

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y
AUTOMÁTICA INDUSTRIAL



UNIVERSITAS
Miguel Hernández

"Control de un sistema híbrido de
actuación para dispositivos robóticos de
rehabilitación inmersos en ambientes
acuáticos"

TRABAJO FIN DE GRADO

Febrero-2025

AUTOR: Esther Peral Sempere

DIRECTOR/ES: Andrea Blanco Ivorra
David Martínez Pascual

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mis padres y a mi hermano por haberme apoyado desde el principio y haber creído siempre en mí.



RESUMEN

Numerosos trastornos neurológicos pueden afectar a las funciones motoras, sensoriales y cognitivas del cuerpo, limitando la autonomía y la calidad de vida de cientos de miles de personas en Europa. Dentro de estos trastornos, la espasticidad es problema importante en la rehabilitación de pacientes. Sin embargo, en la actualidad no existe una tecnología efectiva para tratar este problema.

Este TFG aborda el estudio y control de un novedoso concepto de actuador híbrido y los resultados del estudio de viabilidad, con vistas a su futura aplicación en un nuevo paradigma de rehabilitación robótico-acuática para administrar terapias a pacientes que sufren espasticidad grave, dolor o limitación de la amplitud de movimiento.

Los resultados del estudio indican que este nuevo sistema de control híbrido presenta mejores prestaciones que un sistema estándar de propulsión por chorro de agua. Aunque estos primeros resultados reflejan el potencial del enfoque híbrido propuesto, no pueden considerarse definitivos debido a las limitaciones del experimento, por lo que será necesario realizar estudios posteriores más exigentes.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN EJECUTIVO	III
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	3
2. Materiales y métodos	4
2.1. Bomba compresora	4
2.2. Válvulas	5
2.2.1. Válvula Posicionadora	5
2.2.2. Válvula Controladora	7
2.2.3. Software de Burkert para la gestión y comunicación de válvulas	9

2.3. Motor eléctrico	10
2.4. Sensor de par	11
2.5. Electrónica de control	12
2.5.1. Arduino	13
2.5.2. Phidget 1047	14
2.5.3. Escon 36/2DC	14
2.5.4. Phidget 1002	15
2.5.5. Phidget 1014	16
2.5.6. Relés	16
2.6. Primer <i>setup</i>	16
2.6.1. Bucle de control	19
2.6.1.1. Definición de PID	20
2.6.2. Controladores PIDs de las válvulas	22
2.6.3. Controladores PIDs del motor	23
2.6.4. Integración de los elementos del sistema con ROS	24
2.6.4.1. Control de la Válvula Posicionadora	26

2.6.4.2. Control de la Válvula Controladora	28
2.6.4.3. Control del motor	29
2.6.5. Desarrollo de la interfaz de usuario	31
2.7. Segundo <i>setup</i>	35
3. Resultados y discusión	37
3.1. Resultados experimentales del primer <i>setup</i>	37
3.2. Resultados experimentales del segundo <i>setup</i>	41
4. Conclusiones	46
5. Trabajos futuros	47
BIBLIOGRAFÍA	48



ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Diseño conceptual del sistema de actuación híbrido desarrollado y patentado en el proyecto SPLASH.	2
2.1. Bomba compresora DAB [®] EsyBox	5
2.2. "Válvula posicionadora", Burkert [®] (Tipo 3285 / N ^o identificación 278331)	6
2.3. Diagrama de proceso de la Válvula Posicionadora	6
2.4. Caudalímetro de turbina 257-133 de RS	7
2.5. "Válvula Controladora", Burkert [®] (Tipo 3285 / N ^o identificación 287897)	8
2.6. Caudalímetro de Burkert [®] (Tipo SE35 / N ^o identificación 444005)	8
2.7. Diagrama de proceso de la Válvula Controladora	9
2.8. Pantalla de inicio de la interfaz del software de control de <i>Burkert</i> para la gestión de las válvulas	10
2.9. Componentes que conforman la actuación motora	11
2.10. Componentes empleados para cuantificar el par realizado.	12
2.11. Electrónica numerada	12

2.12. Arduino Mega	13
2.13. Phidget 1047 empleada determinar la posición del motor	14
2.14. Escon 36/2DC	15
2.15. Phidget 1002, empleada para el control del motro eléctrico	15
2.16. Phidget 1014_2	16
2.17. <i>Setup</i> experimental inicial con los componentes numerados	17
2.18. CAD del actuador híbrido en distintas posiciones y configuraciones	18
2.19. Esquema del funcionamiento interno del procesamiento de señales de las válvulas	20
2.20. Diagrama de la arquitectura software de control y monitorización desarrollada en ROS.	25
2.21. Esquema del control de la Válvula Posicionadora	27
2.22. Esquema del control de la Válvula Controladora	29
2.23. Esquema del control del motor de la implementación en ROS	30
2.24. Captura de la Interfaz	31
2.25. Captura de la ventana emergente	33
2.26. Versiones del Target Generator	34

2.27. Segunda configuración experimental	36
3.1. Par realizado por la Válvula Posicionadora en función del tiempo ante una entrada escalón	38
3.2. Par realizado por la Válvula Posicionadora en función del tiempo ante una entrada senoidal	39
3.3. Posición alcanzada por el eslabón en función del tiempo ante una entrada escalón	40
3.4. Posición alcanzada por el eslabón en función del tiempo ante una entrada seno	40
3.5. Par realizado por el sistema según la señal de caudal introducida . . .	41
3.6. Par realizado por el sistema en función del tiempo ante una entrada escalón	43
3.7. Par realizado por el sistema en función del tiempo ante una entrada senoidal	44
3.8. Par realizado por el sistema según la señal de caudal introducida . . .	44
3.9. Par realizado por el sistema según la señal de caudal introducida . . .	45

1. Introducción

Los trastornos neurológicos son enfermedades del sistema nervioso central y periférico que afectan las funciones motoras, sensoriales y cognitivas del cuerpo, limitando la autonomía y la calidad de vida de cientos de miles de personas en Europa [1]. La rehabilitación asistida por robots ha demostrado tener un gran potencial para la recuperación de las capacidades perdidas de los pacientes, teniendo un gran impacto en la mejora de la calidad de vida de estos. No obstante, existe un grupo de pacientes que quedan excluidos de este tipo de rehabilitación, como aquellos que presentan patologías severas, como un alto grado de espasticidad, rigidez articular o dolores crónicos [2]. Aunque un porcentaje considerable de los pacientes que requieren rehabilitación padecen de este tipo de afecciones graves, no existen tecnologías capaces de prestar un tratamiento eficaz para este grupo debido a la dificultad para adaptar los sistemas a cada paciente en particular, y por la imposibilidad de realizar sesiones lo suficientemente duraderas e intensas como para llegar a ser efectivas [3].

Existe un nuevo paradigma dentro de la rehabilitación asistida por robots para pacientes que sufren de espasticidad severa: la rehabilitación robotico-acuática. Trabajar en este entorno de apoyo permite aprovechar ciertas ventajas del agua, como la ingravidez, la descarga articular y la resistencia al movimiento. Así mismo, este entorno ha demostrado su eficacia en el tratamiento de varios trastornos con limitaciones como las que se han presentado anteriormente [4]. Este conjunto de propiedades brindan a los pacientes con enfermedades o síntomas limitantes beneficios que no podrían ser posibles en otros entornos.

1.1. Antecedentes

A raíz de la necesidad de estudiar el nuevo paradigma de rehabilitación robotico-acuática surge el proyecto SPLASH. El objetivo principal de este proyecto es estudiar en profundidad los beneficios del agua en la rehabilitación de pacientes con

espasticidad.

Evaluaciones recientes [5, 6] indican que la gran mayoría de los dispositivos de rehabilitación actuales emplean actuadores eléctricos como fuente de energía, debido a que son relativamente potentes, fáciles de controlar y ofrecen una amplia variedad de alternativas comerciales. Sin embargo, la naturaleza rígida de estos actuadores podría llegar a causar dolor a los pacientes. Durante el proyecto SPLASH surge la idea de aprovechar el medio acuático para accionar un nuevo concepto de actuador que da lugar a una patente. Este actuador, en adelante “actuador híbrido”, combina la fuerza producida por una serie de microchorros, situados a lo largo de un eslabón cuyo eje de rotación se encuentra en un extremo, y el par producido por un pequeño motor eléctrico como se muestra en diseño conceptual de la Figura 1.1. Esto permite crear un sistema suave, gracias a las propiedades de los microchorros, y preciso a la vez, gracias al motor eléctrico.



Figura 1.1: Diseño conceptual del sistema de actuación híbrido desarrollado y patentado en el proyecto SPLASH.

El desarrollo de la patente da lugar al proyecto NOHA (“Novedosos sistemas híbridos de actuación para dispositivos robóticos de rehabilitación inmersos en ambientes acuáticos”). El proyecto NOHA se basa en la prueba de concepto, cuyo objetivo principal es validar la patente del actuador híbrido, desarrollando un marco teórico, los principios de diseño y los algoritmos de control para dicho sistema de actuación

híbrido, aprovechando las propiedades del medio acuático con el fin de utilizarlo para avanzar en el diseño y control de robots de rehabilitación innovadores específicamente diseñados para la terapia acuática. Este Trabajo de Fin de Grado toma parte dentro del marco del proyecto NOHA.

1.2. Objetivos

El principal propósito de este Trabajo de Fin de Grado es validar el funcionamiento del primer prototipo de actuador híbrido construido dentro del proyecto NOHA a partir del concepto presentado en la patente. Este primer prototipo es un sistema sencillo, compuesto de un eslabón que se encuentra sumergido en agua. A raíz de este propósito se establecen los siguientes objetivos:

- **Montaje y puesta en marcha del actuador híbrido en una maqueta experimental.** Se seleccionan los componentes que conforman la maqueta y se describe en ensamblaje y el control.
- **Validación experimental.** Se realizarán distintas pruebas con el funcionamiento final para observar los resultados.

2. Materiales y métodos

En esta sección se expone todo el material empleado durante la realización de este Trabajo de Fin de Grado, describiendo detalladamente las funciones y la utilidad de cada uno de ellos. Posteriormente se presentan los dos *Setups* que se han montado con los materiales descritos para realizar la experimentación.

2.1. Bomba compresora

Uno de los objetivos establecidos para validar el actuador híbrido es que este sea capaz de realizar la fuerza suficiente para superar tanto el peso de las articulaciones de los pacientes como la resistencia que ofrece el agua con tal de lograr, en un futuro, implementarlo en un exoesqueleto de pierna que ayude al paciente a realizar ciertos movimientos bajo el agua.

Se requiere comprobar cuál será el par máximo que es capaz de generar esta primera maqueta sin que la propulsión del agua a través de la bomba se convierta en una limitación, procurando que esta sea capaz de propulsar el agua a una velocidad suficiente como para generar, como mínimo, ese par que se quiere alcanzar.

Teniendo esto en cuenta, se selecciona la bomba compresora *EsyBox* de la marca DAB[®] (Figura 2.1). Esta bomba presenta una serie de razones claves que hacen que sea una buena elección en comparación con otras bombas del mercado. Una de las principales ventajas que presenta es su instalación sencilla, lo que facilita y agiliza significativamente toda la puesta en marcha. Además, la *EsyBox* cuenta con un diseño compacto que es capaz de adaptarse a cualquier montaje, ya que cuenta con diversas opciones de entradas y salidas de agua para integrarse con cualquier sistema.



Figura 2.1: Bomba compresora DAB[®] EsyBox

2.2. Válvulas

Se quiere controlar el sistema ajustando el caudal que expulsan los microchorros. Para ello, se requiere el uso de diversas válvulas, una por cada uno de los microchorros implementados. Es fundamental que estas válvulas cuenten con control proporcional que permita regular la cantidad de flujo a través de un actuador que ajuste su apertura en función de una señal de control. En este proyecto se han trabajado con dos válvulas distintas detalladas a continuación.

2.2.1. Válvula Posicionadora

Inicialmente, se decide adquirir una sola válvula con el objetivo de probar su funcionamiento y evaluar su desempeño. Si cumple con los requisitos esperados, se procederá a la compra de una segunda para completar el control individual de cada chorro. La válvula seleccionada es la *Burkert*[®] (Tipo 3285 / N^o identificación 278331), esta se muestra en la Figura 2.2. Debido a su funcionamiento, de ahora en adelante nos referiremos a ella como “Válvula Posicionadora”.



Figura 2.2: "Válvula posicionadora", Burkert® (Tipo 3285 / N° identificación 278331)

La Válvula Posicionadora es controlada por una señal externa que puede ser tanto un voltaje de 0 a 10 V como una intensidad de 4 a 20 mA. Además cuenta con una rápida capacidad de respuesta, permitiendo un ajuste preciso del flujo en tiempo real.

El proceso interno de control de la válvula es el que se muestra en la Figura 2.3. La válvula recibe una señal de entrada, la cual toma como valor de referencia para determinar la posición deseada (CMD). Esta posición de referencia es usada por el actuador para mover físicamente la válvula. La posición real de la válvula (POS), medida continuamente por un sensor de posición, se compara con la posición de referencia y si existe diferencia, se emite una señal de ajuste al actuador hasta que la posición real coincida con la deseada.

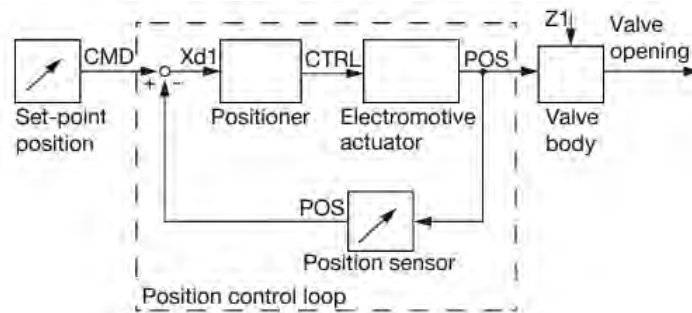


Figura 2.3: Diagrama de proceso de la Válvula Posicionadora

Como se ha mencionado, esta válvula cuenta únicamente con un sensor interno que mide como de abierta o cerrada se encuentra. Por lo tanto, solo podrá ser controlada a través de señales que se refieran a su apertura y no al caudal, como inicialmente se había previsto. Para poder cerrar el bucle de control que permite controlar la válvula mediante una señal de caudal se necesita un caudalímetro que lea el caudal de salida.

El caudalímetro 257-133 de RS que se muestra en la Figura 2.4 mide el caudal del agua que pasa por la tubería en función de la velocidad de rotación de una turbina que se encuentra en su interior. Esta velocidad de rotación se convierte en una serie de pulsos de tensión que necesitaran ser leídos y traducidos a caudal.



Figura 2.4: Caudalímetro de turbina 257-133 de RS

2.2.2. Válvula Controladora

A pesar de poder solucionar el problema del control de caudal de la Válvula Posicionadora mediante el uso de un caudalímetro externo, se decide no adquirir una segunda válvula igual y se opta por seleccionar una válvula que si permita controlar el caudal directamente.

La válvula (Tipo 3285 / N^o identificación 287897) (Figura 2.5) es esencialmente igual que la primera que se obtuvo, a excepción de que esta cuenta con un control del

caudal de salida implementado de forma interna dentro de la electrónica de control de la propia válvula.



Figura 2.5: "Válvula Controladora", Burkert® (Tipo 3285 / N° identificación 287897)

El caudalímetro que se emplea en este caso es el (Tipo SE35 / N° identificación 444005) (Figura 2.6). Este funciona a través de un mecanismo de engranajes ovales. Cuando el fluido entra, hace girar estos engranajes y se obtiene el caudal mediante una relación directa entre las vueltas de los engranajes y el volumen de fluido que pasa a través del medidor. Además, este caudalímetro cuenta con una pantalla y una serie de botones para configurar los parámetros del medidor.



Figura 2.6: Caudalímetro de Burkert® (Tipo SE35 / N° identificación 444005)

El proceso interno de control de la válvula es el que se muestra en la Figura 2.7. Esta

válvula cuenta con un controlador de todo el proceso en general (*Process controller*), lo que permite implementar un control en cascada. Esto significa que el bucle de control de la posición que se usa en la Válvula Posicionadora y se muestra en la Figura 2.3 está integrado dentro de este diagrama de control.

El caudal deseado, representado por la señal de referencia (SP), se envía al proceso de control de posición como se ilustra en la Figura 2.7. Este proceso genera una referencia de posición deseada (CMD) que se envía al bucle de control de posición que se muestra en la Figura 2.3. El funcionamiento de este lazo ha sido previamente explicado en la sección sobre la Válvula Posicionadora. Como resultado, se genera una señal de apertura permitiendo el paso de un caudal determinado, el cual es leído por el caudalímetro. Finalmente, el sistema compara el caudal real y el caudal deseado y, si existe diferencia entre ambos, se emite una señal de corrección (PV) hasta que los dos valores coincidan.

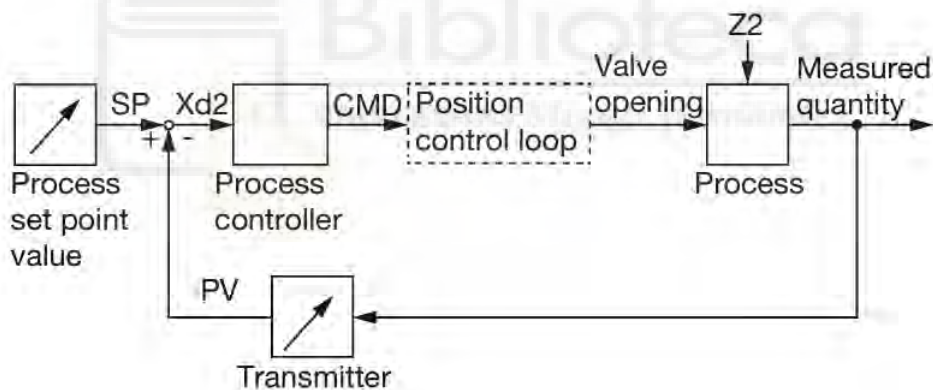


Figura 2.7: Diagrama de proceso de la Válvula Controladora

2.2.3. Software de Burkert para la gestión y comunicación de válvulas

Burkert® también ofrece un software propio llamado *Burkert Communicator* (Figura 2.8), que permite configurar y diagnosticar las válvulas, ajustar sus parámetros y mostrar representaciones gráficas de los valores de algunos procesos a través de una interfaz intuitiva. Este se conecta a las válvulas mediante comunicación CAN.

Esta interfaz se usa durante el proyecto, principalmente, para establecer la relación caudal/voltaje en ambas válvulas y ajustar el control interno de la Válvula Controladora.

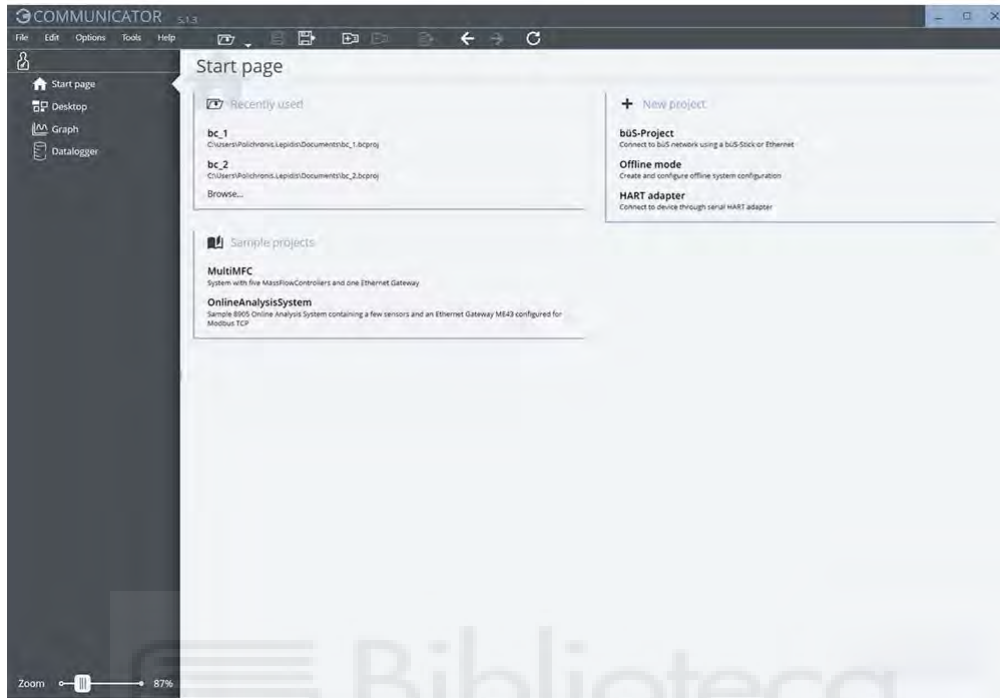


Figura 2.8: Pantalla de inicio de la interfaz del software de control de *Burkert* para la gestión de las válvulas

2.3. Motor eléctrico

Como se ha comentado en la introducción, los microchorros pueden proporcionar un control suave, pero no del todo preciso. Por esta razón, se desarrolla el concepto de actuador híbrido que incorpora un motor a la actuación para aportar el ajuste fino del que carecen los microchorros.

Dado que se busca que la mayor contribución de par provenga de los microchorros, y se pretende limitar la acción del motor al 20 % de la acción de estos para no perder la suavidad en el movimiento, el motor incorporado no necesita ser de alta potencia, sino más bien uno rápido y pequeño.

Se ha decidido emplear el motor *DCX 19 S* (Figura 2.9a) de Maxon[®], un motor de corriente continua que funciona mediante la aplicación de corriente eléctrica. Es capaz de realizar un par nominal de 11.3 mNm y alcanzar una velocidad de 16000 rpm. Su diseño compacto, con un diámetro de de 19 mm, es una de las características que lo hacen ideal para este sistema.

Este motor se acopla a la reductora que muestra la Figura 2.9b para disminuir la velocidad de giro y aumentar el par. También se usa un encoder (Figura 2.9c) para determinar la posición exacta del eje del motor y por lo tanto del eslabón.



Figura 2.9: Componentes que conforman la actuación motora

2.4. Sensor de par

Para poder conocer el par que el sistema es capaz de generar se utiliza un sensor de par. El *OnRobot* (100528) (Figura 2.15) es un sensor avanzado capaz de medir la fuerza y el par en los tres ejes. Se conecta al ordenador mediante una *Compute*

Box como la que se muestra en la Figura 2.16, la cual se enlaza con la interfaz de un software especializado. Este software permite realizar diversas funciones, como grabación de trayectorias y control de fuerzas, entre otras.



(a) Sensor de par *OnRobot* (100528)



(b) *Compute Box*

Figura 2.10: Componentes empleados para cuantificar el par realizado.

2.5. Electrónica de control

A continuación, en la Figura 2.11, se muestra la electrónica utilizada para el control y configuración de los distintos elementos, así como para la recopilación de datos. Sobre la imagen se enumeran los elementos más destacados, y a continuación se realiza una breve descripción de cada uno y se explica su uso.

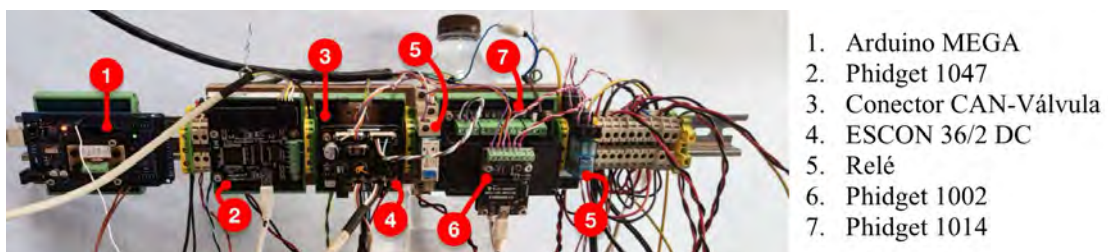


Figura 2.11: Electrónica numerada

2.5.1. Arduino

El arduino *Arduino Mega* (Figura 2.12) es una placa de desarrollo construida en base a un microcontrolador modelo *Atmega2560*. Esta cuenta con 54 pines digitales, 16 entradas analógicas, 4 puertos series y una memoria RAM.

Se emplea el *Arduino Mega* para la adquisición de datos provenientes de ambos caudalímetros situados a las salidas de las válvulas.

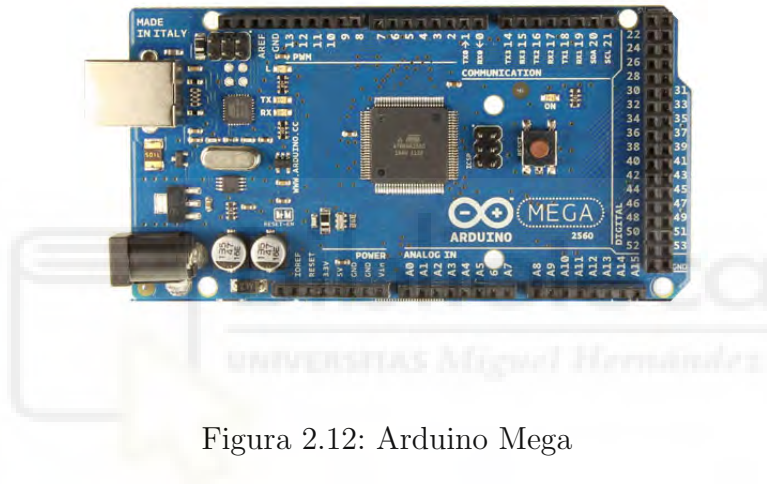


Figura 2.12: Arduino Mega

Para medir el caudal a la salida de la Válvula Posicionadora, se emplea uno de los pines digitales del *Arduino* para registrar los pulsos generados por el caudalímetro RS. Cada 0.25 segundos se leen los pulsos generados por el caudalímetro y, mediante una relación directa entre el flujo y la cantidad de pulsos, la señal se traduce en caudal.

Por otro lado, la lectura de caudal a la salida de la Válvula Controladora se realiza de manera distinta. En este caso, el caudalímetro de *Burkert* transforma el flujo en una señal de corriente, la cual es enviada de vuelta a la válvula para cerrar el bucle de control. Posteriormente, la válvula genera una señal de tensión proporcional a la intensidad y, por tanto al caudal. Esta salida es leída por el *Arduino*. Finalmente, mediante una relación directa entre la tensión y el flujo, la señal se traduce en caudal.

2.5.2. Phidget 1047

La tarjeta controladora *Phidget 1047* (Figura 2.19), también conocida como *Phidget Encoder*, ha sido creada especialmente para la lectura de encoders. Esta es capaz de leer hasta cuatro encoders de manera simultánea con una tasa de conteo de hasta 250000 ciclos por segundo. Además obtiene los datos a velocidades de máximo 125 Hz.

En este sistema, *Phidget Encoder* se utiliza para procesar la información recibida desde el motor, permitiendo determinar la posición del eje del motor en cada instante, al conectar el encoder de *Maxon* a uno de sus puertos de entrada.

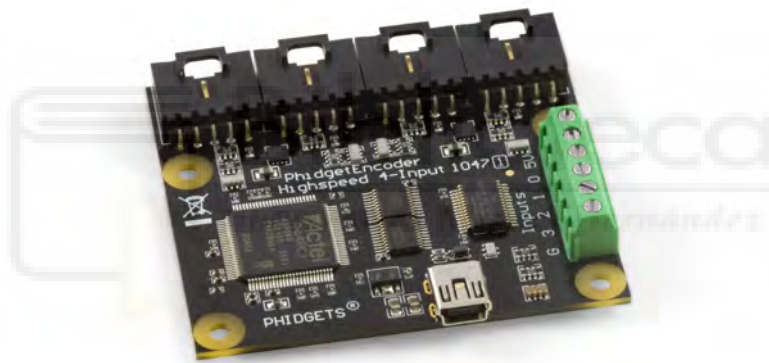


Figura 2.13: Phidget 1047 empleada determinar la posición del motor

2.5.3. Escon 36/2DC

La *ESCON 36/2 DC* (Figura 2.20) es una controladora diseñada específicamente para motores de corriente continua (DC) con escobillas. Una de las grandes ventajas de esta controladora es la capacidad de operar en dos modos: control de velocidad y control de corriente. En el modo de velocidad, la controladora mantiene una velocidad constante en el motor conectado, mientras que en el modo de corriente regula la corriente suministrada al motor, lo que equivale a controlar el par que este realiza.



Figura 2.14: Escon 36/2DC

En este proyecto, se emplea la *ESCON* en modo corriente, para poder determinar que par debe realizar el motor

2.5.4. Phidget 1002

La *Phidget 1002* que se muestra en la Figura 2.21 está diseñada para producir voltajes de -10V a +10V con un máximo de $\pm 20\text{mA}$. Esta cuenta con 4 canales de salida analógicas que comparten una tierra en común.



Figura 2.15: Phidget 1002, empleada para el control del motor eléctrico

En este proyecto se usan tres de ellas. Con las dos primeras salidas la *Phidget* se encargada de enviar una tensión concreta a las válvulas para que estas se abran

o se cierren según se desee. La tercera salida genera una tensión basada en el par que se desea producir en los motores, la cual es enviada a la *ESCON* para que esta convierta la señal en una corriente que pueda ser utilizada por el motor.

2.5.5. Phidget 1014

La *Phidget 1014* (Figura 2.22), también llamada *Phidget Relay*, cuenta con 4 relés con distintas configuraciones: normalmente abierta (NO), normalmente cerrado (NC) y el común (COM). Se conecta la *ESCON* al primero de los relés de la *Phidget*, para poder habilitarla y deshabilitarla a través de este.



Figura 2.16: Phidget 1014.2

2.5.6. Relés

Se usan dos relés conectados a todas las controladoras mencionadas anteriormente para garantizar el funcionamiento seguro del sistema. Estos relés están controlados por una seta de emergencia, la cual, al ser pulsada, deshabilita todos los elementos.

2.6. Primer *setup*

El objetivo de el primer *setup* es poder mover el eslabón a través del envío de dos posibles entradas: par que se quiere realizar en el eje de giro y posición en grados que

se quiere alcanzar con el eslabón. Se busca, por lo tanto, que la maqueta funcione de la siguiente manera:

1. Se le envía a cada válvula una consigna en función de las dos posibles entradas mencionadas anteriormente.
2. A continuación la bomba suministra el caudal necesario para cumplir dicha consigna.
3. Este caudal es transportado a través de unos tubos, hacia las válvulas que lo reconducen hasta los microchorros correspondientes.
4. Los microchorros, finalmente, mueven el eslabón en función del empuje del agua.
5. El motor eléctrico se encarga de realizar ajustes mínimos para cumplir las consignas con precisión.

El *setup* montado para lograr el objetivo es el que se muestra en la Figura 3.1. La bomba compresora se instala al lado de un tanque de agua en posición vertical y se alimenta conectándola directamente a la corriente. Se acopla una serie de tubos de 40 mm de diámetro desde el tanque hasta la entrada de agua de la bomba, y unos tubos de 32 mm hasta ambas válvulas. El sistema está diseñado para ser un circuito cerrado, absorbiendo el agua a través de los tubos de 40 mm de diámetro y expulsándola a través de los tubos que conducen hasta las válvulas, lo que permite que el agua circule de manera continua, manteniendo el nivel del tanque estable.

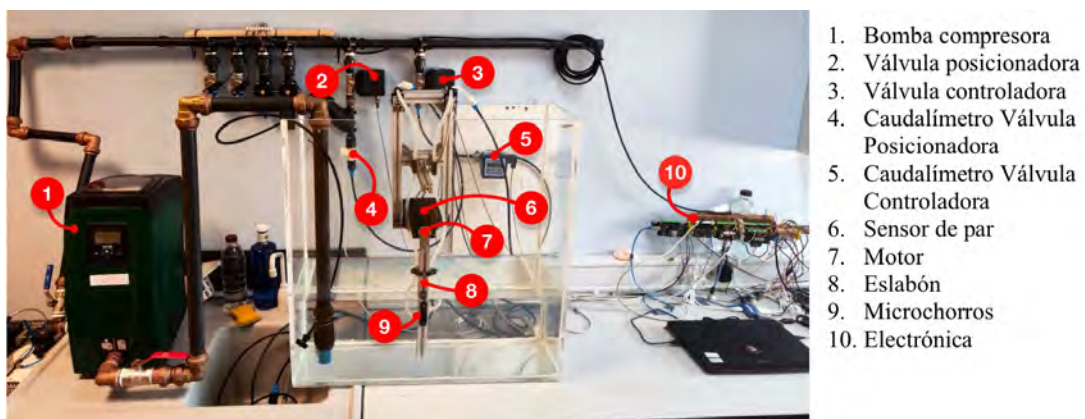
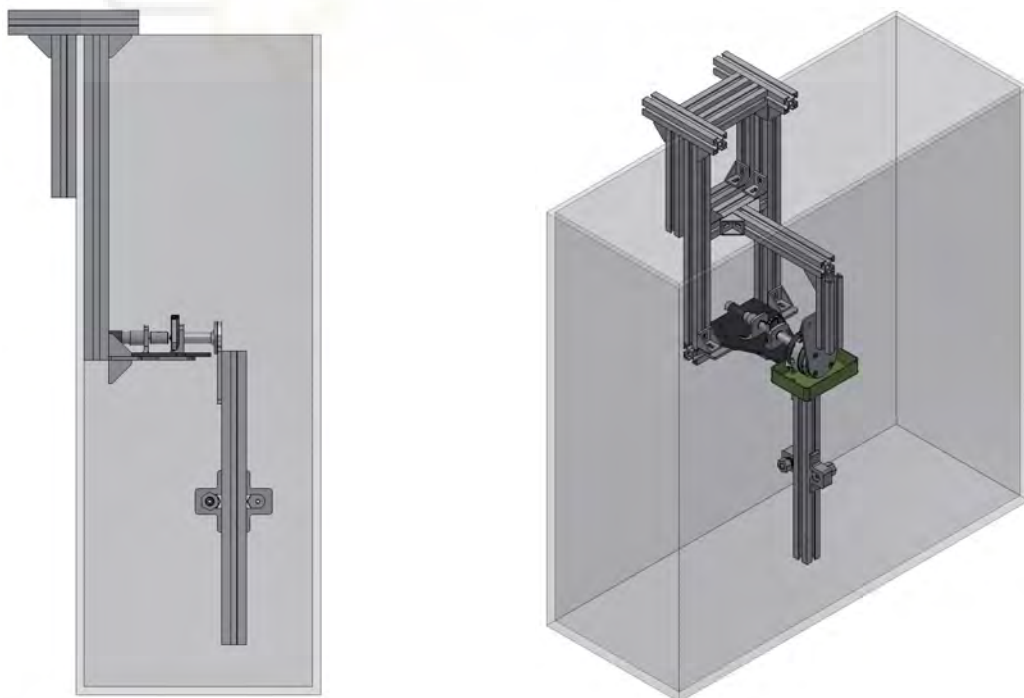


Figura 2.17: *Setup* experimental inicial con los componentes numerados

En este montaje se hará uso de los dos tipos de válvulas que se han descrito previamente, la Válvula Posicionadora para realizar pruebas, y la Válvula Controladora, para ajustar el regulador de la anterior a su medida. Ambas se conectan al final del tubo de 32 mm de diámetro que sale desde la bomba para alimentarla. Se colocan sobre el tanque de agua, lo más cerca posible de las boquillas de los microchorros, con el fin de reducir al mínimo el recorrido del agua. Después de la válvulas, se instala los caudalímetros respectivos, seguidos de un tubo de 6 mm de diámetro que llega finalmente a las boquillas.

La estructura que compone el actuador es la que se muestra en la Figura 2.18. Esta se coloca dejando el eslabón parcialmente sumergido en el agua mientras que el extremo que permanece en la superficie se fija para actuar como eje de giro. En este extremo se el motor, como se observa en la Figura 2.18a, y el sensor de par, como se muestra en la Figura 2.18b. Las boquillas de los microchorros podrán ser colocadas y ajustadas en cualquier posición a lo largo del eslabón pero siempre se encontrarán ambas contrapuestas a la misma altura para poder brindar al eslabón de un movimiento en ambos sentidos de giro.



(a) Vista de perfil del actuador híbrido sin sensor de par

(b) Vista en perspectiva del actuador híbrido con sensor de par

Figura 2.18: CAD del actuador híbrido en distintas posiciones y configuraciones

Las válvulas, los caudalímetros, el sensor de par y el motor son conectados a la electrónica correspondiente.

Para analizar el comportamiento del sistema y conocer qué caudal se debe enviar a la válvula, se hace uso del modelo teórico. El modelo, basado en par que es capaz de generar un microchorro, es el siguiente:

$$\tau_w = \rho_{H_2O} \cdot \frac{\dot{V}^2}{A_w} \cdot r_w \quad (2.1)$$

Donde τ_w es el par generado por el microchorro, ρ_{H_2O} es la densidad del agua, \dot{V} es el caudal, A_w es el área de salida de los micro chorros y r_w es la distancia entre los microchorros y el eje de giro del eslabón.

Para que el *setup* funcione correctamente, será necesario desarrollar una serie de PIDs que logren que las válvulas se comporten según lo esperado. También será necesario integrar todos los elementos del sistema en un único proceso de control y facilitar este control a los usuarios a través de una interfaz. Estas tres etapas se detallan a continuación. Posteriormente se describen las pruebas y se comentan los resultados.

2.6.1. Bucle de control

El funcionamiento interno de cómo se desea que el sistema procese las señales de entrada es el que muestra en la Figura 3.2. Desde la interfaz se pueden generar dos tipos de señales de entrada: par o posición.



Figura 2.19: Esquema del funcionamiento interno del procesamiento de señales de las válvulas

En el caso de que la señal de entrada sea de tipo par, se empleará el modelo teórico para generar una señal de caudal deseado que, posteriormente será enviada a la válvula en forma de señal de apertura y ajustada mediante controlador PID.

Si la señal de entrada es de tipo posición, se calcula un par deseado empleando una función sencilla que atiende únicamente a la gravedad que afecta al eslabón. Dado que esta señal puede contener errores es ajustada con un PID para obtener el par deseado correcto. A partir de este punto, el proceso sigue el mismo flujo que en el caso de una señal de entrada por par.

Como se ha podido observar, serán necesarios varios controladores PID para que las válvulas funcionen de la manera esperada. A continuación se explica brevemente qué es un PID y se detalla cómo se han implementado en control de las válvulas.

2.6.1.1 Definición de PID

El objetivo principal de un PID es mantener una variable de un sistema cerca de un valor deseado ajustando, en este caso, la apertura de la válvula. Las siglas PID se refieren a los tres tipos de cálculo que este controlador realiza para determinar cual será el ajuste necesario: cálculo proporcional, cálculo integral, y cálculo derivativo.

Para obtener la componente proporcional se calcula la diferencia que existe, en el instante de cálculo, entre el valor deseado y el valor actual. A esta diferencia, llamada error proporcional, se le multiplica la constante de ganancia proporcional, cuyo valor

ajusta el programador. La función es la siguiente:

$$P = K_p \cdot e(t) \quad (2.2)$$

Donde K_p es la constante de ganancia proporcional y $e(t)$ el error a lo largo del tiempo.

El componente integral se emplea para corregir el error acumulado a lo largo del tiempo, reduciendo así desviaciones que no han podido ser corregidas con el proporcional. En este caso la constante de ganancia integral se multiplica a la integral del error que se está cometiendo a cada instante para acumularlo. La función es la siguiente:

$$I = K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.3)$$

Donde K_i es la constante de ganancia integral y $e(\tau)$ es el error.

El componente derivativo actúa sobre la velocidad a la que cambia el error, para anticipar el comportamiento de este. Se multiplica la constante de ganancia derivativa por la derivada del error consiguiendo así reducir las oscilaciones y hacer que el sistema sea mucho más estable. La fórmula es la siguiente:

$$D = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (2.4)$$

Donde K_d es la constante de ganancia derivativa y $\frac{de(t)}{dt}$ es la derivada del error.

Finalmente estos tres términos son sumados para definir la salida del PID como:

$$PID = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (2.5)$$

2.6.2. Controladores PIDs de las válvulas

Como ya se ha mencionado previamente, la Válvula Controladora se controla directamente mediante una consigna de caudal, ya que integra un PID interno encargado de regular el grado de apertura de la válvula en función del caudal deseado. Por otro lado, la Válvula Posicionadora carece de un sistema de retroalimentación como el de la Válvula Controladora, por lo que permite controlar el grado de apertura de ésta pero no el caudal de salida. Es por esto que se requiere diseñar un PID que, mediante la lectura de el caudalímetro externo situado a la salida de la válvula, ayude a controlar la apertura de esta según el caudal deseado.

Para poder ajustar este primer PID, se decide tomar como referencia el funcionamiento de la Válvula Controladora, intentando corregir la diferencia en el control de ambas válvulas y asegurando que la Válvula Posicionadora responda de manera similar a la Válvula Controladora frente a las entradas de caudal. En esencia se busca replicar, en cierto modo, el control interno de la Válvula Controladora.

Esto se ha logrado enviando varias entradas de distintos caudales a la Válvula Controladora y recopilando los datos de salida en unas gráficas que se utilizan como referencia. Posteriormente, a la función que define qué voltaje se debe enviar a la válvula según el caudal deseado, se le implementa el PID. Las mismas consignas de entradas que se habían implementado en la Válvula Controladora se aplican ahora a la Válvula Posicionadora y, comparando las gráficas de salida, se ajusta hasta que todas las gráficas tienen el máximo parecido posible.

Posteriormente se desarrollan el PID que amplía las capacidades de control de las válvulas, permitiendo que estas puedan trabajar bajo consignas de posición, transformando esta señal en par.

Para diseñar estos controladores se generan señales de referencia que representan el funcionamiento ideal en diferentes condiciones y tipos de entrada. Estas señales se

utilizan como base para evaluar el comportamiento de las válvulas. Comparando la respuesta de salida con las señales de referencia, se realizan los ajustes necesarios en las constantes de ganancia de los PIDs hasta obtener la respuesta mas ideal posible. Este proceso se lleva a cabo para ambas válvulas de forma individual, asegurando un funcionamiento preciso.

2.6.3. Controladores PIDs del motor

En el caso del motor, se precisa de un controlador PID que determine con precisión la intensidad que debe ser suministrada al motor, ya que es así como está configurada la *ESCON*. Se toma la decisión de tener un control mediante par, con objetivo de mantener un control suave. El control mediante par permite, que se pueda vencer la acción del motor si el paciente hace mas fuerza, evitando forzar movimientos que provoquen dolor.

Cabe recordar que el objetivo principal de este trabajo es validar un funcionamiento híbrido donde los microchorros son el actuador principal. Por esta razón no se puede implementar el PID sobre la actuación total del motor, ya que esto podría provocar que, en caso de que los microchorros cometieran algún error mas grande de lo esperado, o tardaran mas de lo normal en responder, el motor, que es significativamente mas rápido, compensaría la falta de respuesta con una fuerza excesiva. Esto conlleva que los microchorros dejasen de ser el actuador principal, cambiando el equilibrio esperado en el sistema.

Para evitar este cambio en los roles de los actuadores, se limita la acción total del motor a un 20% del par máximo que son capaces de generar los microchorros. Tras implementar este límite al motor, se procede a incorporar el PID en el control siguiendo un método similar a la implemetación de los PIDs en las válvulas. En este proceso, se establece una serie de señales que sirven como referencia, se envía la misma comanda empleada para generar estas señales ideales al sistema completo, empleando tanto los microchorros como el motor. Comparando las señales generadas

con las señales de referencia, se ajusta el PID hasta que el motor sea capaz de reducir el error que cometen los microchorros cuando actuar en solitario.

2.6.4. Integración de los elementos del sistema con ROS

Se necesita trabajar en un entorno que nos permita unificar todos los códigos implementados, ya que, dependiendo las necesidades de la electrónica, se ha empleado un lenguaje de programación u otro. A su vez, también se requiere que se permita ejecutar cada uno de los elementos de control por separado. ROS es la herramienta perfecta para este caso.

ROS (Robot Operating System) es un firmware que proporciona un conjunto de bibliotecas y herramientas diseñadas para ayudar a los programadores a desarrollar el software necesario para robots. El funcionamiento de ROS se basa principalmente en la comunicación entre procesos.

En ROS existen tres elementos clave: los nodos, los tópicos y los servicios:

1. **Nodos:** Son archivos ejecutables que forman parte de un paquete de ROS. En ellos se describen tareas específicas que se desean realizar, y además tienen la capacidad de interactuar con otros nodos. Esto permite la distribución modular de las funciones del sistema.
2. **Tópicos:** Son canales de comunicación (buses) a través de los cuales los nodos pueden intercambiar información. Un nodo puede publicar datos en un tópico o suscribirse para recibir la información de interés. Este mecanismo sigue un modelo de comunicación basado en publicación-suscripción.
3. **Servicios:** Aunque son similares a los nodos, se utilizan en situaciones donde se requiere una respuesta inmediata para ejecutar una acción específica. Los servicios emplean un modelo de comunicación de tipo solicitud-respuesta, lo que los hace ideales para operaciones puntuales que demandan resultados inmediatos.

ROS, de manera simplificada, funciona de la siguiente manera: el software de control de un robot se organiza en una serie de nodos, donde cada uno es encargado de realizar una tarea concreta. Para llevar a cabo estas tareas los nodos necesitarán acceder a la información que otros nodos generan como resultado de sus respectivas tareas. Es en este punto donde entran en juego los tópicos. Cuando un nodo requiere información generada por otro, debe suscribirse al canal de información (tópico) correspondiente, donde el nodo productor publica dicha información.

El funcionamiento general de las comunicaciones en nuestro sistema viene dado por el siguiente esquema de la Figura 2.20. En esta figura se representan los nodos en color gris, las suscripciones a los nodos en rojo y las publicaciones en nodos en amarillo.

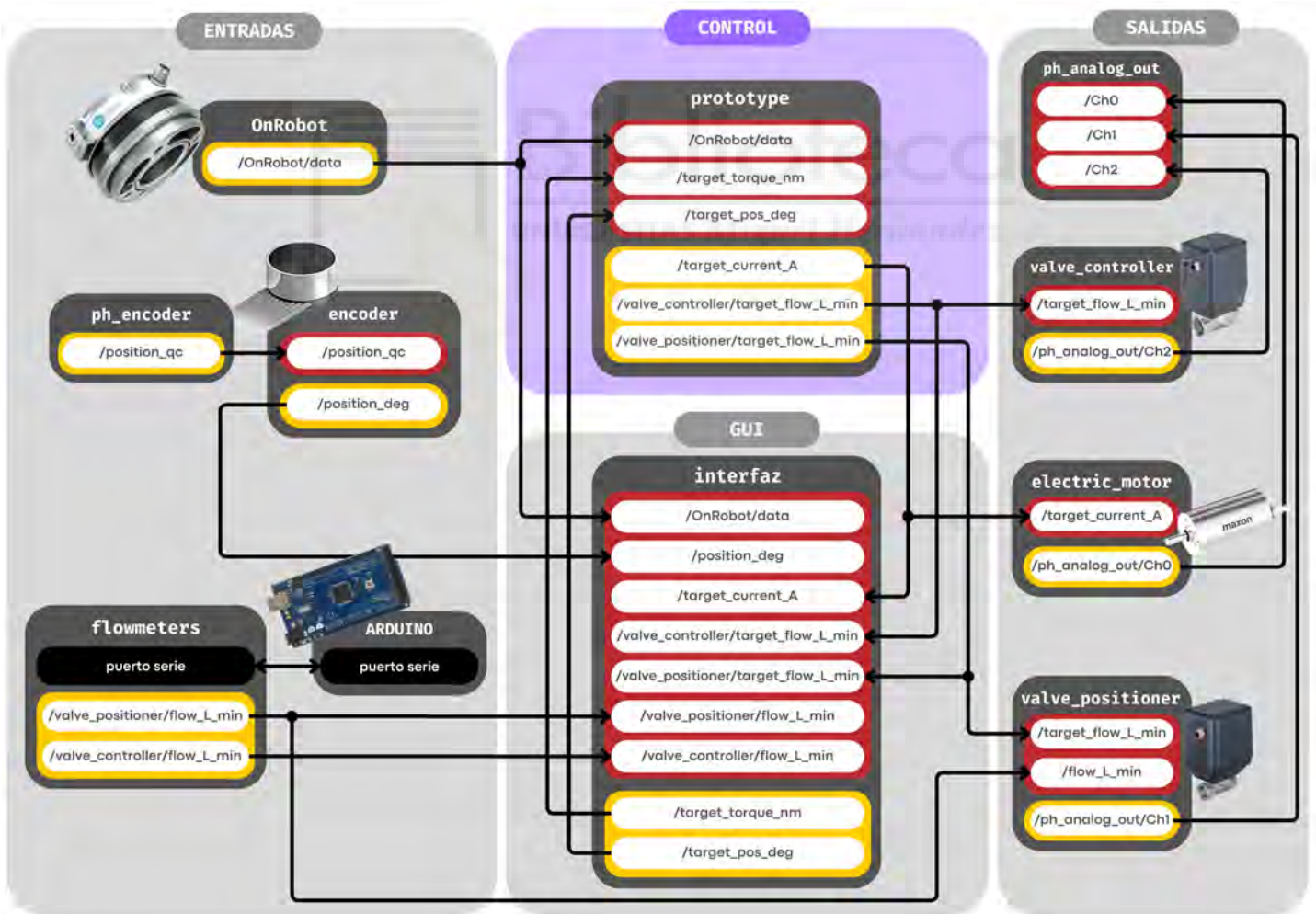


Figura 2.20: Diagrama de la arquitectura software de control y monitorización desarrollada en ROS.

Cabe destacar que el nodo principal de este sistema de control es el nodo *prototype*, en el cual se hacen los cálculos principales para generar un objetivo de apertura de la válvula dependiendo de lo introducido por el usuario en la interfaz. De manera general el funcionamiento es el siguiente: el usuario introduce una comanda en la interfaz, ésta es recibida por el nodo principal donde se realizan los cálculos pertinentes y se genera una serie de señales que se envían al motor y a ambas válvulas según lo que se quiera lograr.

El nodo del OnRobot se usa únicamente durante la toma de datos de par, por lo que durante el modo de funcionamiento por posición está inactivo. Este únicamente se encuentra conectado a la interfaz, para informar del par que se realiza en cada instante al nodo principal, donde se generará una lista de los valores obtenidos.

A continuación se describirá de manera mas detallada el funcionamiento del control de los componentes mas destacados, siendo estos el motor y ambas válvulas.

2.6.4.1 Control de la Válvula Posicionadora

El control de la Válvula Posicionadora se realiza siguiendo el esquema presentado en la Figura 2.21. El proceso comienza en la interfaz, donde antes de poder iniciar el control se debe elegir el modo de funcionamiento: control a través de par deseado o control a través de posición deseada.

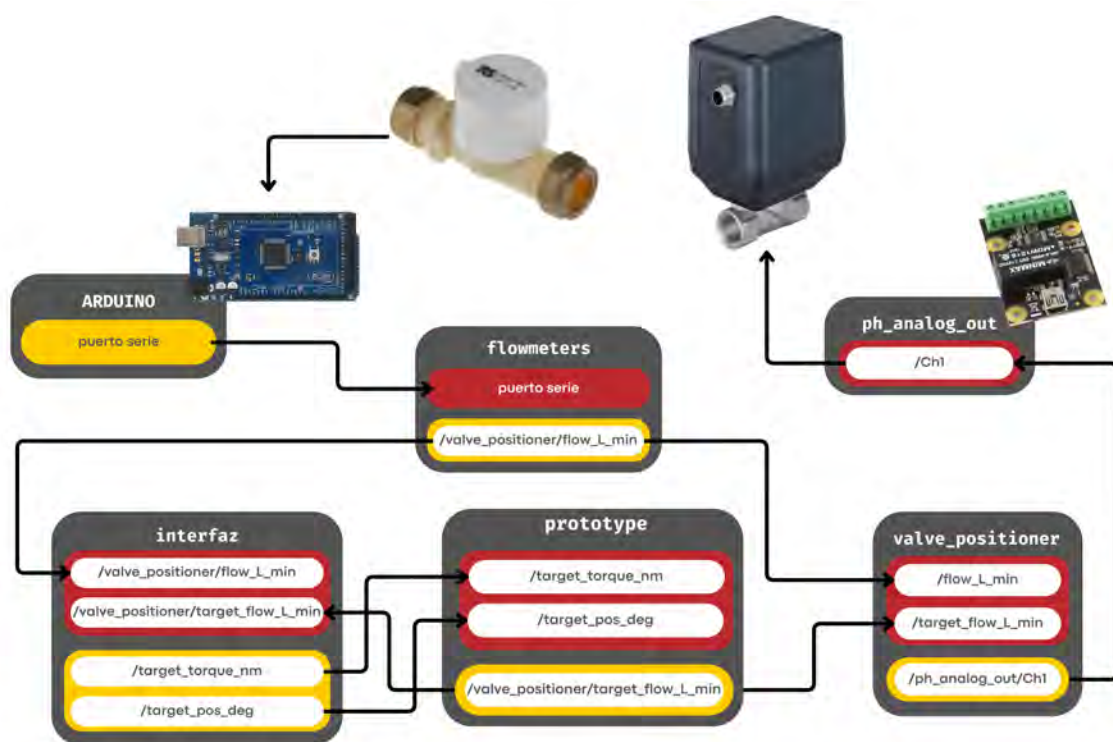


Figura 2.21: Esquema del control de la Válvula Posicionadora

Durante todo el proceso, el caudal que pasa por el sensor es interpretado por este en forma de corriente. Esta información es leída por el Arduino y enviada al nodo *flowmeters* a través de un puerto serie.

El nodo *flowmeters* es el encargado de convertir la intensidad medida en caudal actual que recorre el caudalímetro. Una vez calculado, se publica en el tópico `/valve_positioner/flow.L.min`. A este tópico se suscribe tanto el nodo de la interfaz como el nodo *valve_positioner*.

El nodo de la interfaz muestra el caudal en tiempo real y se encarga, a demás, de generar un par objetivo o una posición objetivo dependiendo del modo de funcionamiento y comanda introducidos por el usuario. Los objetivos son publicados en los tópicos `/target_torque_nm` y `/target_position_deg` respectivamente.

El nodo principal *prototype* se encarga de realizar los cálculos mas importantes. Para

ello, se suscribe a los tópicos */target_torque_nm* y */target_position_deg*, y emplea estos datos para generar el objetivo que tiene que alcanzar la Válvula Posicionadora. Este objetivo es publicado en el tópico */target_flow_L_min* al cual se suscriben tanto el nodo *valve_positioner* como el nodo de la interfaz, que lo muestra por pantalla para informar al usuario.

Finalmente, en el nodo *valve_positioner* se compara el caudal actual y el deseado que recorren la Válvula Posicionadora y gracias al PID que se ha implementado, se genera una señal que se envía al nodo *ph_analog_out* a través del tópico */Ch1*. Una vez llega la información al nodo de la Phidget 1002, se envía a la válvula en forma de tensión para generar una apertura concreta de esta.

2.6.4.2 Control de la Válvula Controladora

El control de la Válvula Controladora, como se puede observar en la Figura 2.22, es bastante parecido al de la Válvula Posicionadora. Como se ha mencionado en apartados anteriores, la Válvula Controladora cuenta con un bucle de control interno capaz de realimentarse del caudalímetro. Este control interno evita que, a diferencia de la otra válvula, sea necesario enviar el caudal actual al nodo *valve_controller* y hace que sea la propia válvula la que proporcione el caudal al *Arduino*. En vez de eso, el nodo principal *prototype* generará directamente un caudal objetivo y esta intentará, por si sola, llegar a este objetivo en el menor tiempo posible.

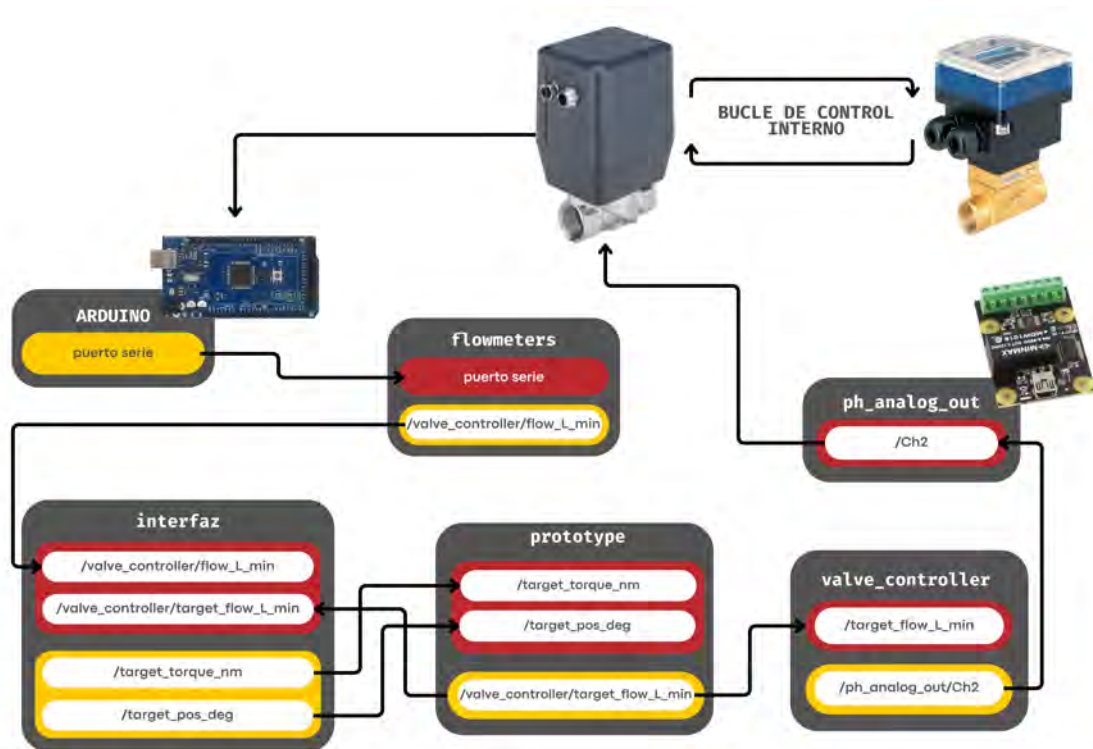


Figura 2.22: Esquema del control de la Válvula Controladora

2.6.4.3 Control del motor

El esquema que se muestra en la Figura 2.23 es el que describe el control del motor. En primer lugar el encoder genera unos pulsos según posición en la que se encuentra el motor y mediante el nodo *ph_encoder* publica dicha posición en el tópic */position_gc*. El nodo del encoder se suscribe a este último tópic y transforma en grados esta información para facilitar, tanto la comprensión como los cálculos.

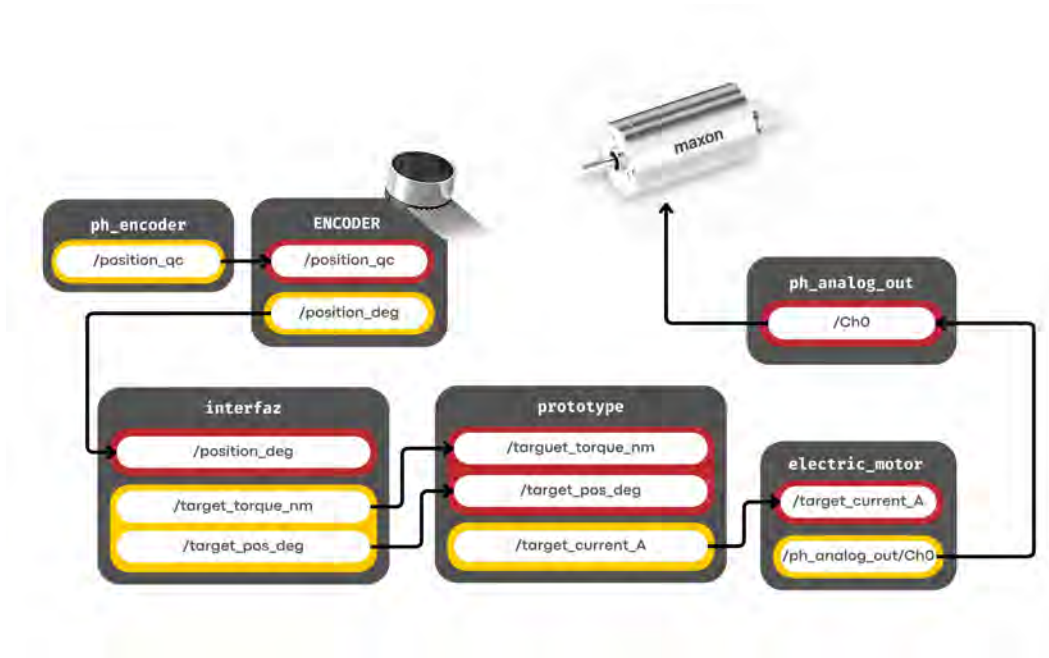


Figura 2.23: Esquema del control del motor de la implementación en ROS

El nodo de la interfaz se suscribe al tópico que contiene la información de los grados del motor para poder mostrar en todo momento en qué posición se encuentra el eslabón. Además como, también pasaba con las válvulas, la interfaz genera un objetivo de par o de posición según lo introducido por el usuario que se publica en los tópicos `/target_torque_nm` y `/target_pos_deg`.

El nodo principal (*PROTOTYPE*) se suscribe a los tópicos que contienen los objetivos definidos por el usuario (`/target_torque_nm`, `/target_pos_nm`) y genera la corriente necesaria para que el motor alcance dichos valores. Esta corriente se envía al nodo *electric_motor*, que genera la señal correspondiente. Finalmente, dicha señal es leída por la Phidget 1002 y transmitida al motor para su ejecución.

2.6.5. Desarrollo de la interfaz de usuario

Se necesitará una herramienta para facilitar a usuarios externos el control del sistema así como para automatizar las pruebas necesarias, acelerando de esta manera el proceso. Por ello, se ha diseñado una interfaz en *Python* que permite interactuar con la arquitectura software de control y monitorización desarrollado en ROS. La parte de la interfaz que ve el usuario se muestra en la Figura 2.24.

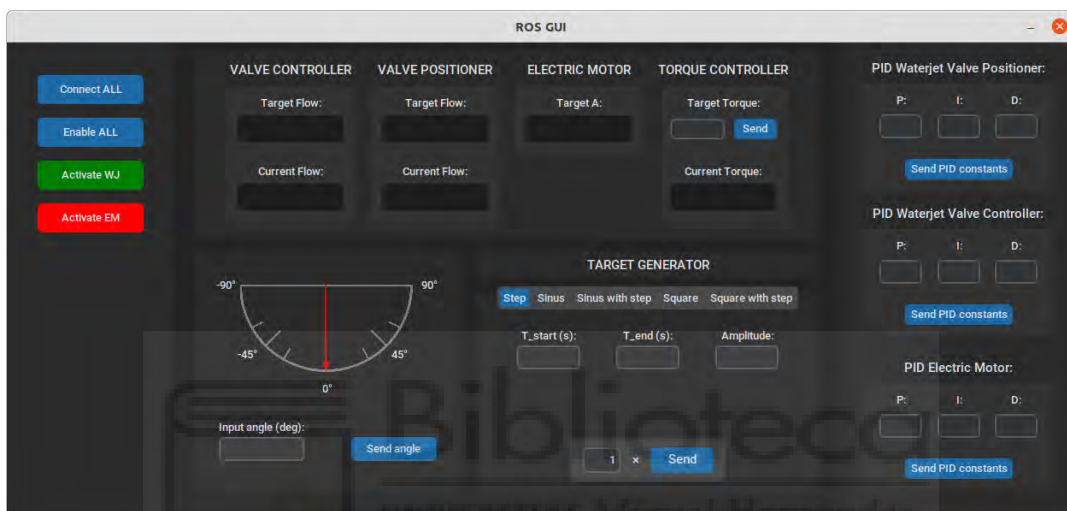


Figura 2.24: Captura de la Interfaz

Para el desarrollo de la interfaz se emplea una librería conocida como *CustomTkinter*, esta es una extensión de *Tkinter*. *Tkinter* es el paquete estándar para el diseño de interfaces gráficas en *Python*, sin embargo, los componentes de este paquete presentan una estética un tanto desactualizada. Para solventar este pequeño inconveniente, se usa *CustomTkinter*, que actúa como una capa de personalización más moderna e intuitiva para el usuario final.

Tanto *CustomTkinter* como *Tkinter* funcionan siguiendo un esquema básico. En primer lugar, se define una ventana principal en la que se especifican propiedades como el tamaño y el estilo. Posteriormente, sobre esta ventana, se añaden diversos componentes interactivos, conocidos como *widgets*. Entre los *widgets* más utilizados, se encuentran los siguientes:

- **Frame.** Elementos visuales diseñados para agrupar y organizar otros *widgets*, contribuyendo a una interfaz más estructurada, estética y fácil de navegar.
- **Labels.** Elementos de texto utilizados para identificar o describir los widgets dentro de la interfaz, facilitando su comprensión y uso.
- **Buttons.** Elementos interactivos diseñados para activar funciones específicas mediante un solo clic. Cada botón estará vinculado a una función definida en Python, de manera que al hacer clic sobre ellos, se ejecutará automáticamente la acción asociada.
- **Entries.** Elementos de entrada que permiten al usuario proporcionar información. Cada cuadro de texto está asociado a una variable, cuyo valor se actualiza automáticamente con la entrada proporcionada cuando se activa un evento específico o desencadenante (trigger).
- **Radio Buton.** Un botón de opciones que permite al usuario una única opción de un grupo predefinido de opciones.
- **Segmented Buttons.** Botones divididos en varios segmentos. Bajo estos botones se implementa un recuadro que va cambiando según cual de los botones haya sido seleccionado.
- **Canvas.** Espacios rectangulares que actúan como un lienzo en blanco para el programador. En ausencia de widgets predeterminados, en este area se podrá programar uno nuevo mediante comandos que definen su apariencia y funciones que establecen su comportamiento.

Estos elementos de *CustomTkinter* son combinados para formar la interfaz que vemos en la Figura 2.23. En esta se pueden diferenciar cinco partes principales, cada una con una función distinta.

En la parte derecha encontramos la zona de inicialización, donde se han implementado cuatro botones. Los dos primeros permiten conectar y habilitar la electrónica, mientras que los dos últimos sirven para activar o desactivar los microchorros y el motor.

Al pulsar el botón Conectar, se muestra la ventana emergente que se encuentra en la Figura 2.25. Esta ventana permite seleccionar entre los dos tipos de comandos que utiliza la maqueta: par deseado (TORQUE) o posición deseada (POSITION). Además, los botones cambian de color en función de su estado: si ocurre algún problema durante su uso, se vuelven rojos; en cambio, si su función se ejecuta correctamente, se mostrarán en verde.

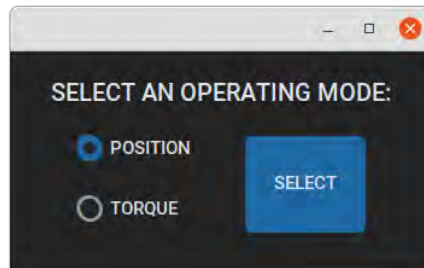


Figura 2.25: Captura de la ventana emergente

En la zona central superior encontramos distintos cuadros de textos en los que se mostrará información clave:

- Para cada una de las válvulas, se muestra el caudal deseado, calculado según el comando enviado, y el caudal real que pasa a través de estas.
- Para el motor, se indica qué intensidad en amperios se está enviando al sistema.

En esta misma sección, se encuentra un apartado que solo estará disponible si, al pulsar el botón de conexión, se selecciona la opción de funcionamiento en modo "TORQUE", es decir, por par. En este apartado, el usuario podrá elegir un par objetivo que la maqueta deberá ejecutar de manera inmediata. Este par se mantendrá activo hasta que se reciba una nueva instrucción que lo reemplace.

En la parte central inferior se encuentran dos apartados. El primero es un display desarrollado con el *widget canvas* que simula la posición exacta del eslabón utilizando la información proporcionada por el encoder. Este display muestra los grados más significativos, lo que facilita al usuario identificar la posición exacta del eslabón. Además, incluye una entrada de texto y un botón a través de los cuales se puede enviar una posición objetivo que la maqueta deberá alcanzar y mantener hasta que se

realice una petición distinta. Cabe destacar que el usuario solo podrá interactuar con este apartado si al realizar la conexión se ha seleccionado el modo de funcionamiento por posición.

El segundo de los apartados, denominado “Target Generator” es crucial para la realización de las pruebas. Este módulo permite generar objetivos que van más allá de una posición o par específicos, ofreciendo una serie de demandas continuas que corresponden a cinco de las entradas típicas en sistemas de control.

Las entradas implementadas hasta la fecha incluyen:

- Escalón
- Seno
- Seno con escalón
- Cuadrática
- Cuadrática con escalón

Al seleccionar una de estas entradas el usuario observará como el recuadro inferior se actualiza para mostrar las constantes necesarias para generar dichas entradas, estas variaciones son las que se muestran en la figura 2.26.

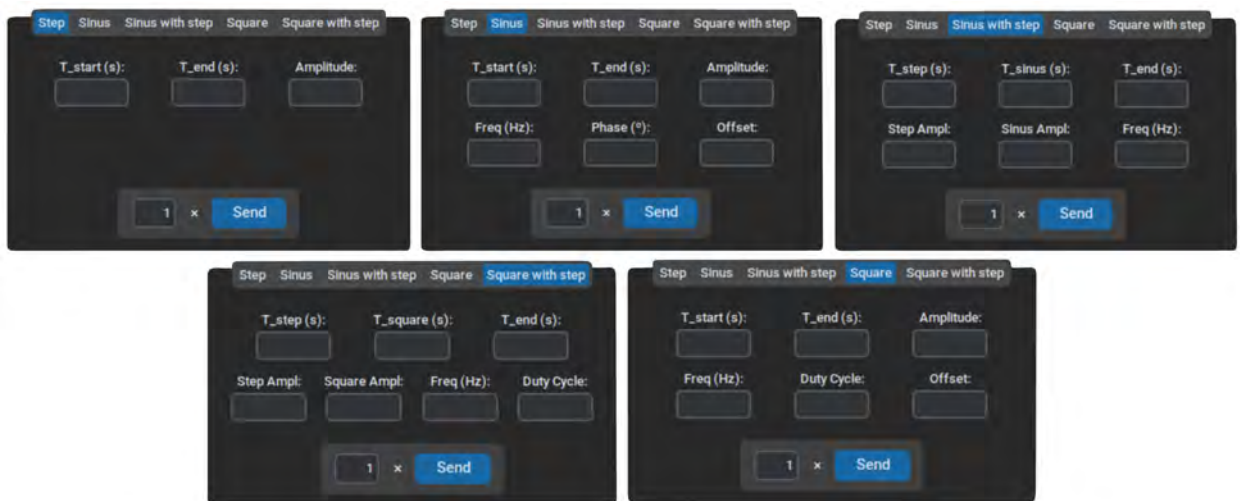


Figura 2.26: Versiones del Target Generator

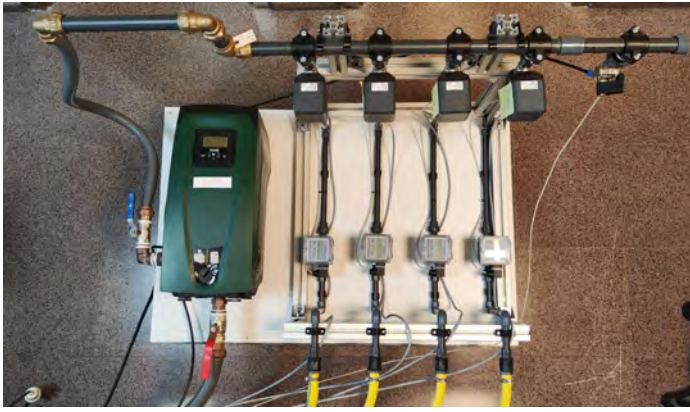
El funcionamiento interno de estos recuadros es el siguiente: el usuario selecciona cual de las cinco entradas desea aplicar. Para enviar una entrada del tipo correspondiente, el usuario deberá rellenar los recuadros con los parámetros necesarios para generarla, tras introducir los datos, el usuario determinará cuantas veces se repetirá esta demanda y pulsará el botón de enviar. Al hacerlo, se activará una función interna que calculará la expresión matemática correspondiente a la señal con los parámetros ingresados. Esta función será utilizada para determinar, en cada instante de tiempo, qué posición o par específicos debe alcanzar el sistema. Cuando llegue al último punto de la señal, volverá a empezar hasta alcanzar el número de repeticiones deseado.

Finalmente, en la parte derecha de la interfaz se ha implementado diversas entradas a través de las cuales se pueden configurar los PIDs que han sido implementados al control de las válvulas y el motor. Esta función, ha sido desarrollada para facilitar la programación de los controladores, evitando tener que acceder al código cada vez que se detecta un comportamiento incorrecto. Estas entradas de texto están vinculadas a las variables internas del código y las sobrescriben cada vez que se solicita. De esta manera, es posible regular y ajustar los PIDs sin que suponga tener que reiniciar el sistema.

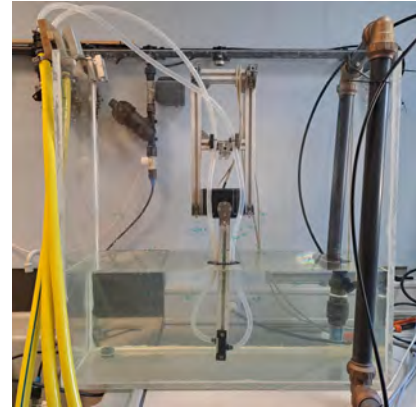
2.7. Segundo *setup*

Debido a la evolución del proyecto NOHA, se decide desarrollar un segundo *setup*. Con este se espera poder realizar más par, y facilitar el control interno de las válvulas. A continuación se detallará la nueva configuración de este sistema.

Para mejorar el rendimiento del sistema, se han implementado dos modificaciones clave: el aumento del diámetro de los tubos y la sustitución de la Válvula Posicionadora por Válvulas Controladoras. Estos cambios buscan optimizar el flujo y simplificar el control del sistema. El resultado de estas modificaciones se muestra en la Figura 2.27.



(a) Parte del *setup* que contiene la bomba y las válvulas.



(b) Parte del *setup* que contiene el eslabón y los microchorros.

Figura 2.27: Segunda configuración experimental

Como se observa en la Figura 2.27a y se menciona anteriormente, en este segundo *setup* se incorporan tres válvulas nuevas y se descarta la Válvula Posicionadora. De este modo, el sistema queda conformado únicamente por Válvulas Controladoras, las cuales son capaces de realimentarse con la información proveniente de los caudalímetros. A pesar de contar ahora con cuatro válvulas, en la experimentación solo se utilizará una de ellas, mientras que las demás se han implementado con visión a futuras líneas de investigación.

Por otro lado, la sección del eslabón y los microchorros que se observa en la Figura 2.27b es prácticamente idéntica a la del primer *setup*, con la diferencia de que se aumenta el diámetro de los tubos. Específicamente, los tubos que conectan el caudalímetro con los microchorros han pasado de 6 mm a 29 mm de diámetro. Se espera que esta modificación permita al sistema aumentar el par máximo que se puede realizar.

Finalmente, la electrónica se reutiliza y en el control se elimina todo aquello que refiere a la Válvula Posicionadora.

3. Resultados y discusión

Durante este TFG se han realizado experimentaciones con dos *setups* diferentes, como se ha mostrado en Materiales y métodos. En esta sección se analizan e interpretan las pruebas realizadas con ambos montajes.

3.1. Resultados experimentales del primer *setup*

Atendiendo a las expectativas del primer *setup*, previamente mencionadas en la sección 2.6, las pruebas y los datos tomados se basan en la verificación del correcto funcionamiento de la Válvula Posicionadora.

En primer lugar, se analiza el comportamiento en el nivel mas bajo del control, es decir, en el par. Para ello, se bloquea el eselabón, se coloca en sensor de par y se envía una serie de consignas de par a través del apartado “Target Generator” de la interfaz. En concreto, se aplica a la entrada del sistema un escalón de 0.35N durante 10 iteraciones, tanto con el modo híbrido activado (válvulas + motor) como utilizando solamente los microchorros.

En la Figura 3.1 la línea discontinua de color gris representa el par que debe alcanzar el sistema. Los resultados de las 10 iteraciones se agrupan, se promedian y se representan en colo rojo para la actuación hibrida y en azul para la actuación mediante propulsión de los microchorros. Además, estas dos últimas líneas se muestran con una sombra que representan los percentiles 25 y 75 de las iteraciones.

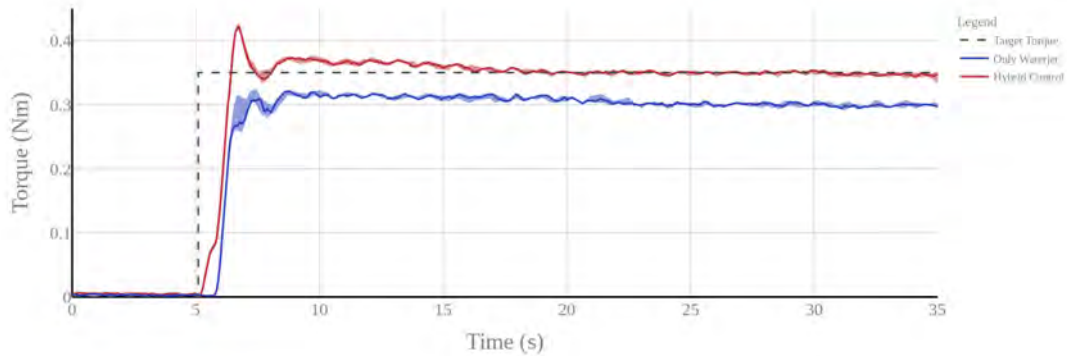


Figura 3.1: Par realizado por la Válvula Posicionadora en función del tiempo ante una entrada escalón

Los datos de la 3.1 muestran como la actuación mediante microchorros no es capaz de alcanzar en ningún momento el par deseado, ya que este queda fuera de su alcance. Sin embargo, al realizar la prueba con la actuación híbrida, se observa cómo el motor ayuda a alcanzar el par deseado de manera más precisa y en menos tiempo. Sin embargo el control híbrido genera una sobreoscilación.

Se realiza otra prueba similar para analizar el comportamiento, esta vez, ante una entrada senoidal con objetivo de analizar si el sistema es capaz de realizar el seguimiento de trayectorias. Esta entrada tendrá una amplitud de 0.2 Nm, una frecuencia de 0.05 Hz, un desfase de 0.3 Nm y una duración de 5 minutos.

En la Figura 3.2 se representa el par deseado con una línea discontinua de color gris, al igual que en la prueba anterior. En este caso, se promedia cada uno de los ciclos realizados para los dos tipos de actuación y se muestran en color rojo y azul junto a sus percentiles, siguiendo el mismo código de color que el empleado en la prueba de escalón.

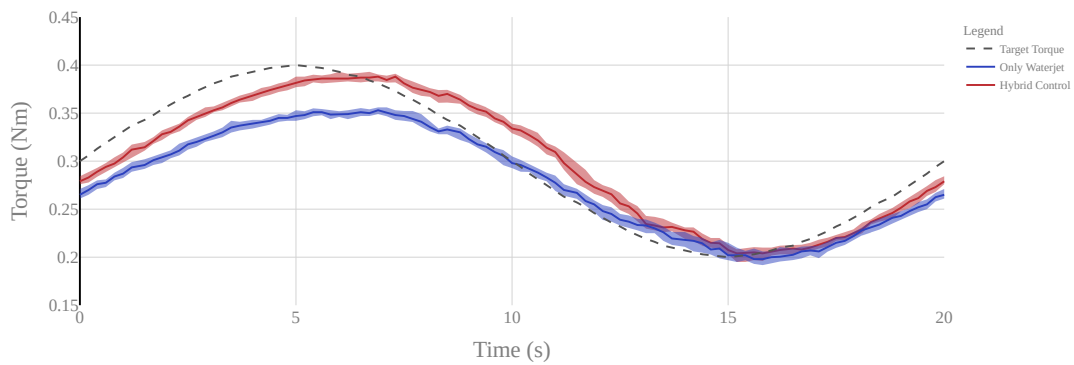


Figura 3.2: Par realizado por la Válvula Posicionadora en función del tiempo ante una entrada senoidal

Los resultados que se observan en la Figura 3.2 muestran como, nuevamente, el control híbrido mejora considerablemente sobre el control mediante microchorros gracias a la aportación del motor, que consigue que se alcance un par mayor y se ajuste mejor a la señal senoidal de referencia.

Tras realizar estas pruebas, se procede a repetir las enviando al sistema una consigna de posición, con el objetivo de verificar que el ajuste del PID que regula la posición es correcto y analizar las diferencias entre el control por posición y el control por par.

Las dos gráficas que se observan a continuación han sido obtenidas de la misma manera que las gráficas de las pruebas anteriores indicando, esta vez, que el control se realizará por posición.

Para el caso de la entrada escalón, se pide que el sistema alcance una posición de 40 grados y para el caso de la entrada senoidal, se pide una posición de entre 45 y 15 grados a una frecuencia de 0.05 Hz durante 5 minutos. Los resultados de estas dos instrucciones están representados en las Figuras 3.3 y 3.4.

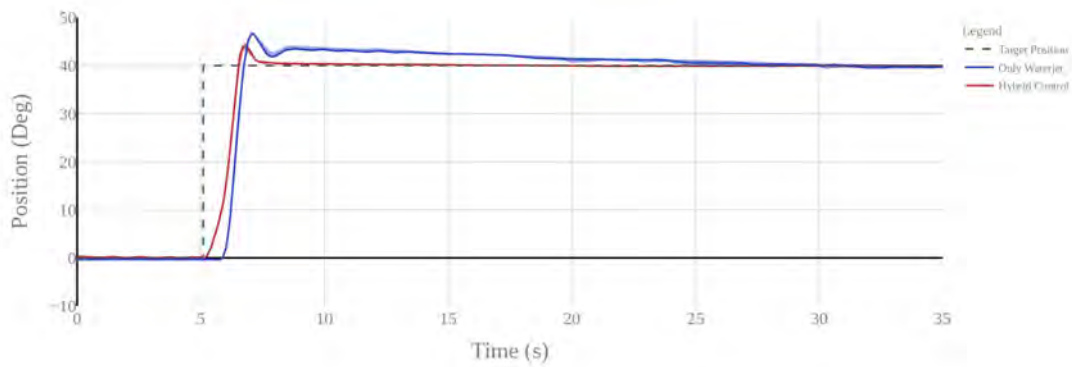


Figura 3.3: Posición alcanzada por el eslabón en función del tiempo ante una entrada escalón

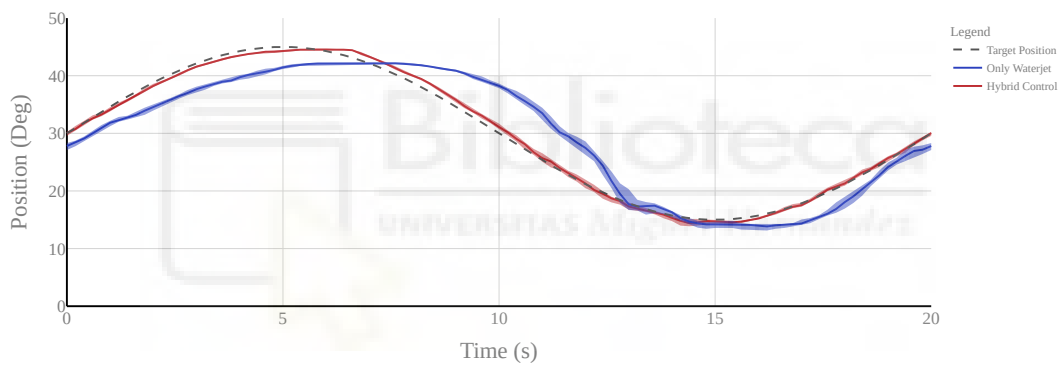


Figura 3.4: Posición alcanzada por el eslabón en función del tiempo ante una entrada seno

Al comparar las gráficas de par (Figuras 3.1 y 3.2) con las de posición (Figuras 3.3 y 3.4), podemos afirmar que estas últimas consiguen ajustarse mucho mejor a la señal de referencia. Esto se debe a que se ha conseguido que los PIDs que se han incorporado, mejoren considerablemente el control y la precisión del sistema.

Finalmente se realiza una última prueba en la que se pretende cuantificar el error que se comete al emplear el modelo teórico, con objetivo de validarlo. Para ello, con el sensor de par activo se envía al sistema directamente diversos valores de caudal y se cuantifica que par se hace con este caudal. De esta manera se puede comparar la

relación teórica entre el par y el caudal que debería hacerse según el modelo teórico y la relación real. Estas relaciones vienen descritas en la Figura 3.5.

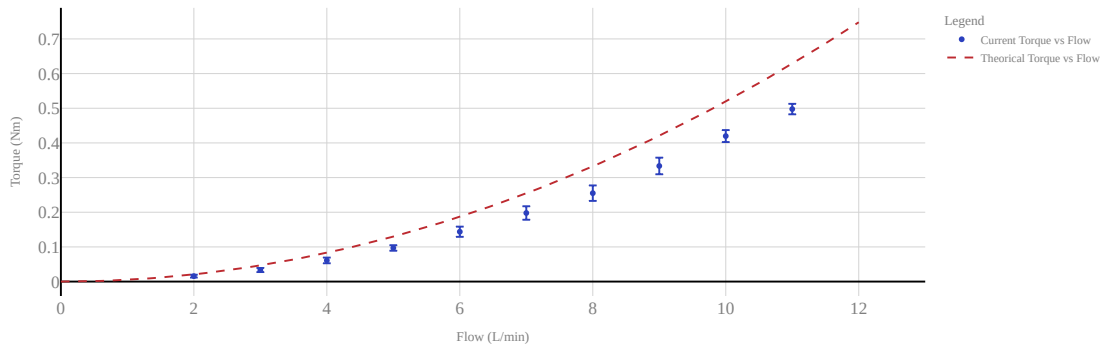


Figura 3.5: Par realizado por el sistema según la señal de caudal introducida

En esta figura se muestra el par teórico con una línea discontinua de color rojo y el par real en puntos de color azul que agrupan distintos valores para una misma consigna de caudal.

Al analizar esta última prueba, se observa que existe bastante diferencia entre el valor teórico que debería estar realizando según el modelo teórico y el valor real. Esto es un indicador de que el modelo teórico puede estar mal planteado y esté implementando errores en el sistema.

Llegamos a la conclusión que debemos hacer nuevas pruebas introduciendo el segundo *setup* con un nuevo modelo teórico que se ajuste al movimiento real que sigue el sistema.

3.2. Resultados experimentales del segundo *setup*

En esta segunda fase de experimentación, se han llevado a cabo pruebas similares a las de la primera, con el objetivo de compararlas y evaluar las mejoras entre ambos

sistemas

Antes de proceder a realizar las pruebas, se requiere reajustar el modelo teórico, ya que como se vé en los resultados de la Figura 3.5, se detecta que el modelo teórico utilizado no modela suficientemente bien el comportamiento del sistema. Finalmente, se concluye que el primer modelo teórico describía el par que realizaba el eslabón según la propulsión de los microchorros, pero no tenía en cuenta el arrastre del agua, es decir, se calculaba como si el eslabón se encontrara fuera del agua en vez de sumergido.

Por esta razón, al modelo con el que contábamos antes, se le añade esta resistencia que ofrece el agua para crear una nueva ecuación que relacione el caudal con el par. Esta nuevo modelo es el que se describe en la ecuación 3.1.

$$\tau_w = \rho_{H_2O} \cdot \frac{\dot{V}^2}{A_w} \cdot r_w \cdot \left(1 - \frac{C_d}{2}\right) \quad (3.1)$$

Donde τ_w es el par generado por el microchorro, ρ_{H_2O} es la densidad del agua, \dot{V} es el caudal, A_w es el área de salida de los microchorros, r_w es la distancia entre los microchorros y el eje de giro del eslabón, y C_d es el coeficiente de resistencia del medio externo.

Al implementar este nuevo coeficiente surge una nueva problemática: su cálculo teórico es considerablemente complejo. Por ello, se opta por determinar su valor de manera empírica.

Siguiendo el mismo procedimiento utilizado en el primer *setup*, se recopilan de nuevo una serie de valores de par para distintas entradas de caudal. Posteriormente, mediante un ajuste de mínimos cuadrados, se obtiene una función, que al compararse con el nuevo modelo teórico, permite determinar el valor del coeficiente de resistencia del medio externo.

Tras el ajuste del modelo se procede a realizar las pruebas. En esta ocasión, se ha decidido extender significativamente la duración de las estas, ya que se busca simular movimientos lentos y suaves. Esta extensión en el tiempo se ve reflejada tanto en la duración del escalón como en el periodo de la senoidal.

La primera prueba es análoga a la realizada en el primer sistema, en la que se analiza la respuesta de par ante una entrada escalón. En esta ocasión, se exige un mayor par al sistema aplicando esta vez, una entrada escalón de 1 Nm. Los datos que se muestran en la Figura 3.6 se obtienen siguiendo el mismo procedimiento empleado en el primer *setup*.

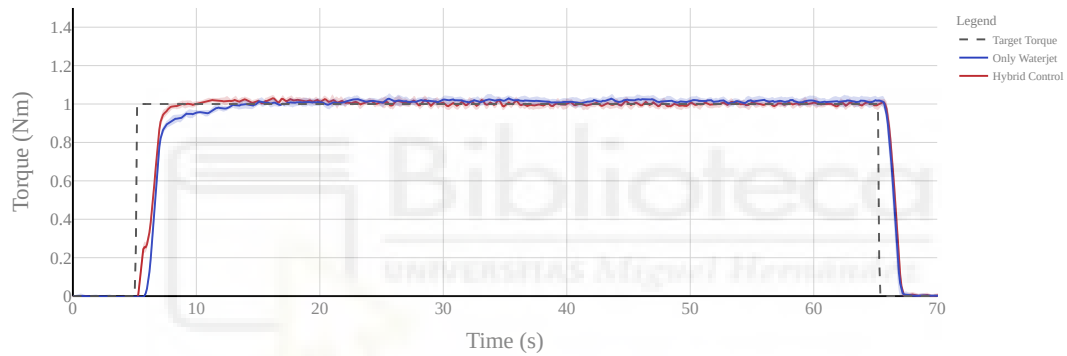


Figura 3.6: Par realizado por el sistema en función del tiempo ante una entrada escalón

Se repite nuevamente la prueba ante una entrada senoidal, esta vez con una amplitud de 1 Nm y un periodo de 0.17 Hz. Se muestran los resultados en la Figura 3.2.

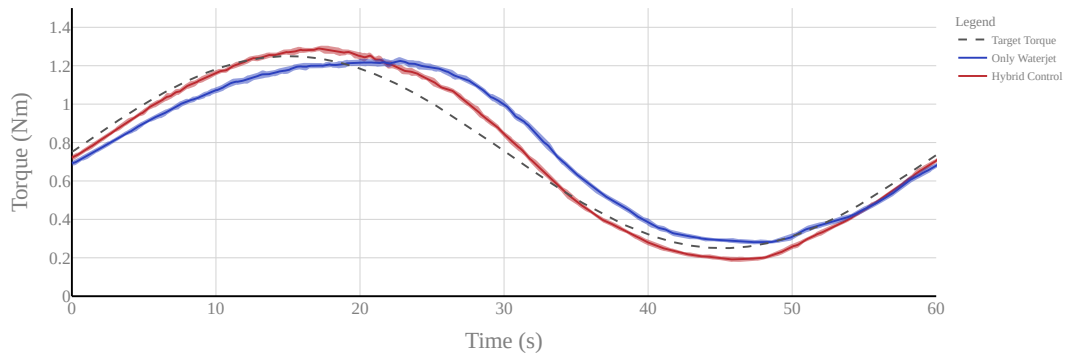


Figura 3.7: Par realizado por el sistema en función del tiempo ante una entrada senoidal

Con los mismos valores empleados para realizar la gráfica anterior y sabiendo cual es la aportación exacta del motor en el sistema, se logra crear la Figura 3.8. En esta, las barras azules representan la aportación al par final por parte de los microchorros y las verdes y rojas muestran la aportación al par por parte del motor en positivo y negativo respectivamente. Por último, la recta negra representa cual es el par actual que se está realizando.

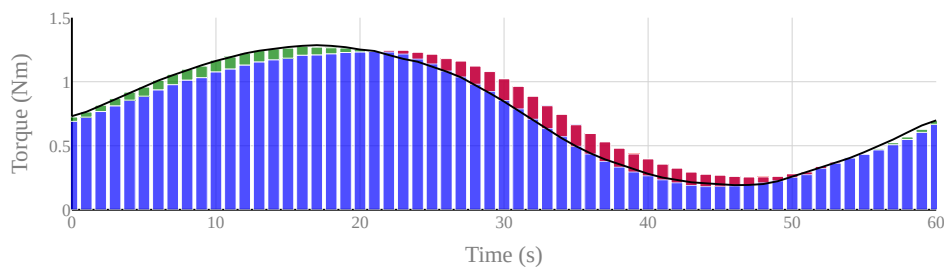


Figura 3.8: Par realizado por el sistema según la señal de caudal introducida

Gracias a esta gráfica podemos observar cual es la aportación del motor al sistema y en qué momentos exactos su actuación es clave para lograr un funcionamiento mucho mas exacto.

Al analizar estas tres gráficas (Figuras 3.6, 3.7 y 3.8), se determina que, frente a las pruebas de par realizadas con el primer *setup* con la Válvula Posicionadora (Figuras 3.1 y 3.2), se consigue una mejora considerable en cuanto a precisión y cantidad de par. En la prueba de entrada escalón, se ha logrado eliminar la sobreoscilación y se alcanza el valor deseado en menor tiempo. En el caso de la prueba de entrada senoidal, la curva es mucho mas parecida a la teórica que en la primera experimentación.

Por último, se repite la prueba con la que en el montaje inicial se pretende validar el modelo teórico (Figura 3.9). En esta podemos observar el par que el sistema es capaz de realizar dependiendo del caudal junto a la curva que viene definida por el nuevo modelo teórico.

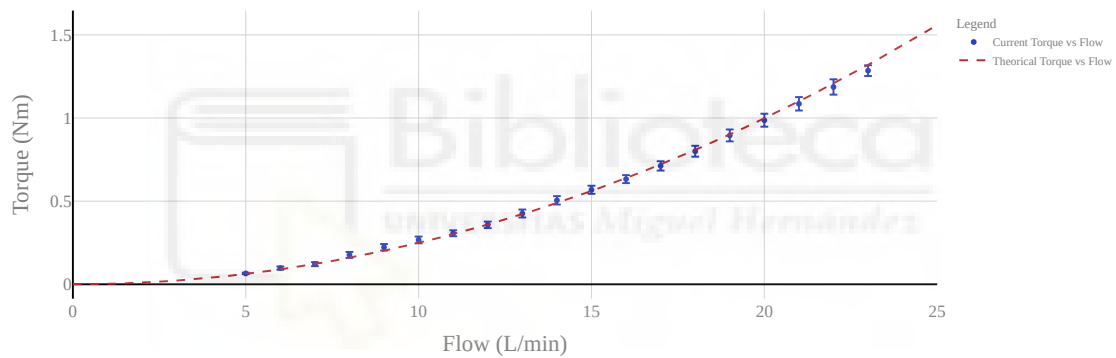


Figura 3.9: Par realizado por el sistema según la señal de caudal introducida

Esta última prueba confirma que el nuevo modelo teórico se ajusta con mayor precisión a la realidad.

4. Conclusiones

Atendiendo a los objetivos que se han definido en la sección 1.2, podemos decir que este Trabajo de Fin de Grado cumple con las metas establecidas.

Se ha logrado crear dos maquetas mediante las cuales se ha conseguido controlar una primera versión del actuador híbrido de manera precisa y considerablemente sencilla.

Además, gracias a ambos *setups* se ha logrado demostrar cómo el actuador híbrido combina las ventajas de la actuación mediante microchorros y un motor eléctrico, creando un sistema suave y preciso que aprovecha las cualidades del medio acuático.

Como aspecto adicional, durante la primera experimentación, se ha logrado identificar fallos, como la elección de la Válvula Posicionadora, que afectaba a la precisión del sistema, y el uso de tubos de menor diámetro, que limitaban el par máximo alcanzable.

5. Trabajos futuros

En las líneas futuras del proyecto NOHA se espera investigar 3 puntos claves que no se han visto durante la realización de este TFG.

En primer lugar se planteará realizar pruebas de posición usando el último *setup* de la misma manera que se hizo con la Válvula Posicionadora con objetivo de comprobar que el PID del control de la posición se ha implementado correctamente.

En segundo lugar se busca alcanzar un par mayor puesto que, a pesar de haber conseguido realizar más par con el segundo montaje, este sigue siendo insuficiente si se pretende asistir el movimiento de un paciente.

Por último se planteará la idea de convertir el sistema en uno que cuente con dos grados de libertad, abriendo una nueva línea de investigación que incluirá enfoques nuevos tipos de control. Entre estas nuevas posibilidades se contempla el control diferencial, en el cual se explorará la posibilidad de mantener ambos microchorros activos y cerrar, de manera progresiva, aquellos ubicados en el lado hacia el que se desea mover el eslabón.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Population Prospects 2022: Summary of Results*. Inf. téc. 2022.
- [2] S. Pereira et al. «Rehabilitation of individuals with severe stroke: Synthesis of best evidence and challenges in implementation». En: *Topics in Stroke Rehabilitation* 19.2 (2012), págs. 122-131. DOI: 10.1310/tsr1902-122.
- [3] J. M. Veerbeek et al. «Effects of Robot-Assisted Therapy for the Upper Limb After Stroke». En: *Neurorehabilitation and Neural Repair* 31.2 (feb. de 2017), págs. 107-121. DOI: 10.1177/1545968316666957.
- [4] N. Kesiktas et al. «The use of hydrotherapy for the management of spasticity». En: *Neurorehabilitation and Neural Repair* 18.4 (2004), págs. 268-273.
- [5] P. Maciejasz et al. «A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation». En: *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 11 (2014), pág. 3. DOI: 10.1186/1743-0003-11-3.
- [6] M.A.M. Dzahir y S.-I. Yamamoto. «Recent Trends in Lower-Limb Robotic Rehabilitation Orthosis: Control Scheme and Strategy for Pneumatic Muscle Actuated Gait Trainers». En: *Robotics* 3 (2014), págs. 120-148. DOI: 10.3390/robotics3030120.