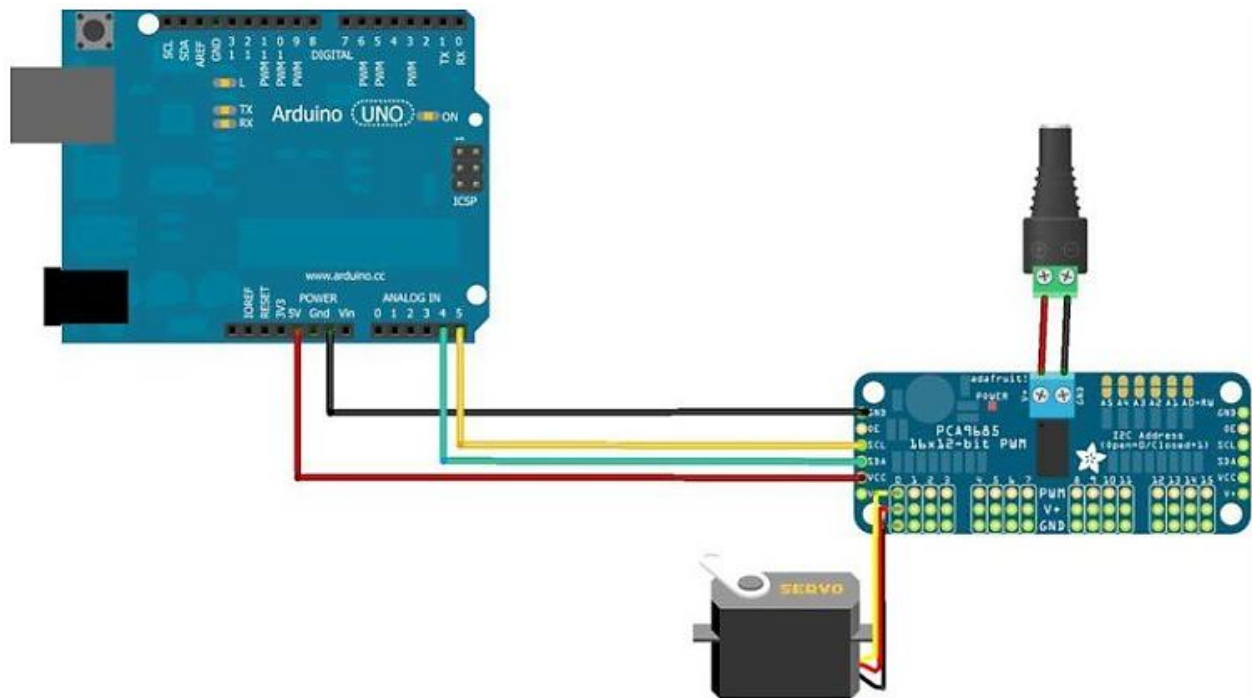


Figura 7.5 Conexión de la etapa de potencia PCA9685. [49]

La alimentación externa será proporcionada por una fuente de voltaje HTS-50FE-5 de 5 [v] a 10 [A], capaz de sobrellevar el pico máximo que podría tener el servomotor que es 2.5 [A], La fuente es constante pero tiene un trimpot de ajuste que permite un rango variable de 4 a 6 [v].



Figura 7.6 fuente de voltaje HTS-50FE-5. [50]

## 7.2 Sistema de sensores.

El sistema de sensores es el que se encarga de tomar las variables físicas importantes del sistema para después mandarlas al sistema de control.

Es el sistema que interactúa con el modelo físico.

Las variables que necesita el sistema de control del modelo físico son 3, Flujo de entrada, Flujo de salida y Altura del tanque.

Sensor de flujo.

Para la medición del flujo se usarán 2 sensores YF-S201, caudalímetros de efecto hall.

Este tipo de sensores son especializados para aplicaciones caseras e industriales a pequeña escala, su forma de conexión hace que sea fácil de instalar en tuberías esto lo vuelve opción cuando se tiene que medir líquido que no tenga perturbaciones muy grandes ya que como se mencionó en el apartado de caudalímetros efecto hall (magnéticos), estos sensores son muy susceptibles a flujo turbulento y ruido eléctrico.

El sensor consiste en un rotor de agua, un sensor de efecto hall y una carcasa.

Cuando el flujo pasa a través del sensor hace girar el rotor de agua que por giro activa el sensor de efecto hall y que este a su vez manda como señal un tren de pulsos.

Esta señal del sensor de tren de pulsos se puede "traducir" a [L/min] usando una fórmula del datasheet.

$$\text{Frecuencia de pulsos (Hz)}/7 = \text{Caudal [L/min]}$$

Esta fórmula es un estándar pero con ella se puede obtener un error considerable, si se quiere una medición precisa se tiene que calibrar el sensor, esta calibración puede minimizar al error a menos del 10%, la calibración consiste en ver cuántos pulsos mide el sensor en un volumen determinado de agua, el experimento se tiene que repetir varias veces y obtener un promedio, después ese valor obtenido se convierte a [pulsos/s] dividiendo entre 60 y ese valor se vuelve la nueva constante.



Figura 7.7 YF-S201 [51]

#### Características:

- Tiempo [Segundos]
- Caudal 1-60 [L/min]
- Voltaje de trabajo 5-24 [v]
- Corriente máxima 15 [mA]
- Compresión máxima de agua 1.2 [Mpa]
- Salida: Onda cuadrada [Tren de pulsos]

#### Conexión.

El sensor de flujo YF-S201 tiene 3 cables de conexión.

- Cable rojo es la alimentación se conecta a 5 [v] o a VCC de arduino
- Cable negro es GND



- Cable amarillo es la señal de tren de pulsos, entra a una salida de PWM en arduino
  - Pin 2 del arduino para el sensor de flujo de entrada.
  - Pin 3 del arduino para el sensor de flujo de salida.

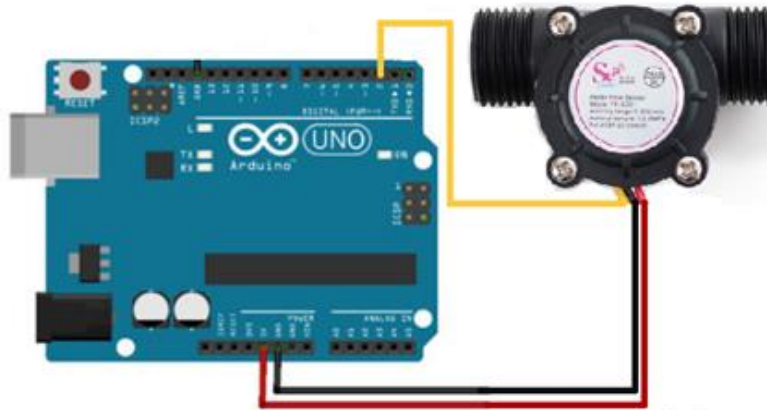


Figura 7.8 Conexión del sensor YF-S201 [52]

#### Sensor de altura.

El sensor de altura a utilizar es el HC- SR04, un sensor de distancia ultrasónico, un sensor flexible y adaptable a la mayoría de los microcontroladores como arduino, MSP, PIC, entre otros.

Su funcionamiento consiste en mandar un pulso ultrasónico de 40Khz llamado *trigger*, cuando esta onda de *trigger* choca contra un objeto la onda regresa hacia el sensor que lo recibe de vuelta y lo manda al pin de *echo*.

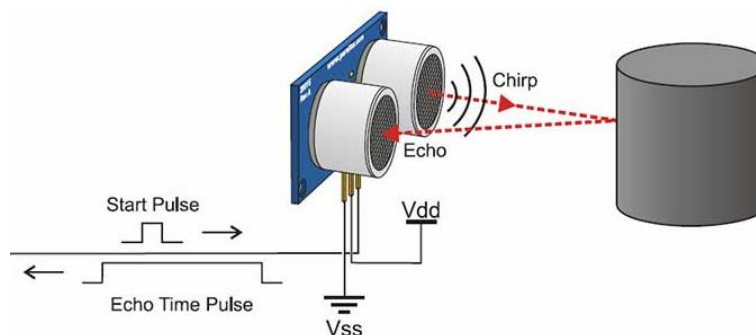


Figura 7.9 Funcionamiento de HC-SR04 [53]

La forma en que se calcula la distancia es usando el ancho de pulso y la velocidad del sonido.

$$(\text{Ancho de pulso} * \text{Velocidad del sonido}) / 2$$

Donde el ancho de pulso es el tiempo entre el recorrido *trigger* y el regreso del *echo* y está en segundos y la velocidad del sonido, que se toma como una constante para simplificar los cálculos 340 [m/s].

Características.

- Voltaje de alimentación 5 [v]
- Corriente máxima 15 [mA]
- Frecuencia de trabajo 40 [Khz]
- Rango máximo 4.5 [m]
- Rango mínimo 1.7 [cm]
- Tiempo mínimo entre medidas 20 [ms]
- Apertura del pulso ultrasónico 15[°]
- Resolución 0.3 [cm]

Conexión

El sensor HC- SR04 tiene 4 pines de conexión.

- VCC que es la alimentación del circuito 5 [v].
- *Trigger* Disparo de ultrasónico
  - Al pin 4 del arduino.
- *Echo* Recepción del ultrasónico
  - Al pin 5 del arduino.
- GND Tierra del circuito.

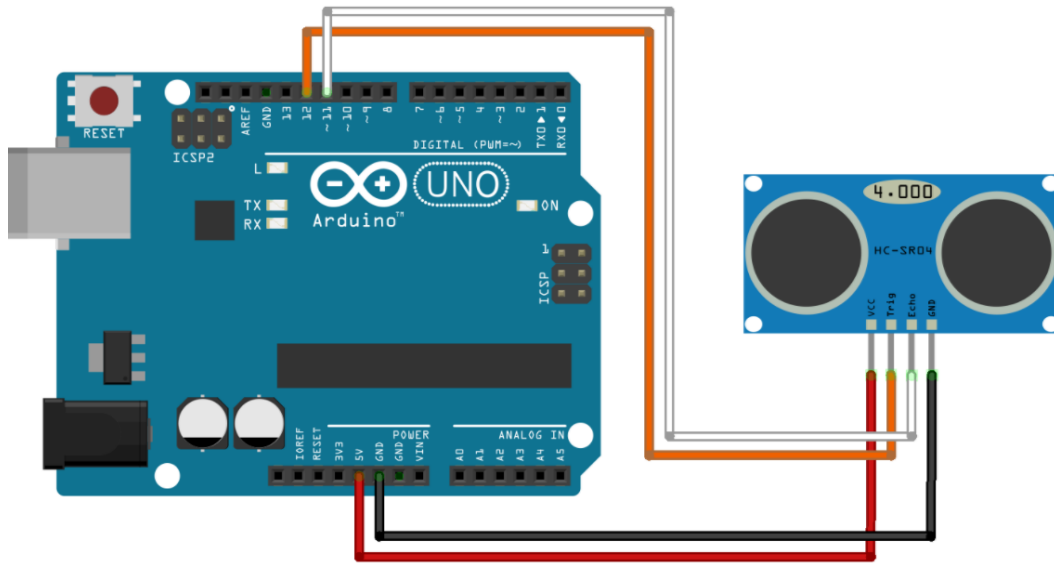


Figura 7.10 Conexión de HC-SR04 [54]

### 7.3 Sistema de control.

El sistema de control es el encargado de procesar las señales de los sensores y mandar las señales de control al sistema de actuación.

El sistema de control está implementado en C# y arduino, uno encargado de las técnicas de control y el otro en el acondicionamiento de las señales de los sensores respectivamente.

El sistema de control implementado está separado en 2 modos, el modo manual que consiste en un control de flujo proporcional y automático que consiste en la implementación de un PID.

- 1) Manual o Control de Flujo. Es el controlador básico (Esclavo) del sistema. Se utiliza para poder general el flujo deseado en la válvula. Su relación básica es: % de apertura vs Flujo
- 2) Automático o Control de nivel. Es el controlador secundario (Maestro) del sistema. Se utiliza para controlar el nivel del tanque. Su relación básica es: Flujo vs Nivel de líquido.

El sistema de control tiene K de ganancias programables, está pensado de esa manera para que los estudiantes puedan ver los efectos, ventajas y desventajas del control PID.

Constantes	Corrección de Errores	Estabilidad	Sobrepaso	Tiempo de subida	Tiempo de asentamiento
Kp	Errores grandes	Aumenta	Aumenta	Disminuye	Incremento pequeño
Ki	Errores pequeños	Aumenta	Disminuye	Aumenta	Incrementa
Kd	Cambio de errores	Disminuye	Aumenta	Cambio mínimo	Disminuye

Tabla 4. Tabla de efectos de las K de ganancia en el sistema específico.

La regla de control de ambos modos sigue los siguientes pasos básicos

- Toma de datos.
- Cálculo de movimiento de la válvula.
- Manda señal de válvula para el actuador.
- vuelve a tomar datos.

#### **Pseudo código del modo manual.**

Se toma el dato del flujo deseado.

Se revisa si el *set point* de flujo está dentro de los límites, para esta bomba el límite de flujo va de 0 a 14 [l/min], Si el *set point* está fuera de este rango, el programa lo lleva a alguno de los límites.

Una vez corregido el *Set point* se calcula el número de pasos. Para hacerlo se define un error entre el Flujo deseado y el flujo medido. Posteriormente este flujo se multiplica por una constante para obtener el número de pasos.

Como se mencionó en el caso del flujo consiste en un control proporcional en donde solo se pide el valor deseado y la K de ganancia es interna.

Se hace una condición para evitar el daño del servomotor donde se dice que si el valor de número de pasos es mayor al valor límite del actuador, se manda al valor máximo de apertura.

Una vez calculado el número de pasos, éste se manda al microcontrolador en forma de texto.

Se toma el valor de Flujo actual y se recalcula el número de pasos hasta que el error sea cero.

### **Pseudo código del modo automático.**

En este modo el usuario debe de introducir el valor de Nivel deseado.

La cantidad de pasos se calcula de la siguiente manera:

Se elige el tipo de control en la interface del usuario y se escriben las constantes del controlador  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  (Constantes para un controlador PID paralelo)

Se calcula el error entre el Nivel deseado y el Nivel actual, Se calcula también la integral del este error y por último se calcula la derivada del error.

Error = Nivel deseado - Nivel actual

Integral del error = sumatoria del error + Error\*dt

Derivada del error = (Nivel-Nivel pasado)/dt

Donde dt es diferencial de tiempo.

Al final con el error, su derivada y su integral se hace aplica la regla simple de PID usando las constantes K de ganancias de la interfaz para obtener el número de pasos.

$PID = Error * K_p + Integral\ del\ error * K_d + Derivada\ del\ error * K_i$ .

Se hace una condición para evitar el daño del servomotor donde se dice que si el valor de número de pasos es mayor al valor límite del actuador, se manda al valor máximo de apertura.

Una vez calculado el número de pasos este se manda a arduino en forma de texto.

Se toma el valor de Nivel actual y se recalcula el número de pasos hasta que el error sea cero.

Para más detalle del código revisar el anexo II [Códigos].

## 7.4 Interfaz

La interfaz de usuario es una parte importante del proceso de desarrollo del banco ya que es la encargada de mostrar los datos y gráficas a los estudiantes.

Una interfaz bien desarrollada y con claridad permitirá desarrollar en los estudiantes una mejor comprensión del fenómeno.

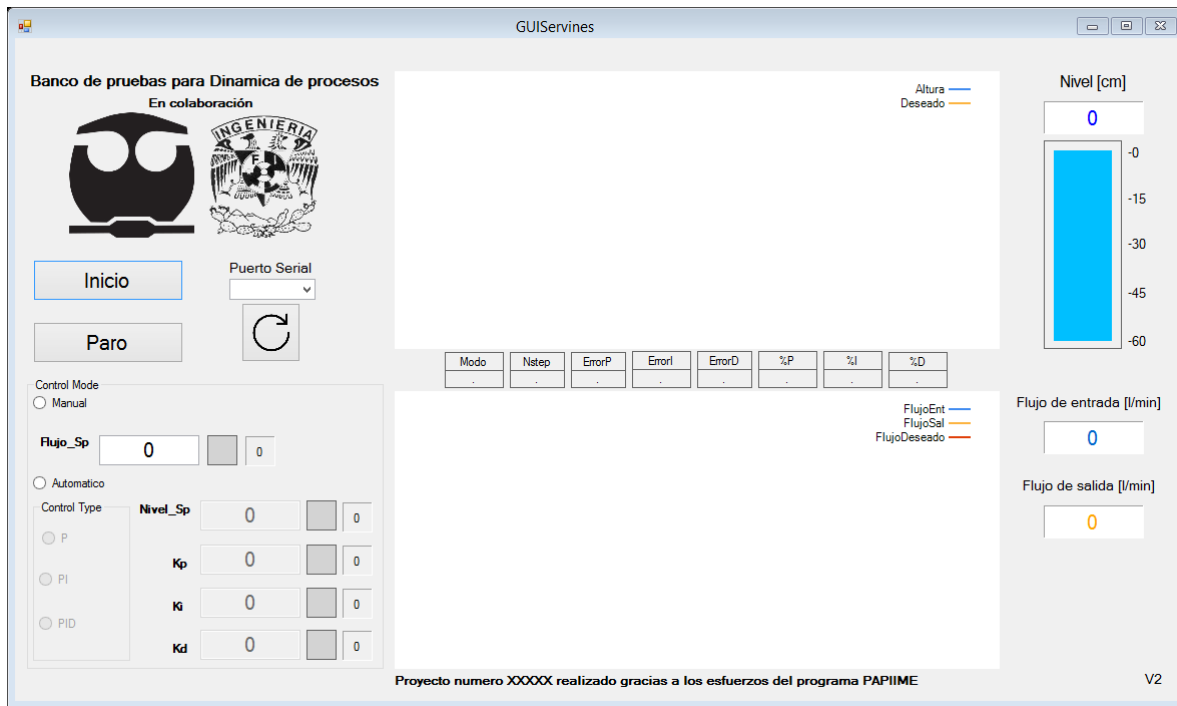


Figura 7.11 Interfaz final del banco de pruebas

Los elementos en los que consiste la interfaz son:

- Botón de inicio que empieza la graficación y el movimiento de la válvula.
- Botón de paro que cierra la comunicación serial y la aplicación completamente.
- Combo box de puerto serial permite escoger el puerto serial de una lista.
- Dos botones de opción circulares para seleccionar el modo.
  - Modo 1 “Manual”
    - Un *textbox* donde poner el valor de flujo deseado.
    - Un indicador de selección tipo LED para el valor deseado.
    - Un *label* donde se confirma el valor de flujo deseado del *textbox*.

- Modo 2 “Automático”
  - Un *textbox* donde poner el valor de nivel deseado.
  - Un indicador de selección tipo LED para el valor deseado.
  - Un *label* donde se confirma el valor de nivel deseado del texto.
  - Tres botones de opción para P, PI y PID.
  - 3 *Textbox* para determinar las constantes K de ganancia Kp, Ki, Kd.
  - 3 Indicadores tipo LED para las opciones P, PI y PID.
  - 3 *Labels* donde se confirma el valor de Kp, Ki y Kd.
- 3 indicadores en *label* para las salidas, Nivel del tanque, flujo de entrada y flujo de salida.
- 8 indicadores donde se muestran los valores de control por cada parte del PID y su porcentaje para mostrar que tanto de la acción de control está aportando cada una específicamente.
- Un indicador grafico para mostrar un esquemático del llenado del tanque.
- 2 Gráficas
  - La primera de altura vs tiempo en donde también se muestra el valor de altura deseada.
  - La segunda de flujo de entrada, Flujo de salida vs tiempo donde también se muestra el valor de flujo deseado.
- Botón de *reset*, regresa el proceso al inicio.

Interacción interna.

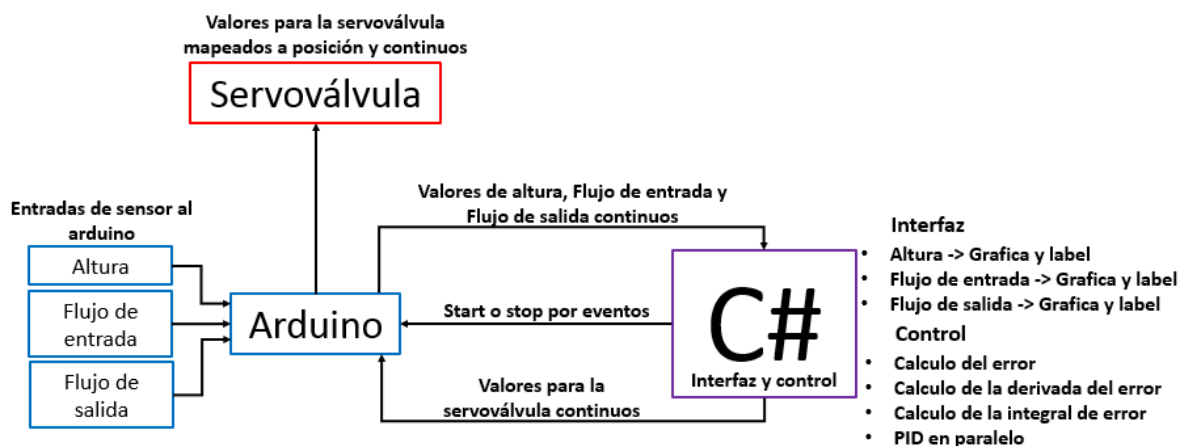


Figura 7.12 Interacciones internas de la interfaz

Internamente la interfaz manda a C# los valores de flujo deseado en el modo 1 o en el modo 2 manda el nivel de altura deseada junto con las constantes K de ganancia.

Estos valores se empiezan a graficar cuando el evento *start* empieza, los valores de altura y flujos al iniciar la conexión en serial se mostrarán en los *labels*, esto se hace como elemento de seguridad, para saber si la comunicación se está llevando a cabo de manera correcta.

Al microcontrolador no le importa el modo en el que esté el sistema en el momento, no sabe que existen los modos en la interfaz ya que solo se encarga de recibir a los sensores, procesar su señal de manera adecuada y recibir los valores del servomotor sin el mapeo a grados, ese mapeo se realiza usando la librería del driver de servomotores que se menciona en el tema del actuador que está en el programa del microcontrolador.

En C# al momento que llegan los valores de altura, flujo de entrada y flujo de salida se queda en modo de espera hasta que se seleccione un modo, al tener el valor del modo en el que esta, se procesa la información con el código mostrado en el anexo II [Códigos] y que se explica a grandes rasgos en el capítulo del sistema de control e independientemente de cómo se procese en el modo 1 o el modo 2 la “vía” que se usa para mandar este valor de servomotor es común a ambos modos.

Interacción con el usuario.

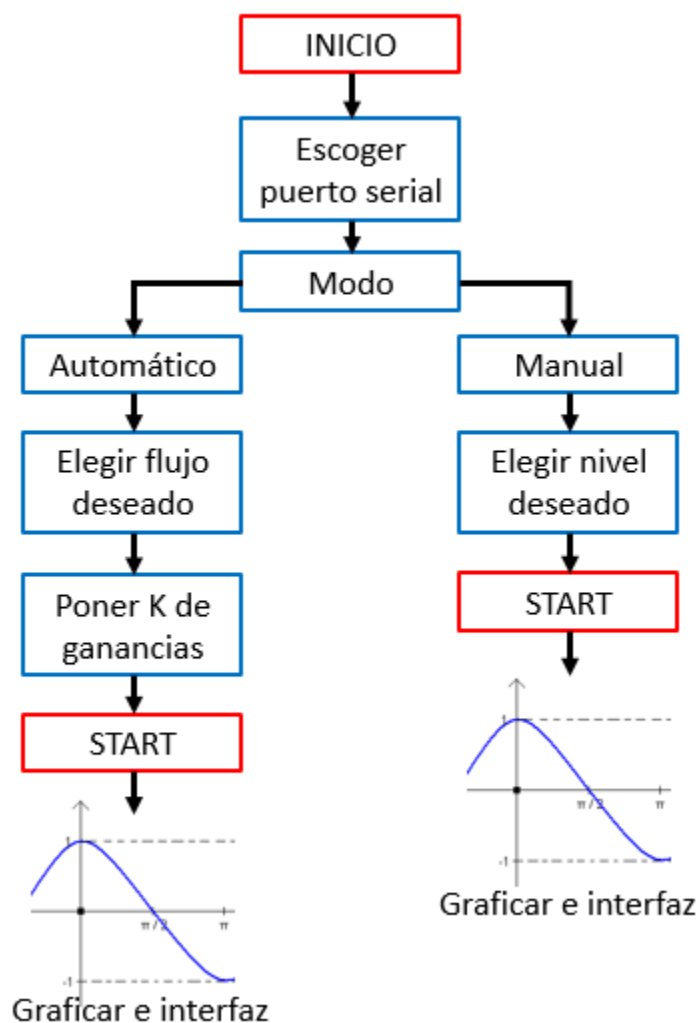
El usuario tiene como objetivo final observar 2 gráficas, en una gráfica se mostrarán los flujos de entrada y salida y en la otra gráfica la altura, para hacer más interactiva la interfaz también hay un medidor esquemático de altura en el tanque para que el usuario sea capaz de verlo en físico y en su debido caso también vea la evolución del fenómeno en la interfaz.

Las señalizaciones de colores a lado de los *textboxes* están diseñados para mostrar de manera gráfica en qué tipo de modo y la información que necesita el modo elegido.

Los *textboxes* se actualizan al recibir un valor a lado de las gráficas para permitir, si es necesario tomar los datos que se necesiten para graficar en un programa auxiliar.



El esquema para la interacción del usuario simplificado es el siguiente:



Ambas opciones pueden ser usadas en cualquier momento del proceso

RESET	Manda el proceso al punto de escoger puerto serial
STOP	Cierra completamente la aplicación y se tiene que volver al inicio

Figura 7.13 Interacciones usuario - interfaz

Para seguridad del modelo y del sistema se han tomado algunas precauciones en la interfaz para que sea capaz de enfrentar un usuario inexperto.

De las principales restricciones para el sistema.

- Protección para evitar escoger un puerto serial incorrecto y no se logre una comunicación exitosa.
- Controles de modo bloqueados al escoger el otro modo.
- Los valores se resetean cuando se escoge un nuevo modo.
- El *label* contiguo a la señalización que muestra el valor enviado para mostrar que se envió de manera correcta.
- Protección en todos los *textboxes* para restringir el envío de datos a solo números y evitar cadenas y otros signos que el sistema no puede procesar.
- Al haber algún problema serio en el sistema la aplicación se cierra automáticamente.
- El sistema siempre manda la servoválvula a una posición intermedia para permitir el flujo de líquido y evitar que se quemé la bomba al no tener un lugar a donde enviar el flujo que bombea.

Otro seguro que no necesariamente es de la interfaz virtual pero se podría considerar como parte de una interfaz física consiste en un *switch* de seguridad en la fuente que proporciona la alimentación al actuador servoválvula que desconecta la alimentación de potencia al driver de servomotores para la protección del actuador en casos extremos por ejemplo cuando el servomotor trata de pasar su límite de apertura por un malfuncionamiento de la interfaz, esto es considerado como un fallo excepcional en escenarios donde el banco de pruebas es usado de manera incorrecta.

## 8. Resultados

La instrumentación y aplicación de todos los sistemas interconectados demuestran la funcionalidad del modelo y la viabilidad de replicar el mismo en caso de ser necesario para aumentar el número de bancos de pruebas para las diferentes materias que lo usarán como material didáctico.

En este capítulo se muestra el debido funcionamiento del banco de pruebas para dar un sustento al cumplimiento de los objetivos.

### 8.1 Manual de uso

El manual de cómo usar el banco sirve como referencia para estudiantes y profesores para hacer un correcto uso del mismo, esto con el objetivo de aumentar la vida útil de los componentes y del banco en general.

Banco de pruebas de dinámica de procesos.

Manual correspondiente para el buen uso del banco de pruebas de la materia de modelado de procesos.

Asegurarse que todas las válvulas manuales están abiertas (Dos válvulas en la mesa y una en el desagüe del recipiente de acrílico).

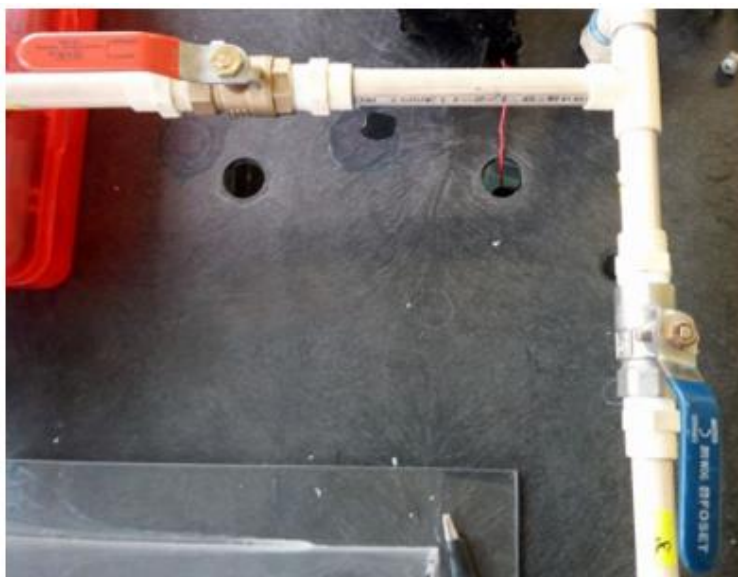


Figura 8.1 Válvulas en posición abierta.

Conectar la bomba y la fuente a la corriente eléctrica y se pone el switch del multicontacto en ON.



Figura 8.2 Conexión a la energía eléctrica.

Conectar el microcontrolador al puerto USB de la computadora por medio de un cable de impresora.

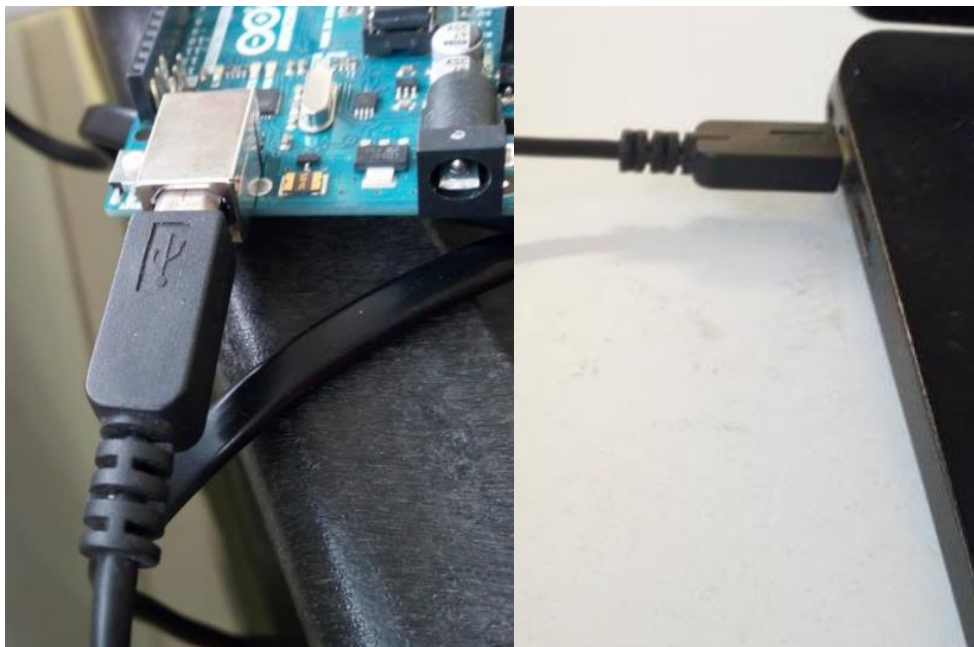


Figura 8.3 Conexión entre computadora y arduino.

IMPORTANTE: NO LEVANTAR EL FLOTADOR HASTA QUE SE HAYA VERIFICADO QUE LAS VALVULAS ESTAN ABIERTAS Y SE PERMITE UNA CIRCULACION DE FLUJO.

Levantar el flotador de la bomba y dejarlo arriba, verificar que están cayendo dos flujos de agua hacia la tina.

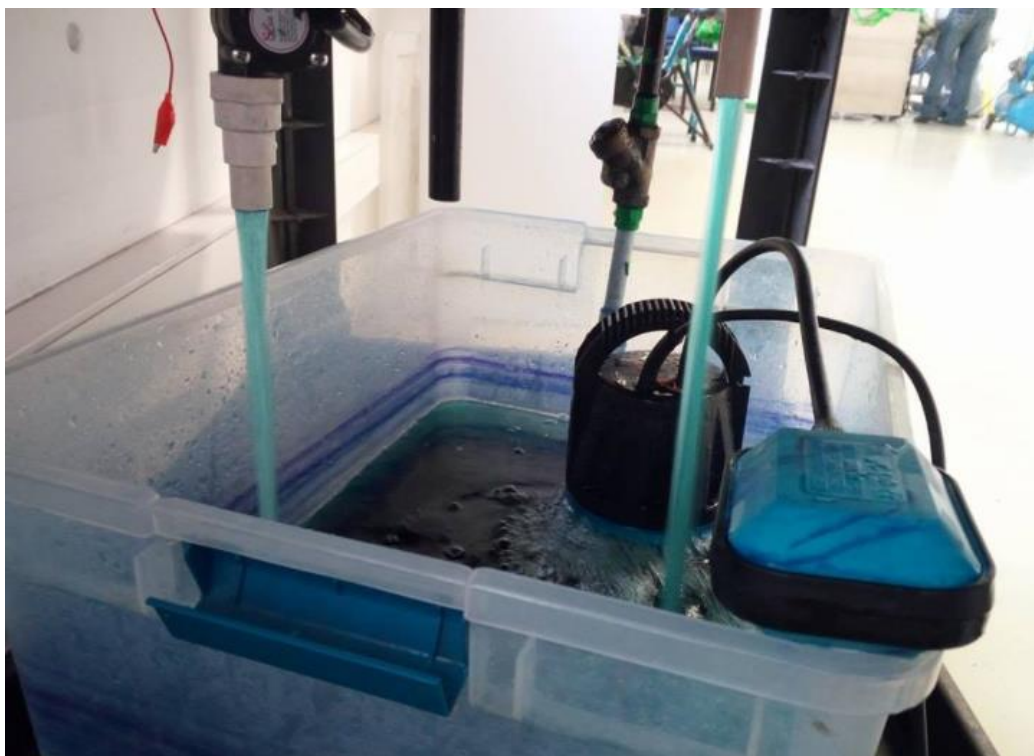


Figura 8.4 Dos flujos cayendo en el reposadero.

Prender el *switch* de la fuente, se comprueba el correcto encendido de la misma con el indicador LED verde en la parte frontal de la fuente.

Ya que todos los pasos anteriores estén completados, abrir la aplicación GUIServines.

GUIServines	19/10/2017 04:48 ...	Aplicación	99 KB
GUIServines.exe	30/08/2017 01:51 ...	XML Configuratio...	1 KB
GUIServines.pdb	19/10/2017 04:48 ...	Archivo PDB	44 KB
GUIServines.vshost	19/10/2017 04:52 ...	Aplicación	23 KB
GUIServines.vshost.exe	30/08/2017 01:51 ...	XML Configuratio...	1 KB
GUIServines.vshost.exe.manifest	18/06/2013 07:28 a...	Archivo MANIFEST	1 KB
kayChart.dll	01/09/2017 08:19 ...	Extensión de la apl...	7 KB

Figura 8.5 Ejecutable de GUIServines.

Se abrirá la siguiente interfaz.

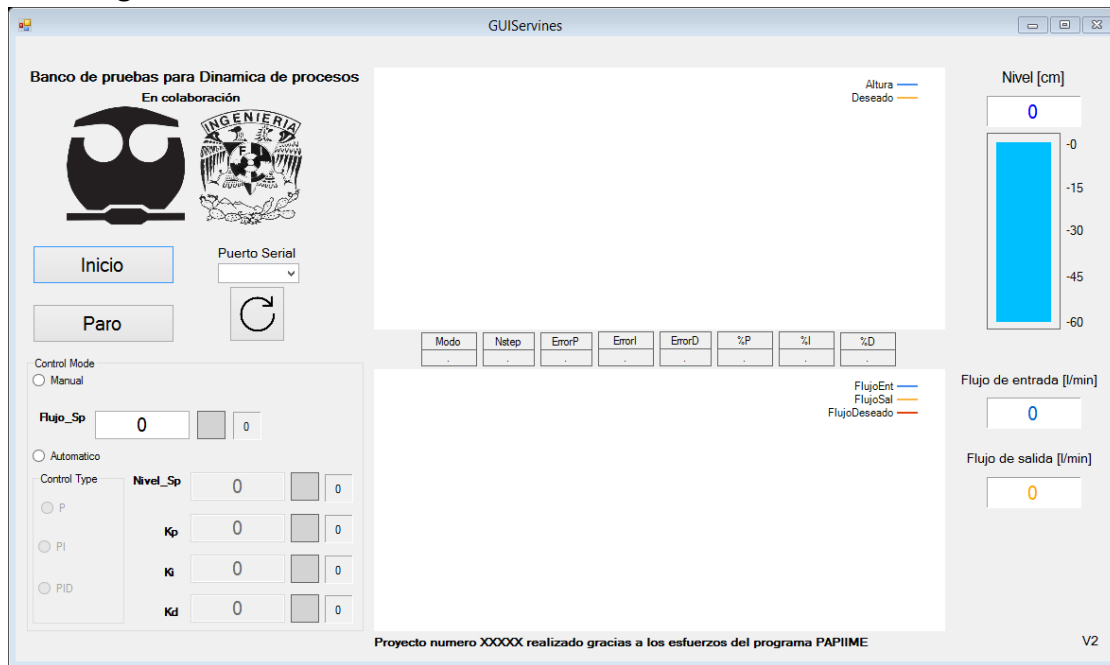


Figura 8.6 Interfaz del banco de pruebas.

Escoger puerto serial de la lista mostrada, siempre será el primero de la lista.

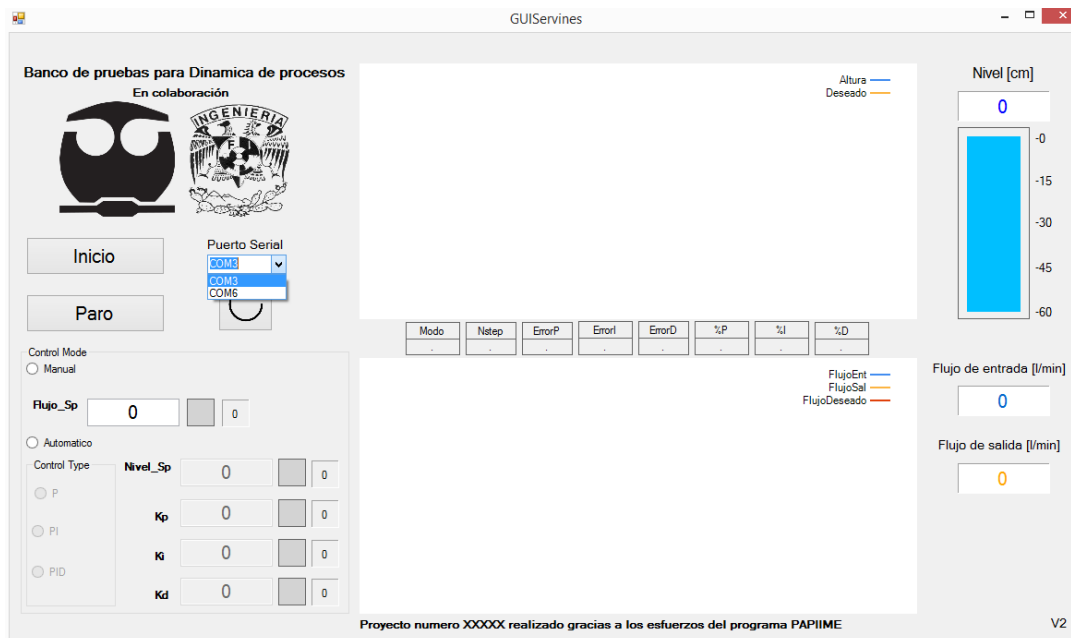


Figura 8.7 Seleccionar puerto serial.

Se escoge una opción entre manual y automático hasta que la ventana de modo muestre un número.

Modo 1 = manual

Modo 2= automático

Modo 1:

Se pone el valor de flujo deseado en el *textbox* tecleando ENTER si el valor está bien ingresado se mostrará en el *label* contiguo al cuadro de color.

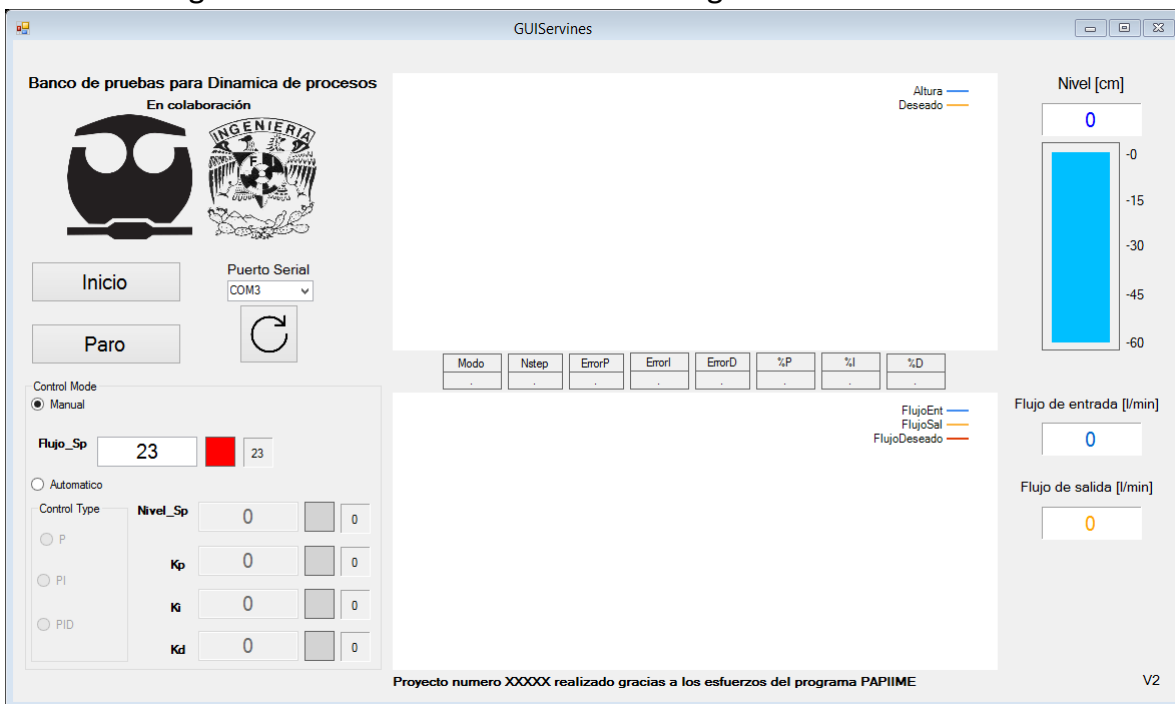


Figura 8.8 Ejemplo al escoger el modo 1.

Modo 2:

Se escoge el tipo de control. P, PI o PID.

Se ponen primero las K's del control y cada vez que se escoja una se tendrá que dar ENTER si el valor está bien ingresado se mostrará en la casilla de número de al lado.

Después de elegir el tipo de control y las K's se escoge la altura deseada y se le da ENTER de igual manera si está bien ingresado se mostrará en la casilla de número de al lado.

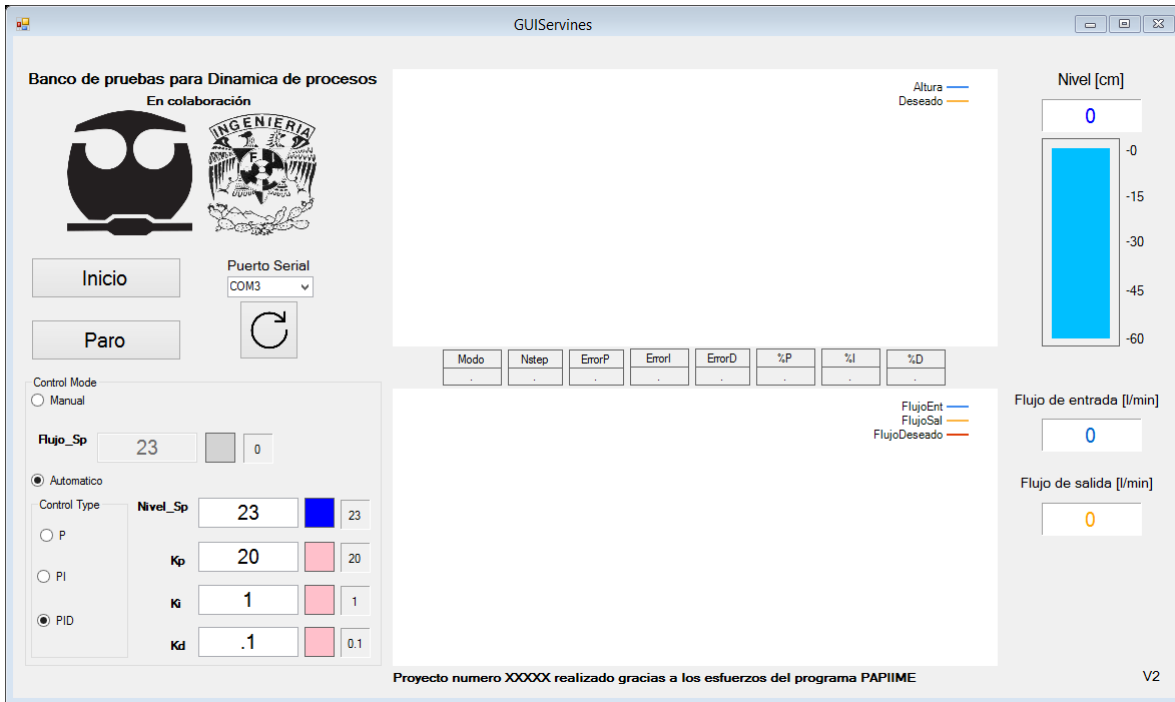


Figura 8.9 Ejemplo al escoger el modo 2.

Después de escoger el modo, el valor deseado y en el caso del modo 2 las constantes de K de ganancia, Se da click al botón de inicio el botón de INICIO.

Si se quiere cambiar las constantes o el modo de control se escogen de la misma manera que en los pasos pasados, primero cambiando las constantes y al último la altura deseada.

Si se quiere cambiar el Puerto serial o surge algún inconveniente se puede usar el botón de *reload* abajo del combo box que reiniciará toda la aplicación al momento de escoger puerto serial.

Por último si se quiere cerrar completamente la aplicación se usa el botón de paro el cual cerrará toda la aplicación y la comunicación serial.



## 8.2 Pruebas del banco y resultados.

Se realizaron pruebas correspondientes al control de flujo probando 5 valores diferentes para observar su comportamiento.

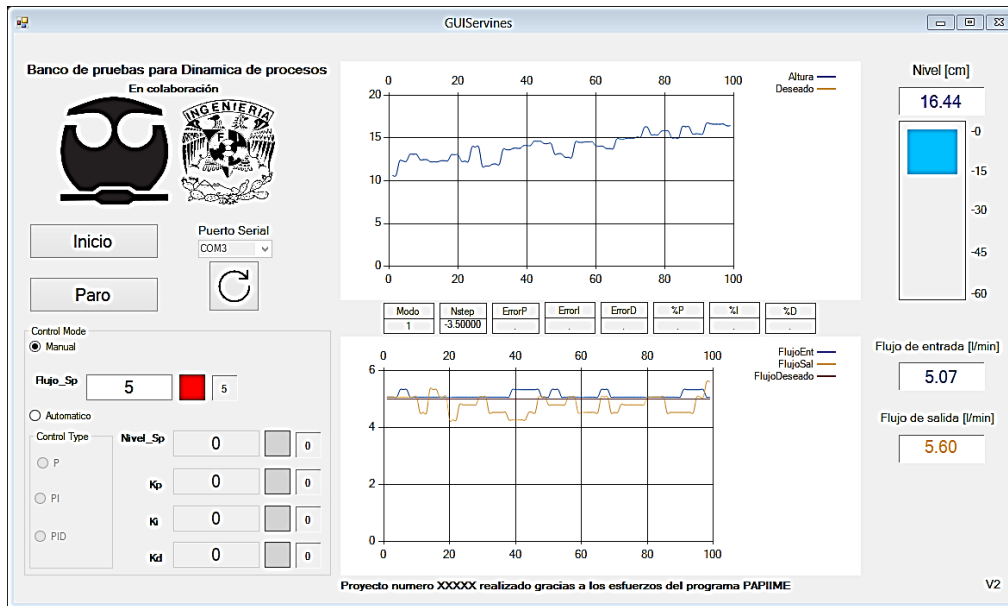


Figura 8.10 Control en modo 1 pidiendo 5 [L/min].

En el primer valor se mandó a un flujo nominal de 5 [L/min], se puede ver en la gráfica que se mantiene constante de manera correcta el valor, salvo algunos pequeños intervalos donde el valor de 5 aumenta en decimales. En esta prueba se mantuvo constante el valor por algunos segundos para mostrar la estabilidad continua en el sistema.

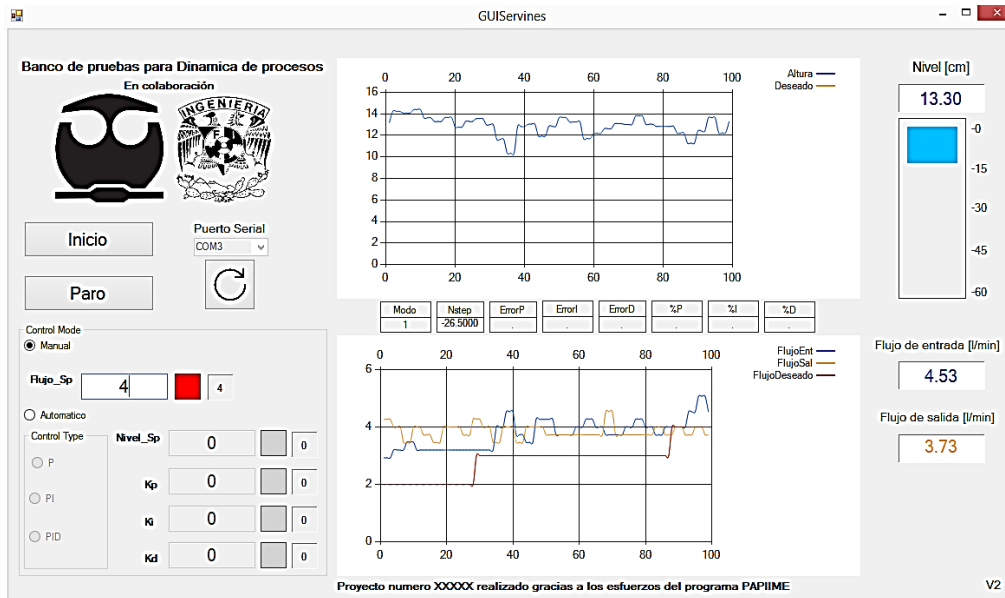


Figura 8.11 Control en modo 1 pidiendo 4 [L/min].

La siguiente prueba fue un cambio a 4 [L/min] se puede observar en las gráficas como el valor de 5 [L/min] bajó rápidamente a 2 [L/min] para después aumentar al valor de 4 [L/min] y estabilizarse rápidamente, en este caso podemos ver cómo el error sigue estando en decimales, aunque es considerablemente mayor que en el primer caso, este error se presenta en todas las mediciones en las siguientes pruebas.

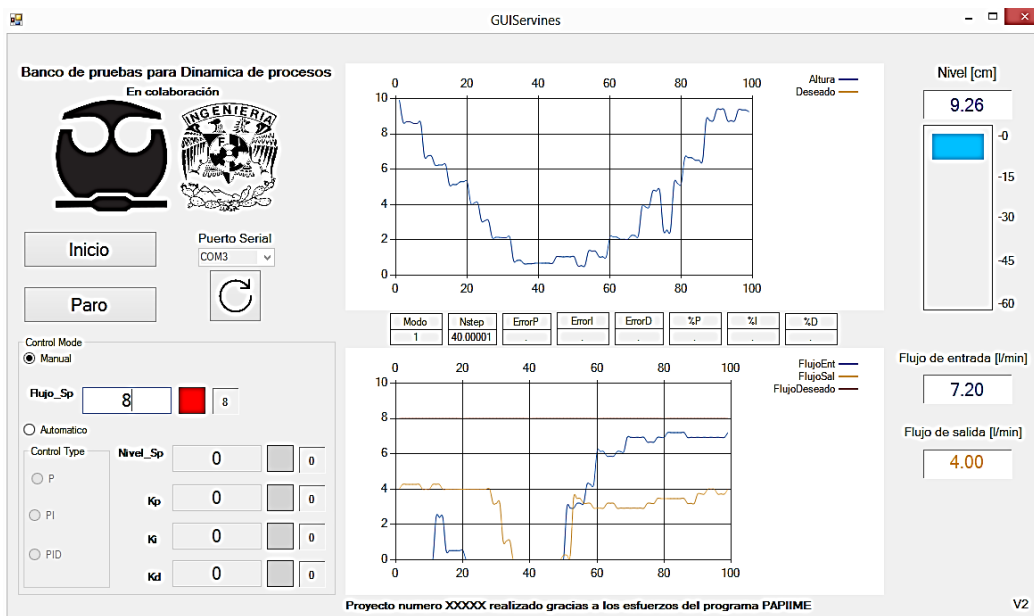


Figura 8.12 Control en modo 1 pidiendo 8 [L/min].

Se probaron valores más grandes de flujo, en este caso se pidió un flujo deseado de 8 justo después de estar en el valor de flujo de 4 [L/min] en ese momento el flujo del tanque ya estaba en un estado estacionario y el flujo de entrada era igual al flujo de salida, al cambiar el valor deseado provocó que el valor de flujo bajara de golpe a cero para después aumentar hasta llegar al valor. En este caso podemos observar cómo ya en un flujo de 8 [L/min] entra en juego la capacitancia del tanque, ya que podemos ver que está entrando más de lo que sale por efectos de la capacitancia hidráulica, el valor de error aumentó en comparación con las otras dos pruebas.

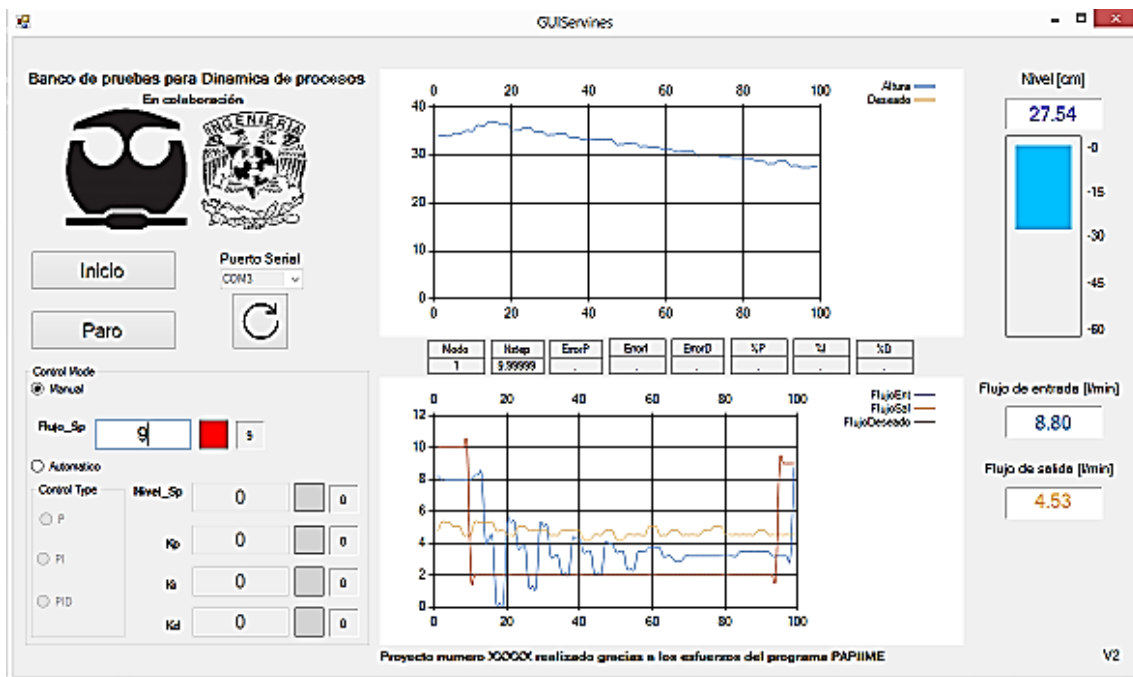


Figura 8.13 Control en modo 1 pidiendo 9 [L/min].

En la siguiente prueba se hicieron cambios bruscos al valor deseado de flujo, se empezó con el valor de 10 [L/min], para cambiar rápidamente al valor de 2 [L/min] manteniendo constante este valor por un pequeño intervalo de tiempo y después cambiar a 9 [L/min], Podemos observar como al cambiar valores rápidamente el objetivo de seguimiento del control tiene problemas, esto debido a que es un control puramente proporcional, por lo que el control no puede hacer un seguimiento fino, sin embargo los valores de medición tienden al flujo deseado como se puede ver en el flujo de entrada que es 8.80 [L/min] cuando el deseado es 9 [L/min]

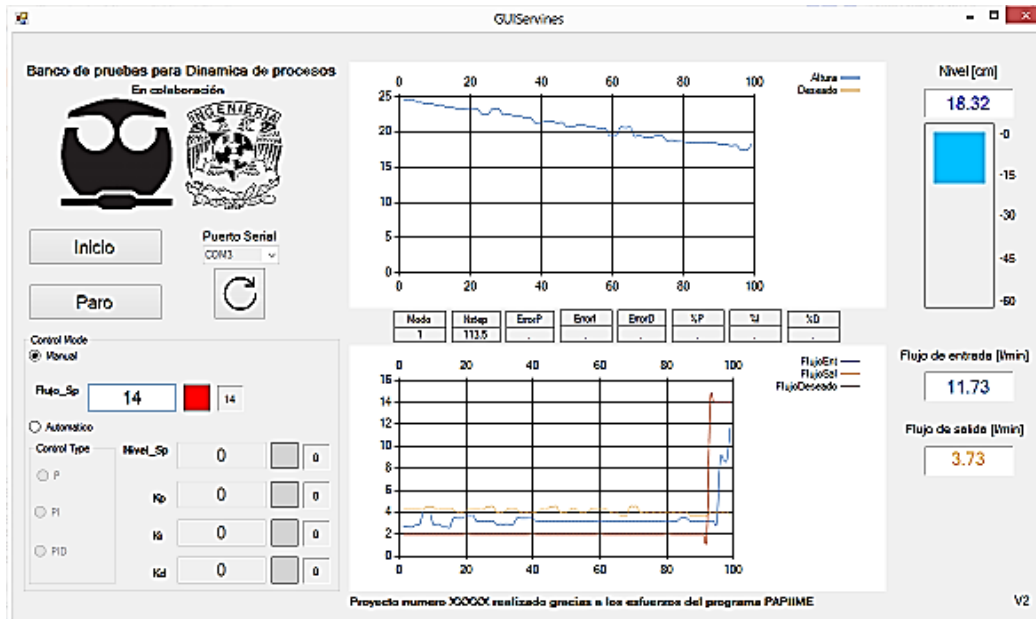


Figura 8.14 Control en modo 1 pidiendo flujo máximo [L/min].

En esta prueba se mandó el valor de flujo deseado a su máximo posible 14 [L/min] aquí podemos observar que no se puede llegar al valor de límite máximo, debido a que la bomba idealmente manda 14 [L/min] pero con esto podemos ver que las pérdidas que tenemos en accesorios no son tan despreciables como se pensaba al principio y que si se le agrega el la limitación del control proporcional que no puede corregir errores pequeños aumenta este intervalo de error a dos unidades de flujo.

El error del control de flujo es considerable, esto se debe a que es un control proporcional puro, esto hace que no pueda detectar errores pequeños lo cual provoca que sea impreciso, de la misma manera el pobre desempeño de la bomba y las pérdidas en fugas y accesorios ayudan a aumentar este intervalo de error el cual también afecta al momento de cumplir el objetivo de seguimiento en el control.

Otra fuente importante de este error es la poca fiabilidad del sensor de flujo, ya que como se mencionó en el apartado de sistema de sensores, el sensor de flujo YS-F201 tiene un error inherente del 10% sin la calibración adecuada y calibrado el valor del error no baja demasiado.

Pese a estos errores se puede considerar como una implementación correcta ya que se pueden ver las ventajas y desventajas del control proporcional al igual que sus principales características como la rápida acción de control, el ligero sobrepaso y la incapacidad de corregir errores pequeños.

Para el control de altura con PID se hicieron varias pruebas probando diferentes constantes, para ver su comportamiento.

### Proporcional P

El control proporcional puro funciona corrigiendo valores de error grandes y siempre tiene un *offset* en la variable de control.

Como se puede ver en la primera imagen de la interfaz con control proporcional [Figura 8.15] se observa la velocidad que tiene el control proporcional para llegar al valor deseado y el sobrepaso que se queda como un error constante.

Esto también se ve reflejado en el flujo del sistema, el cambio rápido para corregir el error grande se traduce en un gran pico de flujo de entrada para después al llegar al valor deseado se estabiliza con el de salida con su respectivo efecto capacitivo por el tanque.

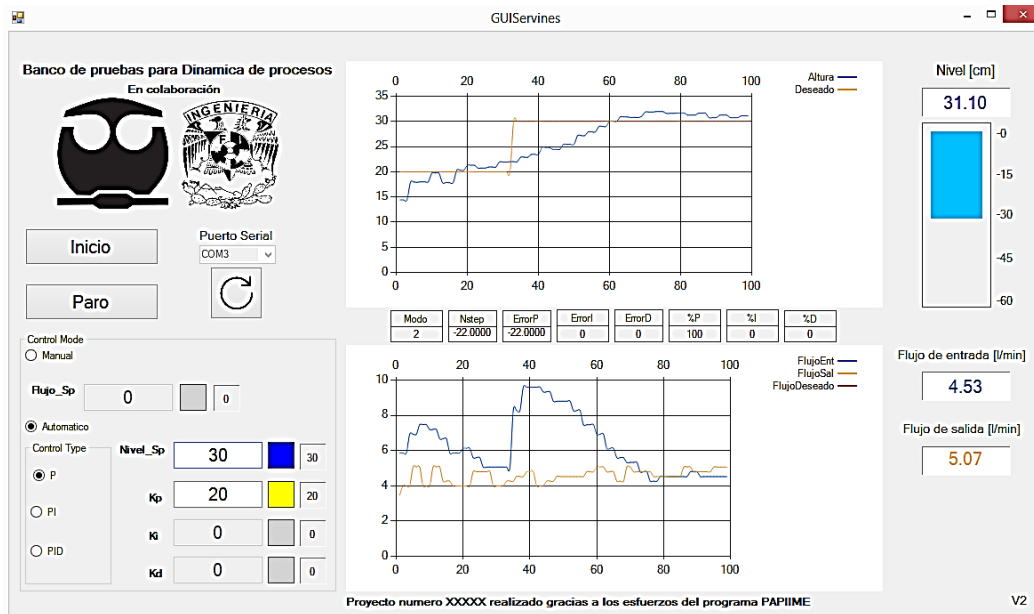


Figura 8.15 Control en modo 2 con proporcional pidiendo 30 [cm].

En el banco de pruebas se observa más claro ese sobrepaso del sistema, al ver como tiene ese pequeño volumen extra de agua arriba de la marca de los 30 cm.

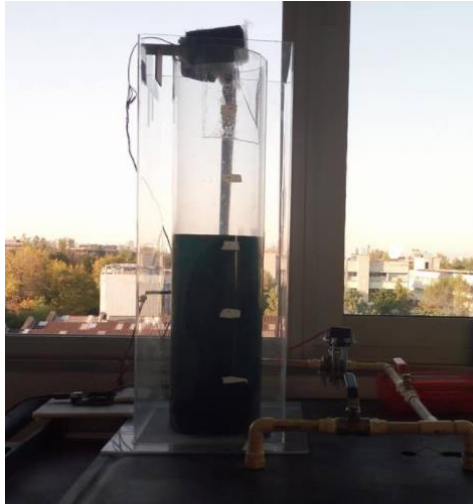


Figura 8.16 Tanque en 30 [cm].

Otra característica que se muestra en esta prueba del proporcional puro es la rapidez para llegar al valor deseado.

Entre más grande sea la K de ganancia proporcional mucho más rápido la variable de control tenderá al valor deseado.

Se redujo el valor de K proporcional en el siguiente caso con una K proporcional de 5 para ver de manera gráfica este fenómeno.

Si se compara la gráfica de altura con la constante proporcional de 20 [Figura 8.16] y está [Figura 8.17] con proporcional de 5 se puede ver como tiende mucho más rápido al valor final la de contante proporcional de 20.

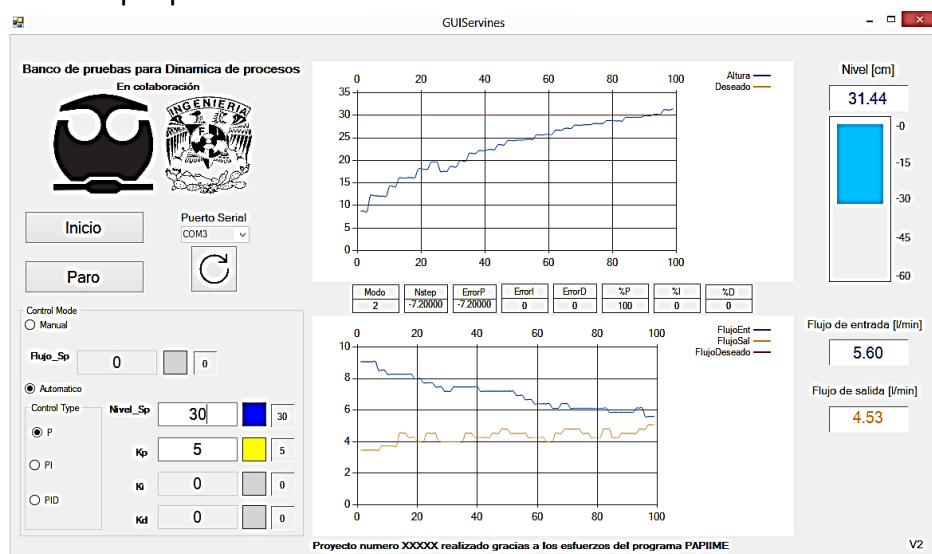


Figura 8.17 Control de altura con proporcional pequeña.

El inconveniente que conlleva el tener una constante proporcional pequeña en el sistema es que aumenta el error en estado permanente como se puede ver en el reposadero del modelo que casi aumentó 4 cm a comparación del proporcional con constante de 20 que solo tiene un error en estado permanente de 1 cm aproximadamente.

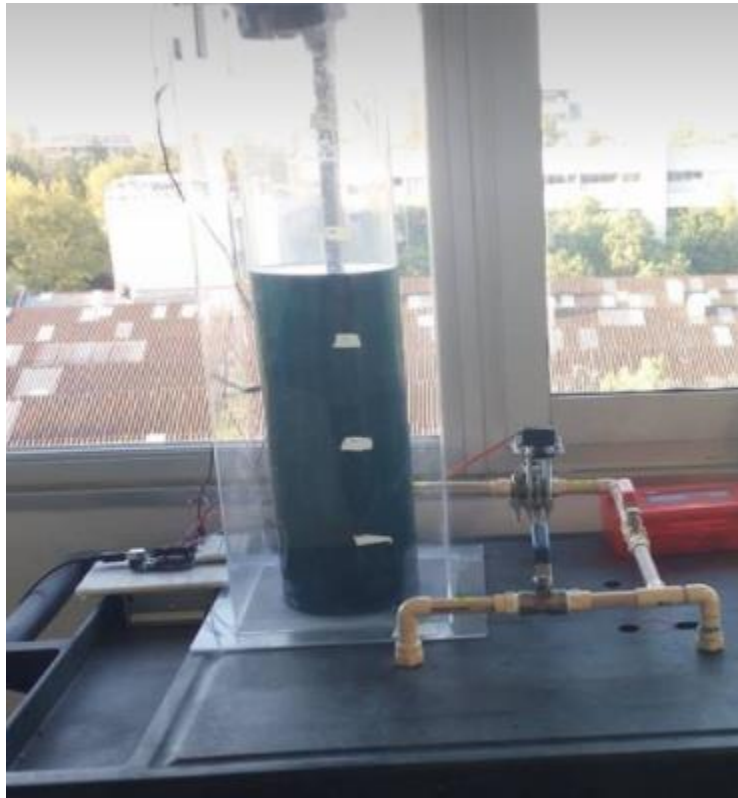


Figura 8.18 Tanque en 30 [cm] con sobrepaso por proporcional pequeña.

En estos casos el proporcional como se ve en el modelo real se queda corto antes las necesidades del control, para esto se tiene que usar la parte integral para minimizar el error obtenido en el proporcional, esto nos lleva a las pruebas de la parte del control PI.

## Control PI

Una parte proporcional pequeña significa un error en estado permanente grande por lo tanto se tiene que usar la parte integral para tratar de eliminar este error, la parte integral consiste en una sumatoria de los errores pequeños para hacerlos visibles para el control y poder corregirlos.

Usando una K proporcional con un valor de 5 se nota como el error en estado permanente es de 5 cm, un error bastante notorio.

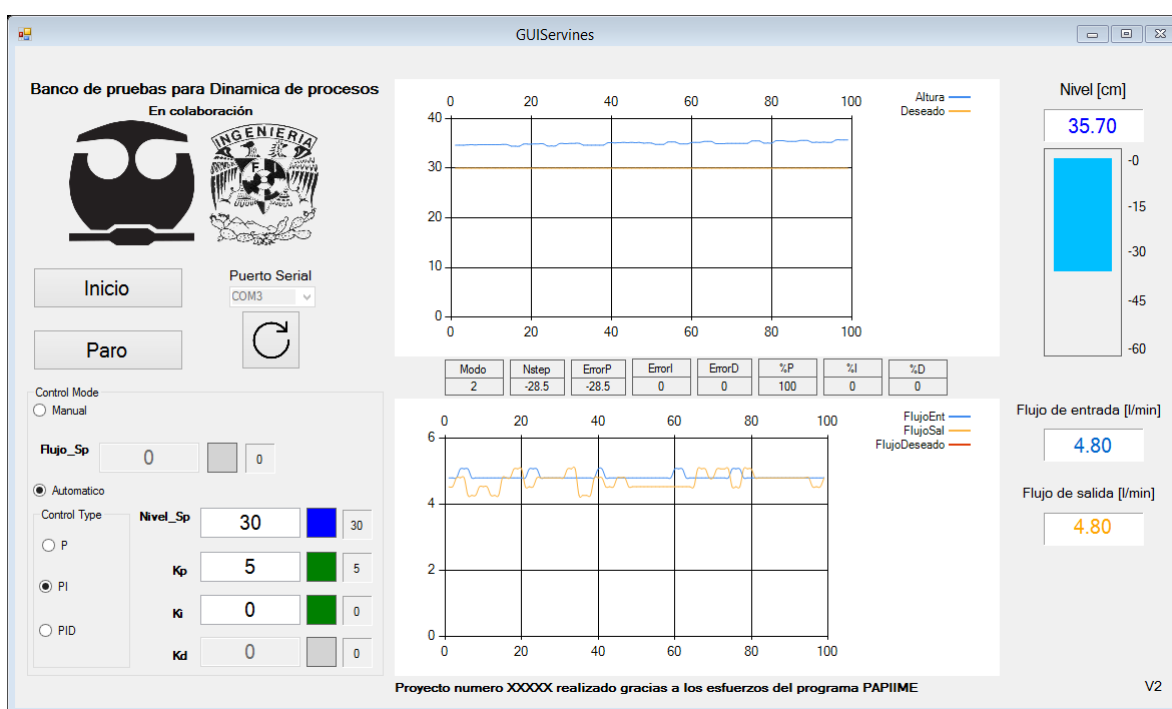


Figura 8.19 Error en estado permanente grande por la proporcional pequeña.

Para mostrar los efectos de la K de ganancia integral de la misma manera que con el proporcional se exagera su valor para maximizar sus efectos.

Podemos ver como con una constante integral de 5 el error en estado permanente baja hasta el punto en que ya no se tiene ese offset, ese es el objetivo de la parte integral, bajar el error en estado permanente aunque el hecho de usar una parte integral muy grande conlleva a aumentar el tiempo de asentamiento al valor deseado, haciendo más lento el proceso de llegar a ese valor.



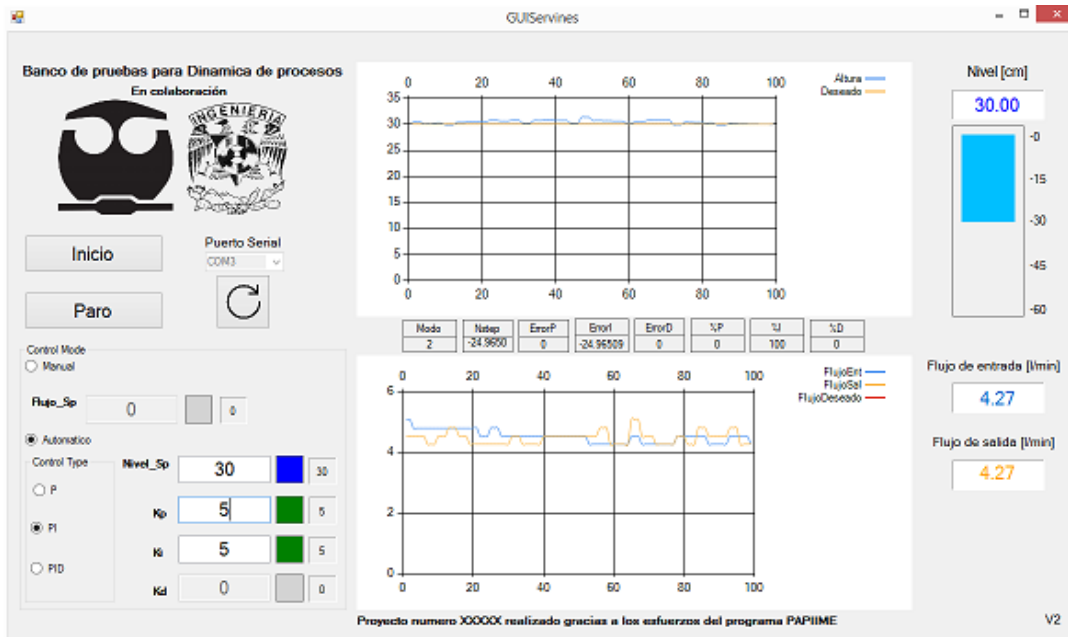


Figura 8.20 Error en estado permanente eliminado por la parte integral.



Figura 8.21 Tanque en 30 [cm] que aumenta el valor por mucha integral.

Es importante mencionar que si se pasa un cierto límite de constante integral en el modelo real, la variable de control puede desbordarse ya que un valor muy grande en la constante amplifica demasiado los errores y empieza a tomar errores grandes para la sumatoria, esto se puede ver en la imagen de repositorio [Figura 8.21] donde se le puso un valor de integral muy grande y se empieza a descontrolar.

### Control PD.

El control PD como se mencionó en el apartado de control, no se usa y no se va a aplicar en este banco debido a que es muy inestable por la tendencia que tiene la parte derivativa de amplificar los errores y las señales con ruido, en el banco de pruebas esto es un problema debido a que las señales de los sensores no son limpias debido a resonancia en el sensor de altura y al tipo de tecnología que usan los sensores de flujo haciendo al control PD en el banco inoperable.

### Control PID.

El control PID es la conjunción de las tres partes.

Se prueban el control PID para ver su funcionamiento.

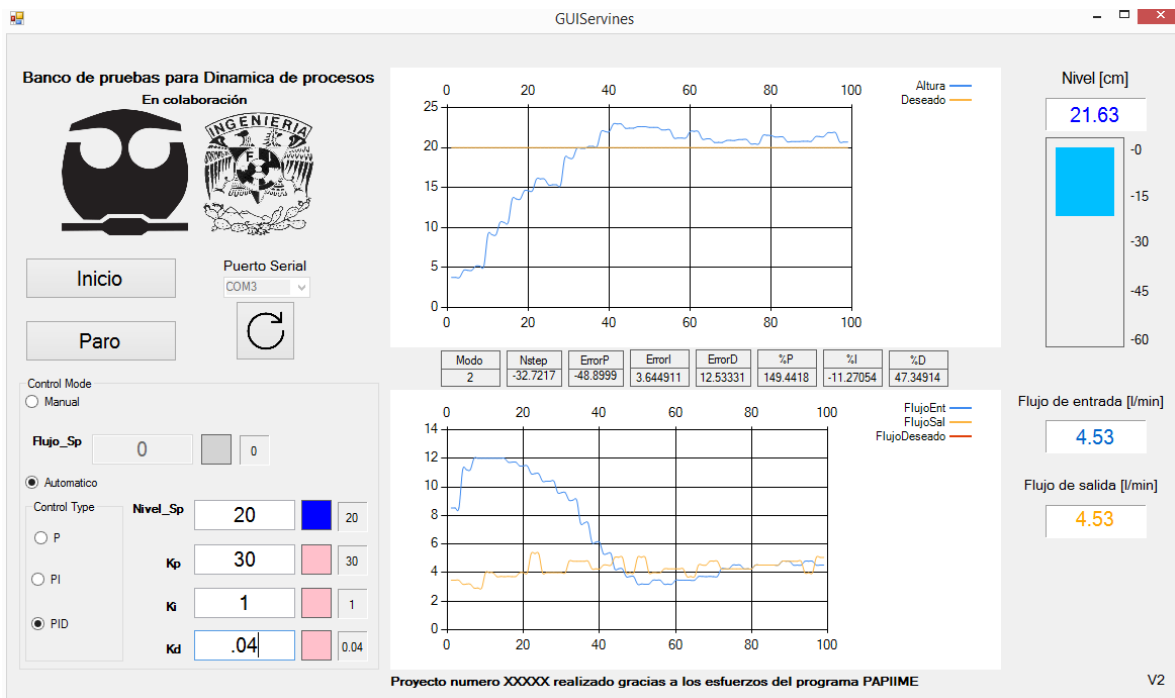


Figura 8.22 Control PID completo.

Se observa como con una proporcional de 30 un integral de 1 y una derivativa de 0.4 tiene un comportamiento muy parecido al de un proporcional puro, solo que es mucho más lento gracias al integral y tiene un sobrepaso más oscilante como se puede ver en el pico y bajada del momento 40 al momento 60 de tiempo.

Tarda en estabilizar la variable pero se puede observar como después de un tiempo el valor tiende a los 21.

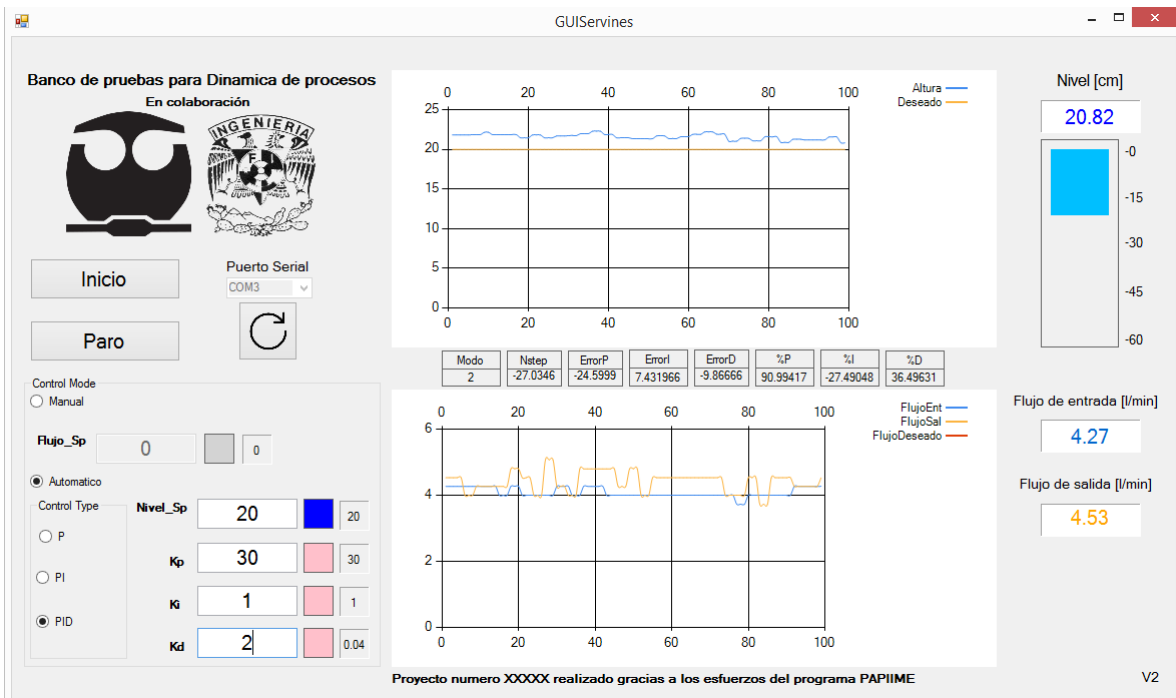


Figura 8.23 Control PID en estado estable con error en estado permanente.

El valor de derivativo como se muestra en la interfaz tiene que ser pequeño, de ser muy grande puede desestabilizar rápidamente al sistema.

Para las pruebas del banco se busca que el sistema también se desestabilice por la derivativa por lo que se hicieron las respectivas pruebas para probar esta inestabilidad.

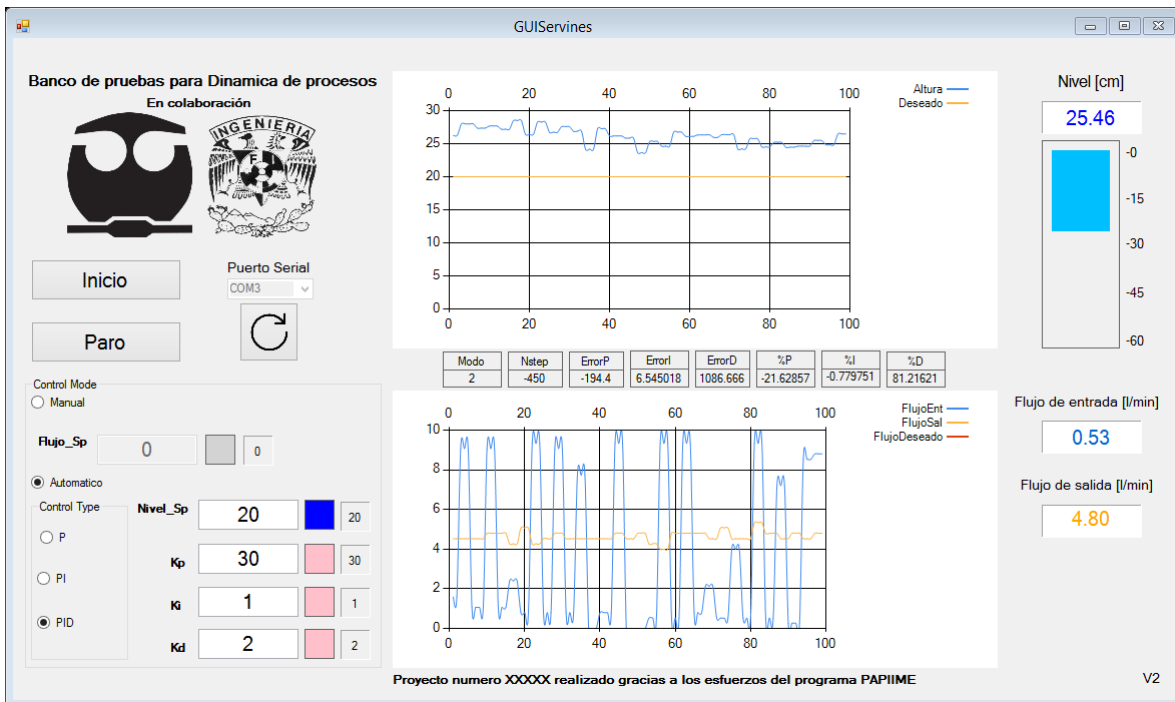


Figura 8.24 Sistema inestable por derivativo.

Se puede ver claramente en el flujo esas oscilaciones características de la respuesta subamortiguada de un sistema, y en la altura como se dispara el error de un cm a un rango de entre 3 y 5 [cm] dando una respuesta variable.

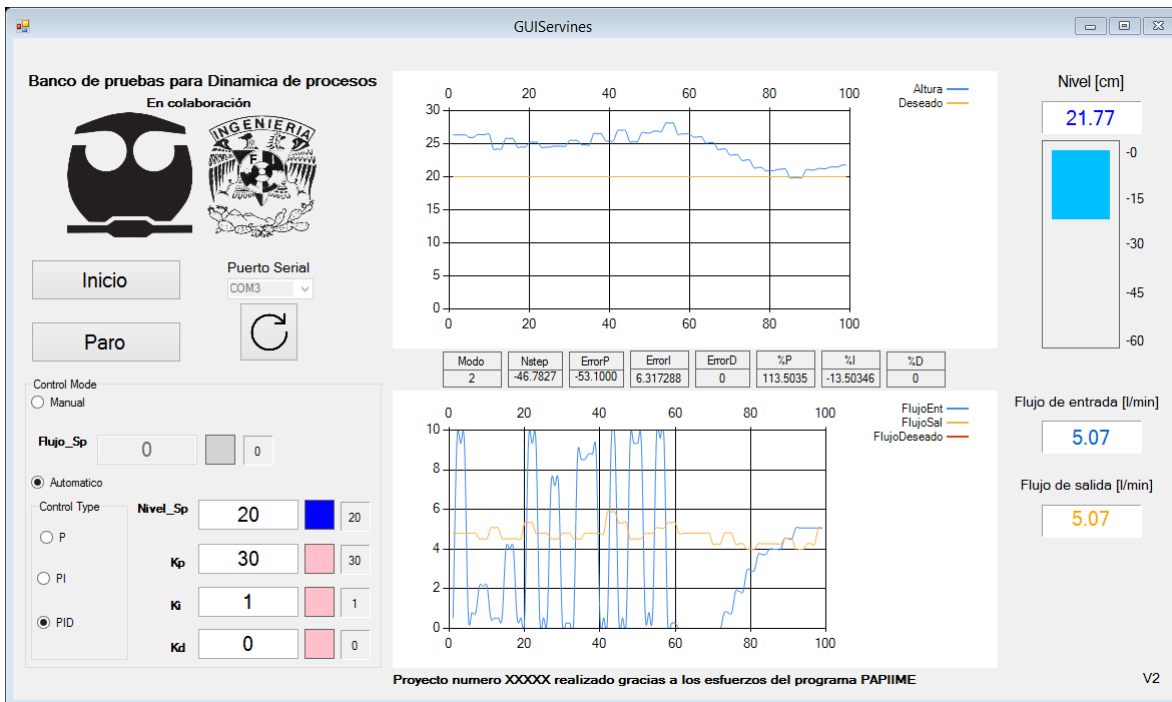


Figura 8.25 Sistema regresando a la estabilidad cuando se suprime la derivativa.

En la figura 8.25 se observa como el control funciona de manera correcta después de quitar el derivativo que es el causante del error oscilante, de igual manera se ve como los errores se amplifican y como regresa rápidamente al valor después de quitarle ese valor elevado de derivativo.

Como se puede ver las características del PID se pueden mostrar en el banco de pruebas para los estudiantes de dinámica de procesos, sus ventajas y desventajas dependiendo de su ganancia y como se puede desestabilizar el sistema rápidamente jugando con estas constantes, al igual que a los estudiantes de instrumentación les puede quedar más claro la forma de utilizar sensores como los de flujo sin necesidad de tener los propios, de la misma manera de como una interfaz es importante en el instrumentado de máquinas para mostrar información importante y en su debido caso monitorear variables de interés.

### 8.3 Trabajo a futuro

El darle continuidad a esta clase de proyectos de objetivo educativo es necesario para proporcionar a los alumnos material educativo de calidad y que a su vez se adapte a las futuras demandas educativas, tanto de los usuarios finales como de la materia que usa la tecnología desarrollada.

A partir de la información recabada en el diseño del actuador, interfaz y las pruebas del banco se observaron características con capacidad de mejorar para futuras iteraciones.

- Desarrollo de una interfaz más intuitiva con elementos interactivos que permitan facilitar su uso al alumno.
- Desarrollo de elementos 3D para la interfaz con el objetivo de hacer más didáctica la forma en la que se muestran los datos.
- Cambio de tecnología en el sensor de altura, debido a que la aplicación en espacios cerrados no es la mejor para el sensor HC-SR04, o en su debido caso hacer un filtrado para disminuir la resonancia producida por el tubo.
- Cambio de tecnología en el sensor de flujo a uno más preciso, ya que el sensor YF-S201 siempre tiene un error mayor del 10% y al usar el principio magnético es vulnerable al ruido eléctrico o en su debido caso aplicar un filtro para limpiar la señal y posiblemente hacer un promedio móvil.
- Agregar una parte integral al control de flujo para mejorar la respuesta, ya que se obtuvo un error considerable con el control proporcional simple.
- Cambiar el accesorio de plástico del servomotor por un cople maquinado para evitar el desgaste rápido ante el uso extensivo del banco.
- Tratar de mejorar el agarre lateral de la válvula para hacerlo todo en una pieza y no tener que agregar las piezas en U.
- Disminuir la cantidad de piezas atornillables en el actuador para evitar riesgo de fallas en las uniones.
- Aumentar la cantidad de servoválvulas en otras posiciones del banco para disminuir la intervención del usuario en el modelo físico y se concentre solo en manipular la interfaz y toma de datos.
- Creación de *Logs* de información en formato Txt o en un documento de Excel para poder usar programas auxiliares que ayuden al análisis de datos.
- Mejorar la velocidad de las gráficas.

## 9. Conclusión

El banco de pruebas fue exitosamente actualizado, se cambió la tecnología del actuador y lo hace más eficiente mecánicamente hablando ya que ya no se traba en el uso continuo ni tiene fallas de precisión para las posiciones como el motor a pasos que tiende a saltarse posiciones por omitir pasos en la secuencia de movimiento, la válvula resultó cumplir con su papel de manera correcta, no tiene problemas de torsión ni tiene problemas de fragilidad, el material escogido tiene las propiedades para darle durabilidad, robustez y su fácil diseño le da repetibilidad para la creación en un futuro de más servoválvulas para replicar el banco de pruebas para las dos materias, de la misma forma el uso de la nueva tecnología en el actuador permitió un control más preciso ya que tiene un tiempo de respuesta mucho más corto.

En cuestión del PID se tuvieron resultados acertados y las técnicas de control fueron bien aplicadas cumpliendo los objetivos de control. Hubo algunos problemas con respecto a los sensores ya que no fueron escogidos correctamente, el sensor de altura no tiene un buen desempeño en espacios cerrados por su principio de funcionamiento (onda ultrasónica) lo que hace que entre más pequeña sea la altura del líquido en el tanque mucho más desviación tendrá del valor real debido a la resonancia en el tubo de acrílico, se llegaron a rescatar casos en donde el sensor media hasta 2 [cm] en tanque vacío, esta resonancia mostraba lecturas falsas y durante todo el desarrollo del proyecto se vio reflejada esta deriva del sensor, ya que pese a la correcta implementación del control PID siempre se tuvo una medición inconsistente que variaba de manera continua entre uno y dos centímetros, con respecto al sensor de flujo se tuvieron que hacer adecuaciones en su constante para minimizar el error ya que este sensor inherentemente tiene un 10% de desviación del valor real debido a que no está diseñado para aplicaciones de precisión, se logró disminuir el error del sensor pero aún se arrastró un pequeño error, pese a los contratiempos que surgieron por las malas decisiones del sensor se pudieron encontrar soluciones temporales y a largo plazo, para el sensor de altura una cubierta con material de esponja logró reducir la sensibilidad del sensor disipando parte del cono que regresaba como resonancia, a largo plazo es conveniente hacer un promedio móvil en ambas mediciones para mejorar la señal aunque esto conlleve a un retraso de cinco valores en la gráfica, la opción más viable se considera en el cambio de tecnología, un sensor tipo laser para la altura o con un cono ultrasónico más pequeño y respecto al sensor de flujo uno que no use el principio magnético ya que son los más susceptibles al ruido eléctrico y al

flujo turbulento que es algo común en el banco de pruebas considerando todos los accesorios y como está circulando el flujo en las tuberías.

La interfaz diseñada consistió en una adaptación de la primera interfaz de la versión beta del banco de pruebas, pero se mejoró considerablemente en el momento de mostrar los datos, las gráficas del primer banco tenían demasiado ruido y por eso no era posible usarlas para cálculos, las gráficas suavizadas que se obtuvieron en la actualización del banco permiten ver claramente las respuestas de los sistemas de control y sus características principales como pico máximo, tiempo de asentamiento, error en estado permanente, entre otras, de la misma manera que se agregaron nuevas funciones que la interfaz de la primera iteración no tenía, tales como el esquema virtual de llenado del tanque, porcentaje de actuación de las partes del PID, el botón de *reset* y el botón de cierre de aplicación.

Un punto importante para los objetivos específicos del banco de pruebas era eliminar la dependencia del software sin licencia que era el encargado del control en el banco beta, esto se logró con creces ya que ahora no solo se eliminó la dependencia para evitar que los alumnos movieran el código si no que se eliminó la dependencia de un programa que se encargue del cálculo del control ya que con C# se logró hacer una aplicación que puede correr en cualquier máquina sin necesidad de tener un programa especializado de programación, lo cual le da una gran versatilidad al modelo sin poner en peligro el código de control, ya que en el software sin licencia siempre se tenía que tener abierto el código fuente para que el programa ejecutara las instrucciones desde el programa base.

Pese al error continuo de los sensores, las pérdidas en tuberías y en la bomba se logró hacer un control PID programable de manera correcta y con un error menor al 10% en los casos donde la altura era mayor a 5 [cm], se mejoró sensiblemente el funcionamiento del banco y se corrigieron los problemas que iba acarreado desde su primera iteración (resolución de las gráficas, tiempo de respuesta, error en estado permanente grande, imposibilidad de usar el control PID con componente derivativa) de igual manera que se lograron detectar posibles errores y problemas futuros a corregir en las siguientes iteraciones del banco (La poca fiabilidad en la medición de los sensores de las más destacables), se logró cambiar y actualizar la tecnología del actuador con éxito para mejorar su rendimiento, evitar problemas mecánicos y eliminar la dependencia del banco del software original dando así la capacidad de que cualquier alumno pueda usar el banco de pruebas en su propia computadora.



El mejorar las gráficas permite a los alumnos de dinámica de procesos tener un mejor entendimiento del fenómeno y ver de una manera más clara las características y el comportamiento en general del PID y a los alumnos de instrumentación les permite ver los errores comunes en los sensores en aplicaciones reales, las ventajas, desventajas y características principales de los sensores (rango, zona muerta, precisión, voltaje nominal, corriente nominal, entre otros) de igual manera que les muestra una herramienta más aparte de *Processing* para la creación de interfaces.

## 10. Referencias

### Texto

- [1] Corona Ramírez, L., Abarca Jiménez, G. and Mares Carreño, J. (2015). Sensores y actuadores. 1st ed. Editorial patria, pp.142.
- [2] Corona Ramírez, L., Abarca Jiménez, G. and Mares Carreño, J. (2015). Sensores y actuadores. 1st ed. Editorial patria, pp 143.
- [3] Corona Ramírez, L., Abarca Jiménez, G. and Mares Carreño, J. (2015). Sensores y actuadores. 1st ed. Editorial patria, pp 156.
- [4] Ecured.cu. (2017). Corriente de Foucault. [Online] Available at: [https://www.ecured.cu/Corriente\\_de\\_Foucault](https://www.ecured.cu/Corriente_de_Foucault) [Accessed 26 Oct. 2017].
- [5] Boylestad, R., Navarro Salas, R. and Piñón Rizo, J. (2011). Introducción al análisis de circuitos. 10th ed. México: Prentice Hall, p.465.
- [6] Corona Ramírez, L., Abarca Jiménez, G. and Mares Carreño, J. (2015). Sensores y actuadores. 1st ed. Editorial patria, pp 252.
- [7] Kane, J. and Sternheim, M. (1988). Physics. New York: John Wiley & Sons, pp 322.
- [8] Es.wikipedia.org. (2017). Presión estática. [Online] Available at: [https://es.wikipedia.org/wiki/Presión\\_estática](https://es.wikipedia.org/wiki/Presión_estática) [Accessed 26 Oct. 2017].
- [9] Es.wikipedia.org. (2017). Presión dinámica. [Online] Available at: [https://es.wikipedia.org/wiki/Presión\\_dinámica](https://es.wikipedia.org/wiki/Presión_dinámica) [Accessed 26 Oct. 2017].
- [10] Mx.omega.com. (2017). Medidor de Flujo Magnético. [Online] Available at: <https://mx.omega.com/prodinfo/medidor-de-flujo-magnetico.html> [Accessed 26 Oct. 2017].
- [11] Mx.omega.com. (2017). Medidor de Flujo Magnético. [Online] Available at: <https://mx.omega.com/prodinfo/medidor-de-flujo-magnetico.html> [Accessed 26 Oct. 2017].
- [12] Corona Ramírez, L., Abarca Jiménez, G. and Mares Carreño, J. (2015). Sensores y actuadores. 1st ed. Editorial patria, pp.258.
- [13] Villajulca, J. (2017). Caudalímetros Vortex: principio de medición. [Online] Instrumentacionycontrol.net. Available at: <http://www.instrumentacionycontrol.net/cursos-libres/instrumentacion/curso-completo-medicion-flujo-caudal/item/315-caudalimetros-vortex-principio-de-medicion.html> [Accessed 26 Oct. 2017].
- [14] Ecured.cu. (2017). Efecto Coriolis - EcuRed. [Online] Available at: [https://www.ecured.cu/Efecto\\_Coriolis](https://www.ecured.cu/Efecto_Coriolis) [Accessed 26 Oct. 2017].
- [15] Corona Ramírez, L., Abarca Jiménez, G. and Mares Carreño, J. (2015). Sensores y actuadores. 1st ed. Editorial patria, pp.280.
- [16] Corona Ramírez, L., Abarca Jiménez, G. and Mares Carreño, J. (2015). Sensores y actuadores. 1st ed. Editorial patria, pp.280.
- [17] Upcommons.upc.edu. (2017). Sistemas de control. [Online] Available at: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3330/34059-5.pdf?sequence=5> [Accessed 29 Oct. 2017].
- [18] Es.wikipedia.org. (2017). Controlador PID. [Online] Available at: [https://es.wikipedia.org/wiki/Controlador\\_PID](https://es.wikipedia.org/wiki/Controlador_PID) [Accessed 29 Oct. 2017].

- [19] campusMVP.es. (2017). Qué es la plataforma .NET y cuáles son sus principales partes - campusMVP.es. [Online] Available at: <https://www.campusmvp.es/recursos/post/que-es-la-plataforma-net-y-cuales-son-sus-principales-partes.aspx> [Accessed 29 Oct. 2017].
- [20] Maxmachinery.mx. (2017). Válvulas servo electrohidráulicas y válvulas proporcionales | Max Machinery-flow-meter. [Online] Available at: <http://www.maxmachinery.mx/aplicaciones/valvulas-servo-electrohidraulicas-y-valvulas-proporcionales> [Accessed 1 Nov. 2017].
- [21] Ulrich, K. (2013). Diseño y desarrollo de productos (5a. ed.). 5th ed. Mcgraw-Hill Interamerican.
- [22] Ulrich, K. (2013). Diseño y desarrollo de productos (5a. ed.). 5th ed. Mcgraw-Hill Interamerican.
- [23] Pololu.com. (2017). Servomotor HD-1501MG. [online] Available at: [https://www.pololu.com/file/download/HD-1501MG.pdf?file\\_id=0J729](https://www.pololu.com/file/download/HD-1501MG.pdf?file_id=0J729) [Accessed 4 Nov. 2017].
- [24] www.comunidadelectronicos.com, L. (2017). El bus I2C. [Online] Comunidadelectronicos.com. Available at: <http://www.comunidadelectronicos.com/articulos/i2c.htm> [Accessed 7 Nov. 2017].
- [25] www.comunidadelectronicos.com, L. (2017). El bus I2C. [Online] Comunidadelectronicos.com. Available at: <http://www.comunidadelectronicos.com/articulos/i2c.htm> [Accessed 7 Nov. 2017].

## Imágenes

- [1]Efecto Doppler, Corona Ramírez, L., Abarca Jiménez, G. and Mares Carreño, J. (2015). Sensores y actuadores. 1st ed. Editorial patria, pp.143.
- [2]Anónimo, (n.d.), Conexión de sensor óptico. [Image] Available at: <https://hardwarehackingmx.files.wordpress.com/2014/01/iirsense1.png> [Accessed 31 Oct. 2017].
- [3]Anónimo, (n.d.) Sensor capacitivo en lata. [Image] Available at: [http://2.bp.blogspot.com/-ldw4hjkxys8/VND3lhu5l\\_I/AAAAAAAAAik/zfZe6eSPTrM/s1600/figura1%2Bsensores%2Bopticos%2Be%2Bndutivos.jpg](http://2.bp.blogspot.com/-ldw4hjkxys8/VND3lhu5l_I/AAAAAAAAAik/zfZe6eSPTrM/s1600/figura1%2Bsensores%2Bopticos%2Be%2Bndutivos.jpg) [Accessed 31 Oct. 2017].
- [4]Anónimo, (n.d.), Corrientes parasitas en sensor inductivo. [Image] Available at: <https://img.interempresas.net/fotos/1320367.jpg> [Accessed 31 Oct. 2017].
- [5]Anónimo, (n.d.), Sensor Inductivo Magnético. [Image] Available at: [http://1.bp.blogspot.com/-L9qPSHb529c/VHS\\_7YZWDil/AAAAAAAAAC4/m3i--6GQD90/s1600/sensor%2Binductivo.jpg](http://1.bp.blogspot.com/-L9qPSHb529c/VHS_7YZWDil/AAAAAAAAAC4/m3i--6GQD90/s1600/sensor%2Binductivo.jpg) [Accessed 31 Oct. 2017].
- [6]Anónimo, (n.d.), Sensor de efecto hall. [Image] Available at: <http://www.aficionadosalamecanica.net/images-encendido/sensor-hall-completo.jpg> [Accessed 31 Oct. 2017].
- [7]Llenado de líquido, (n.d.). [Image] Available at: [Accessed 31 Oct. 2017].
- [8]Robot inteligente, (n.d.). [Image] Available at: [Accessed 31 Oct. 2017].
- [9]Cajas, (n.d.). [Image] Available at [Accessed 31 Oct. 2017].
- [10]Régimen de flujo, Corona Ramírez, L., Abarca Jiménez, G. and Mares Carreño, J. (2015). Sensores y actuadores. 1st ed. Editorial patria, pp.254.
- [11] Monografías, (n.d.), Orificios. [Image] Available at [https://www.dirind.com/dim/imagenes/clasificaciones/monografias/flujo/flujo\\_2.jpg](https://www.dirind.com/dim/imagenes/clasificaciones/monografias/flujo/flujo_2.jpg) [Accessed 31 Oct. 2017].

- [12]Wikipedia, (n.d.), Tubo Venturi. [Image] Available at [https://www.dirind.com/dim/imagenes/clasificaciones/monografias/flujo/flujo\\_2.jpg](https://www.dirind.com/dim/imagenes/clasificaciones/monografias/flujo/flujo_2.jpg) [Accessed 31 Oct. 2017]. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/54/Venturifixed2.PNG/1200px-Venturifixed2.PNG>
- [13] Tubo de dall, Corona Ramírez, L., Abarca Jiménez, G. and Mares Carreño, J. (2015). Sensores y actuadores. 1st ed. Editorial patria, pp.256.
- [14] Tubo de Prandtl, Corona Ramírez, L., Abarca Jiménez, G. and Mares Carreño, J. (2015). Sensores y actuadores. 1st ed. Editorial patria, pp.256.
- [15] Tobera, Corona Ramírez, L., Abarca Jiménez, G. and Mares Carreño, J. (2015). Sensores y actuadores. 1st ed. Editorial patria, pp.256.
- [16] Rotámetro, Corona Ramírez, L., Abarca Jiménez, G. and Mares Carreño, J. (2015). Sensores y actuadores. 1st ed. Editorial patria, pp.256.
- [17]Anónimo, (n.d.), Funcionamiento de sensor de turbina. [Image] Available at [https://images-blogger-opensocial.googleusercontent.com/gadgets/proxy?url=http%3A%2F%2F1.bp.blogspot.com%2F-46fbEbRJaTw%2FUwp5625n5JI%2FAAAAAAAAAAHU%2F63wshOQ\\_dPw%2Fs1600%2Fkhvkhvkhvkhv.png&container=blogger&gadget=a&rewriteMime=image%2F\\*](https://images-blogger-opensocial.googleusercontent.com/gadgets/proxy?url=http%3A%2F%2F1.bp.blogspot.com%2F-46fbEbRJaTw%2FUwp5625n5JI%2FAAAAAAAAAAHU%2F63wshOQ_dPw%2Fs1600%2Fkhvkhvkhvkhv.png&container=blogger&gadget=a&rewriteMime=image%2F*) [Accessed 31 Oct. 2017].
- [18]Lh5, (n.d.), Desplazamiento positivo. [Image] Available at <https://lh5.googleusercontent.com/kc8Jlmcxm2J41m22uyzWCKdR9jw-gJVd1Yvds6WkXn6lqLWXT8Hfress047JM68IA3XyT-bwX4kaQyh9Y5D1ObbtfcIpTrOF8HaBI3fmj0DBJAR19GVTasUzTPNmHuFJbimyZMED> [Accessed 31 Oct. 2017].
- [19] Omega, (n.d.), Sensor Magnético. [Image] Available at <http://www.sapiensman.com/tecnoficio/electricidad/imagenes/caudalimetro%20electromagnetico.jpg> [Accessed 31 Oct. 2017].
- [20] Efecto Doppler, Corona Ramírez, L., Abarca Jiménez, G. and Mares Carreño, J. (2015). Sensores y actuadores. 1st ed. Editorial patria, pp.258.
- [21] José Carlos Villajulca, (n.d.), Formación de turbulencias. [Image] Available at [http://www.instrumentacionycontrol.net/images/stories/Curso\\_Medicion\\_Caudal/fig%2054.gif](http://www.instrumentacionycontrol.net/images/stories/Curso_Medicion_Caudal/fig%2054.gif) [Accessed 31 Oct. 2017].
- [22] Anónimo, (n.d.), Flow meter. [Image] Available at <http://www.booccaflow.es/1-flow-meter/6-1.jpg> [Accessed 31 Oct. 2017].
- [23] Anónimo, (n.d.), Efecto Coriolis en sensores. [Image] Available at <http://www.sapiensman.com/tecnoficio/docs/imagenes/medidor%20flujo%20masico2.jpg> [Accessed 31 Oct. 2017].
- [24] OaxacaHoy, (n.d.), Tratamiento de aguas negras en el estado de Oaxaca. [Image] Available at <http://oaxacahoy.com/wp-content/uploads/2015/06/Planta-de-Tratamiento-de-Aguas-Residuales-Tuxtepec-2.jpg> [Accessed 31 Oct. 2017].
- [25] Anónimo, (n.d.), Climatizador. [Image] Available at <http://climatizacion10.com/recursos/fotos/master-evaporativo-portatil-bc-60-01.jpg> [Accessed 31 Oct. 2017].
- [26] directindustry, (n.d.), SKF SYSTEM 24 Automatic Lubricator. [Image] Available at (URL) [Accessed 31 Oct. 2017].

- [27] New Holland, (n.d.), Cosechadora New Holland Cr 6080. [Image] Available at <https://static.aastatic.com.ar/media/clasificados/Maquinaria%20Agricola/Cosechadoras/l/cosechadora-cr9080-20130617081022.jpg> [Accessed 31 Oct. 2017].
- [28] Murcia Economía, (n.d.), Industria alimentaria. [Image] Available at [https://ep00.epimg.net/economia/imagenes/2012/03/30/actualidad/1333134502\\_953768\\_1333134709\\_noticia\\_normal.jpg](https://ep00.epimg.net/economia/imagenes/2012/03/30/actualidad/1333134502_953768_1333134709_noticia_normal.jpg) [Accessed 31 Oct. 2017].
- [29] Baufor, (n.d.), Lavadora industrial Tipo Cinta. [Image] Available at <http://www.baufor.com/Imagenes/lavadoras-cinta-transportadora.jpg> [Accessed 31 Oct. 2017].
- [30] Nirco, (n.d.), Cámaras climatizadas. [Image] Available at <http://www.nirco.com/web/upload/productes/435.jpg> [Accessed 31 Oct. 2017].
- [31] Componentes de un servomotor, Corona Ramírez, L., Abarca Jiménez, G. and Mares Carreño, J. (2015). Sensores y actuadores. 1st ed. Editorial patria, pp.287.
- [32] Anónimo, (n.d.), Circuito de un servo. [Image] Available at <https://image.slidesharecdn.com/partesdeunservomotor-111121123301-phpapp02/95/partes-de-un-servo-motor-4-728.jpg?cb=1321879615> [Accessed 31 Oct. 2017].
- [33] Características de Servomotores, Corona Ramírez, L., Abarca Jiménez, G. and Mares Carreño, J. (2015). Sensores y actuadores. 1st ed. Editorial patria, pp.287.
- [34] Monografías, (n.d.), Servo-motores. [Image] Available at <http://www.monografias.com/trabajos60/servo-motores/Image26921.gif> [Accessed 31 Oct. 2017].
- [35] Anónimo, (n.d.), Duty Cicle. [Image] Available at <http://static.righto.com/images/pwm1.gif> [Accessed 31 Oct. 2017].
- [36] Vallarta Hobbies Radio control, (n.d.), Avión usado con motor cobra. [Image] Available at <http://www.vallartahobbies.com/images/avionesrtf/flyzonepipper.jpg> [Accessed 31 Oct. 2017].
- [37] Superrobotica, (n.d.), Robot con servomotores. [Image] Available at <https://ugc.kn3.net/i/origin/http://www.superrobotica.com/Images/servos21.jpg> [Accessed 31 Oct. 2017].
- [38] CrustCrawler, (n.d.), nombre. Bioloid. Available at <http://www.crustcrawler.com/products/bioloidPremium/imagenes/bioloid12.jpg> [Accessed 31 Oct. 2017].
- [39] Anónimo, (n.d.), Sistemas de control. [Image] Available at <http://3.bp.blogspot.com/-C6yL6DJSv10/URKEw1ARbSI/AAAAAAAAAag/pXKCNPFdo/s1600/control+1.png> [Accessed 31 Oct. 2017].
- [40] Anónimo, (n.d.), Sistemas de control. [Image] Available at <http://3.bp.blogspot.com/-C6yL6DJSv10/URKEw1ARbSI/AAAAAAAAAag/pXKCNPFdo/s1600/control+1.png> [Accessed 31 Oct. 2017].
- [41] Wikipedia (n.d.), nombre. Diagrama de bloques de un controlador PID en un lazo realimentado. Available at [http://blog.bricogeek.com/img\\_cms/1798-ejemplo-control-pid-vb6-01.jpg](http://blog.bricogeek.com/img_cms/1798-ejemplo-control-pid-vb6-01.jpg) [Accessed 31 Oct. 2017].
- [42] Wikipedia, (n.d.), nombre. Efectos de la sobre amortiguación Available at [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a3/PID\\_varyingP.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a3/PID_varyingP.jpg) [Accessed 31 Oct. 2017].
- [43] Wikipedia, (n.d.), Marco de Trabajo .NET. [Image] Available at [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/30/Diagrama\\_NET.jpg/756px-Diagrama\\_NET.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/30/Diagrama_NET.jpg/756px-Diagrama_NET.jpg) [Accessed 31 Oct. 2017].

- [44] discoverarmfield, (n.d.), CM12 Engines Standard Configuration. [Image] Available at [http://discoverarmfield.com/data/cm12/images/cm12\\_mimic.jpg](http://discoverarmfield.com/data/cm12/images/cm12_mimic.jpg) [Accessed 31 Oct. 2017].
- [45] Bosch, (n.d.), Bosch Rexroth Válvula Hidráulica Direccional Servo. [Image] Available at [https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-598236987-bosch-rexroth-valvula-hidraulica-direccional-servo-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-598236987-bosch-rexroth-valvula-hidraulica-direccional-servo-_JM) [Accessed 1 Nov. 2017].
- [46] Anónimo, (n.d.), Servo Actuador Válvula Admision Dodge Magnum 3.5 V6 05-08. [Image] Available at [https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-589950693-servo-actuador-valvula-admision-dodge-magnum-35-v6-05-08-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-589950693-servo-actuador-valvula-admision-dodge-magnum-35-v6-05-08-_JM) [Accessed 1 Nov. 2017].
- [47] BananaRobotics (2017). HD-150MG. [Image] Available at: <https://www.banarobotics.com/shop/image/cache/data/sku/BR/0/1/0/1/4/BR010146-PowerHD-HD-1501MG-Standard-Analog-High-Torque-Servo-63g/PowerHD-HD-1501MG-Standard-Analog-High-Torque-Servo-63g-600x600.JPG> [Accessed 7 Nov. 2017].
- [48] DHgate, (n.d.), 16 Channel 12 Bit Pwm/Servo Driver I2c Interface Pca9685 Module For Arduino. [Image] <https://www.dhresource.com/0x0s/f2-albu-g4-M01-18-C4-rBVaEVeHQWWANSaKAAOzVd8-aQo326.jpg/1pcs-lot-16-channel-12-bit-pwm-servo-driver.jpg> [Accessed 6 Nov. 2017].
- [49] Adafruit (2017). 16-channel-pwm-servo-driver hooking-it-up. [Image] Available at: <https://learn.adafruit.com/16-channel-pwm-servo-driver/hooking-it-up> [Accessed 7 Nov. 2017].
- [50] AG electrónica (2017). HTS-50FE-5. [Image] Available at: [https://http2.mlstatic.com/fuente-conmutada-50w-5v10a-certificacion-ul-hts-50fe-5-D\\_NQ\\_NP\\_886569-MLM25835723636\\_082017-O.jpg](https://http2.mlstatic.com/fuente-conmutada-50w-5v10a-certificacion-ul-hts-50fe-5-D_NQ_NP_886569-MLM25835723636_082017-O.jpg) [Accessed 7 Nov. 2017].
- [51] Nayla Mechatronics (2017). Sensor de flujo YF-S201. [Image] Available at: <http://www.naylampmechatronics.com/sensores-liquido/108-sensor-de-flujo-de-agua-12-yf-s201.html> [Accessed 7 Nov. 2017].
- [52] Mecatronium Chips (2017). Sensor de flujo YF-S201. [Image] Available at: <http://chips.mecatronium.com/tutorial-sensor-de-flujo-yf-s201/> [Accessed 7 Nov. 2017].
- [53] bjultrasonic (2017). HC-SR04. [Image] Available at: <https://cdn2.bjultrasonic.com/wp-content/uploads/2017/04/Ultrasonic-Sensors.jpg> [Accessed 7 Nov. 2017].
- [54] geekfactory (2017). HC-SR04. [Image] Available at: [https://www.geekfactory.mx/wp-content/uploads/2014/05/arduino\\_con\\_ultrasonico\\_hc\\_sr04.png](https://www.geekfactory.mx/wp-content/uploads/2014/05/arduino_con_ultrasonico_hc_sr04.png) [Accessed 7 Nov. 2017].