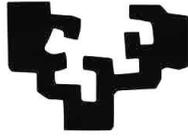


eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

TRABAJO DE FIN DE GRADO:

DESARROLLO DE UN
COMPENSADOR PI DIFUSO PARA EL
CONTROL EN EL SECTOR
AERONÁUTICO

Escuela de ingeniería de Vitoria

Presentado por:

Martzel Ugena Uriarte

Dirigida por:

Óscar Barambones Camaraza

Javier Velasco Pascual

Vitoria-Gasteiz, mayo de 2023

Contenido

ABSTRACT.....	5
INTRODUCCIÓN.....	5
CTA.....	6
INTRODUCCIÓN DE LA EMPRESA.....	6
CTA MIÑANO Y CTA ZAMUDIO	7
ACTIVIDADES DE CTA.....	8
Calidad.....	8
Ensayos estructurales.....	9
Ensayos de sistemas.....	9
Ensayos espaciales.....	10
Ensayos de fuego.....	11
Monitorización.....	11
Consultoría aeronáutica.....	11
CONTEXTO DEL PROYECTO.....	12
ESTADO DEL ARTE.....	12
CONTROL EN LAZO CERRADO.....	12
ESTRATEGIAS DE CONTROL INTELIGENTE.....	15
OBJETIVOS	22
LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO.....	24
DESCRIPCIÓN DEL BANCO	24
MOTOR.....	24
ACOPLAMIENTOS ELÁSTICOS.....	25
SISTEMA DE POLEAS	26
FRENO MAGNÉTICO.....	26
JUNTA CARDÁN.....	26
TORQUÍMETRO.....	26
HUSILLO	27
DESARROLLO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL AVANZADO.....	28
SISTEMA DE CONTROL PID.....	29
LAZO ABIERTO.....	30
COMPENSADOR PI.....	30
COMPENSADOR PI DIFUSO (UNA ENTRADA).....	31

COMPENSADOR PI DIFUSO (UNA ENTRADA).....	31
COMPENSADOR PI DIFUSO (DOS ENTRADAS).....	35
SIMULACIÓN MEDIANTE SIMULINK.....	38
MODELO DEL BANCO EN SIMULINK	38
ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS	43
INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL.....	45
INTEGRACIÓN DEL SISTEMA PID.....	45
RESULTADOS.....	50
LAZO ABIERTO.....	50
COMPENSADOR PI.....	52
25-2,5	52
130-15.....	54
90-10.....	56
COMPENSADOR PI DIFUSO (1 ENTRADA).....	58
COMPENSADOR PI DIFUSO (2 ENTRADAS).....	61
RELACIÓN 80-20.....	61
PESO DEL 50%.....	¡Error! Marcador no definido.
RESULTADOS COMPLETOS.....	67
CONCLUSIONES.....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	70

Tabla de ilustraciones

I-CTA Zamudio.....	6
II-CTA Miñano.....	7
III-Ensayo de fuegos.....	8
IV-Sala de control de CTA.....	9
V-Ensayo estructural.....	9
VI-Airbus A340.....	10
VII-Ensayo espacial	11
VIII-Diagrama de bloques de un control en lazo cerrado.....	13
IX-Esquema de control PID	14
X-Función de pertenencia	17
XI-Diferencia entre la lógica clásica y la lógica difusa.....	17
XII-Esquema de un controlador de lógica difusa.....	18

XIII-Estructura Mandami	19
XIV-Fuzzificación y defuzzificación Mandami.....	19
XV-Bloque del controlador difuso en LabView	20
XVI-Modelo neuronal.....	21
XVII-Demostrador 1.....	24
XVIII-Motor Festo EMMS-AS-100-S-HS-RMB.....	25
XIX-Acoplamiento de fuelle.....	25
XX-Acoplamiento de estrella.....	25
XXI-Junta cardán.....	26
XXII-Lorenz DR-2112-R-P.....	27
XXIII-Consigna.....	29
XXIV-Controlador PID.....	29
XXV-Esquema de control en lazo abierto.....	30
XXVI-Esquema del compensador PI.....	31
XXVII-Sistema difuso que controla el componente proporcional.....	32
XXVIII-Sistema difuso que controla el componente integral.....	33
XXIX-Representación de la relación entre el error y la salida proporcional.....	33
XXX-Representación de la relación entre el error y la salida integral.....	33
XXXI-Esquema del compensador PI difuso de una entrada.....	35
XXXII-Sistema difuso que controla el componente proporcional.....	35
XXXIII-Sistema difuso que controla el componente integral.....	36
XXXIV-representación de la relación entre el consumo y el componente proporcional.....	36
XXXV-Representación de la relación entre el consumo y el componente integral.....	36
XXXVI-Esquema del controlador PI difuso de dos entradas.....	37
XXXVII-Sistema motor+unión.....	39
XXXVIII-Entrada del sistema (par).....	39
XXXIX-Parámetros eje 1.....	39
XL-Parámetros eje 2.....	40
XLI-Sistema motor+unión+polea.....	41
XLII-Parámetros eje 1.....	41
XLIII-Parámetros eje 2.....	42
XLIV-parámetros eje 3.....	42
XLV-Bloques del husillo.....	42
XLVI-Modelo completo con controlador PID.....	46
XLVII-Entrada del sistema (mm).....	46
XLVIII-Respuesta del sistema con componente derivative (mm).....	47
XLIX-Respuesta del sistema con valor de componente proporcional de 0,1 (mm).....	47
L-Respuesta+consigna.....	48
LI-Error de posición (mm).....	48
LII-Respuesta del sistema con $K_p=20$ y $K_i=2,5$	48
LIII-Respuesta+consigna.....	49
LIV-Error de posición (mm).....	49

LV-Consumo en lazo abierto	50
LVI-Posición en lazo abierto	51
LVII-Error de posición en lazo abierto.....	51
LVIII-Velocidad de giro en lazo abierto.....	51
LIX-Consumo con compensador PI.....	52
LX-Posición con compensador PI.....	53
LXI-Error de posición con compensador PI.....	53
LXII-Velocidad de giro con compensador PI.....	53
LXIII-Consumo con compensador PI	54
LXIV-Posición con compensador PI.....	55
LXV-Error de posición con compensador PI.....	55
LXVI-Velocidad de giro con compensador PI.....	56
LXVII-Consumo con compensador PI.....	57
LXVIII-Posición con compensador PI.....	57
LXIX-Error de posición con compensador PI	57
LXX-Velocidad con compensador PI.....	58
LXXI-Consumo con compensador difuso (1 entrada).....	59
LXXII-Posición con compensador difuso (1 entrada).....	59
LXXIII-Error de posición con compensador difuso (1 entrada).....	59
LXXIV-Velocidad de giro con compensador difuso (1 entrada).....	60
LXXV-Componente proporcional con compensador difuso (1 entrada).....	60
LXXVI-Componente integral con compensador difuso (1 entrada).....	60
LXXVII-Consumo con compensador difuso (2 entradas).....	62
LXXVIII-Posición con compensador difuso (2 entradas)	62
LXXIX-Error de posición con compensador difuso (2 entradas).....	62
LXXX-Componente proporcional con compensador difuso (2 entradas).....	63
LXXXI-Componente integral con compensador difuso (2 entradas).....	63
LXXXII-Consumo con compensador difuso.....	64
LXXXIII-Posición con compensador difuso	65
LXXXIV-Error de posición con compensador difuso.....	65
LXXXV-Velocidad con compensador difuso	65
LXXXVI-Componente proporcional con compensador difuso.....	66
LXXXVII-Componente integral con compensador difuso.....	66
LXXXVIII-Comparativa entre el error de posición simulado y el real	68

ABSTRACT

En el ámbito de la industria aeronáutica, el sistema de control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) es el sistema de control más ampliamente utilizado. De hecho, se estima que el PID es seleccionado como sistema de control en aproximadamente el 95% de los casos en los que se hace uso de un sistema de control en lazo cerrado.

Sin embargo, a pesar de esto, el sistema PID cuenta con ciertas limitaciones que pueden afectar su desempeño en ciertos escenarios. Por lo tanto, en este proyecto se ha llevado a cabo un desarrollo orientado a mejorar y superar las carencias del sistema PID, analizando los aspectos positivos y negativos de este para contar con una sólida base a mejorar.

En primer lugar, se ha observado que la precisión del control PID puede ser mejorada en ciertos contextos, como es el caso de los sistemas no lineales, que se tratará en este documento.

En segundo lugar, se ha detectado que el sistema PID puede ser ineficiente en términos de consumo de energía. Dado que la aeronáutica es un sector que valora la eficiencia y la optimización de recursos, la reducción del consumo energético es una prioridad. Es fundamental desarrollar un sistema de control que permita mantener altos niveles de rendimiento y precisión, al mismo tiempo que se minimiza el gasto energético. Conociendo esto, en este proyecto se ha desarrollado un sistema de control que, partiendo del control PID y analizando los resultados que este ofrece, trata de suplir las carencias y potencia aspectos que el sistema PID es menos útil. Los dos aspectos a mejorar han sido la precisión del control PID y la poca eficiencia de este, que, como se analizará a continuación, consume mucha energía.

INTRODUCCIÓN

En este proyecto, se ha abordado el desafío de mejorar la precisión y eficiencia del sistema de control a través de diferentes enfoques y estrategias de control avanzado. El objetivo final es desarrollar un sistema de control que supere las limitaciones del PID y ofrezca un desempeño superior en términos de precisión y eficiencia energética.

Para esto, en este documento, primero se ha analizado el estado del arte, para conocer los sistemas de control más habituales en el sector. Después, se ha definido el demostrador sobre el que se va a desarrollar el sistema de control. Una vez definida la localización del proyecto, se presenta el desarrollo de la estrategia de control avanzado que se ha llevado a cabo, describiendo los sistemas de control que sirven como base para después definir las estrategias de control avanzado con las que se llevarán a cabo las pruebas en el demostrador. Por otro lado, se han descrito el modelo hecho en Simulink que simula las condiciones del demostrador. Una vez analizado el comportamiento teórico del demostrador mediante pruebas simuladas, se ha dado paso a las pruebas reales. Para esto se describen las pruebas realizadas y se muestran los resultados obtenidos. Por último, se valoran los resultados obtenidos.

CTA

INTRODUCCIÓN DE LA EMPRESA

La información se ha obtenido de [1] y las imágenes se han obtenido de [2].

El Centro de Tecnologías Aeronáuticas (CTA) es una institución creada como una fundación sin ánimo de lucro en 1997, gracias a la iniciativa conjunta de entidades privadas y públicas. Su patronato está formado por representantes de las tres empresas que la fundaron, ITP, Sener y Aernnova, por representantes de las administraciones públicas, incluyendo el Gobierno Vasco, la diputación Foral de Álava y la Diputación Foral de Vizcaya y por representantes de pequeñas y medianas empresas (PYMES).

El CTA se creó con la misión de fomentar y desarrollar actividades tecnológicas e investigaciones científicas con interés en el sector aeronáutico y espacial. Sus principios se basan en la excelencia empresarial, la generación de conocimiento y la promoción de la tecnología.



I-CTA Zamudio

Como parte de la Red de Tecnología Vasca, el CTA se especializa en ensayos de desarrollo y certificación de componentes y productos aeronáuticos, aunque las actividades llevadas a cabo por la fundación incluyen también la investigación fundamental y aplicada, el desarrollo experimental en los sectores aeronáutico y espacial, divulgando los resultados conseguidos mediante estas actividades a través de la enseñanza, las publicaciones y la transferencia de tecnología. Además de esto,

El amplio abanico de actividades desarrolladas por la fundación incluye la investigación aplicada fundamental, el desarrollo experimental en los sectores aeronáutico y espacial, y la difusión de resultados a través de la docencia, las publicaciones y la transferencia de tecnología.

El CTA desempeña un papel fundamental para ayudar a desarrollar y asegurar áreas como la mecánica (estructuras, sistemas y vibraciones), la reacción al fuego, la fluidodinámica y la acústica. Asimismo, desarrolla actividades de vigilancia tecnológica, actualización y asistencia técnica, desarrollo y explotación de nuevas tecnologías, formación, difusión y transferencia de tecnología y promoción de empresas de base tecnológica en los ámbitos aeronáutico y espacial.

En cuanto a las áreas de actuación, el CTA se orienta principalmente a tecnologías de ensayo, servicios aeronáuticos y actividades de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i).

En el ámbito de los ensayos, el centro tiene una gran capacidad para realizar pruebas de carga, presión, desplazamiento y combinación en condiciones ambientales específicas. Gracias a su flexibilidad, pequeño tamaño e implicación y experiencia de su equipo, el CTA se consolida como centro de ensayo de referencia para las principales compañías aeronáuticas. Dentro de los servicios aeronáuticos que ofrece, se destacan el asesoramiento técnico, la certificación y cumplimiento de normativas, la formación en diversas áreas de la aeronáutica y la transferencia de tecnología. El CTA se ha convertido en un punto de referencia para las empresas del sector, brindando apoyo técnico y promoviendo la adopción de tecnologías de vanguardia.

En resumen, el Centro de Tecnologías Aeronáuticas (CTA) se ha consolidado como referente en el ámbito aeronáutico y espacial, fomentando la investigación, el desarrollo tecnológico y la transferencia de conocimientos en beneficio de la industria y el progreso científico. Su compromiso con la excelencia y la innovación ha situado al CTA como un agente clave en el panorama tecnológico actual.

CTA MIÑANO Y CTA ZAMUDIO

La información se ha obtenido de [1] y las imágenes se han obtenido de [2].

El CTA cuenta con dos centros en Miñano (Álava) y Zamudio (Bizkaia), ambos de vital importancia para fomentar la innovación y la excelencia tecnológica.

El centro ubicado en el Parque Tecnológico de Miñano, realiza trabajos de ingeniería en ensayos estructurales, ensayos de fuego y dinámicos. Además de estos trabajos, se realizan actividades de investigación científica y desarrollo tecnológico, se promueve la industria aeronáutica y, en general, se da apoyo al desarrollo tecnológico.



II-CTA Miñano

Por su parte, el centro de Zamudio, inaugurado en el año 2000, se ha especializado en ensayos fluidodinámicos de componentes del sistema de escape de turbinas de baja presión y aerorreactores. El Banco de Ensayos de Zamudio es un espectacular

túnel de viento de flujo continuo, con entrada y salida atmosférica, con capacidad de regulación de presiones, temperatura y flujo.

ACTIVIDADES DE CTA

La información y las ilustraciones se han obtenido de [2].

Calidad

La confiabilidad de los sistemas de control de calidad y las herramientas de mejora continua del CTA han permitido que el CTA obtenga la certificación como laboratorio ST2S, lo que significa:

Uno de los cinco laboratorios de prueba europeos aprobados por Airbus Group para pruebas estructurales. Uno de los tres laboratorios de prueba europeos aprobados por Airbus Group para pruebas de fuego.

El CTA también cuenta con la certificación ISO9001 y EN9100 y ha superado todas las auditorías propuestas por sus clientes.

En cuanto a las pruebas de fuego y vibración, el CTA también cuenta con la certificación ISO 17025 (acreditada por ENAC con el número N° 241 y de acuerdo con el Anexo Técnico vigente) y la aprobación por parte de AESA (Agencia Estatal de Seguridad Aérea).



III-Ensayo de fuegos

Finalmente, en 2012, el CTA recibió la certificación UNE 166002 por sus actividades de I+D.

El objetivo principal del CTA en este campo es apoyar las actividades tecnológicas de sus clientes aplicando el conocimiento tecnológico obtenido a través de proyectos de I+D.

El CTA cuenta con una amplia experiencia en proyectos de I+D a nivel regional, nacional y europeo, que incluyen programas como FP5, FP6 y FP7, Clean Sky (I y II como socio principal) y Horizonte 2020, todos ellos con una tasa de éxito muy alta.

Estos proyectos de desarrollo se llevan a cabo tanto con el CTA como único socio, como parte de un consorcio de diferentes empresas, centros tecnológicos y universidades para fomentar alianzas estratégicas.

El CTA aplica criterios de calidad estrictos para la identificación, protección y publicación de los resultados de I+D, incluyendo un blog de tecnología.



IV-Sala de control de CTA

Ensayos estructurales

Desde 1996, el CTA se ha especializado en el campo de pruebas de componentes estratégicos de aeronaves, como los flaps (Airbus A320, Airbus A380 y Embraer KC-390), las puertas del tren de aterrizaje (Airbus A380, A320 y A400M), los elevadores (Embraer ERJ-170 y Airbus A320), los timones de dirección (Embraer ERJ-170 y KC-390) y los estabilizadores horizontales (Embraer ERJ-170, Sikorsky S-92 y Embraer E2).



V-Ensayo estructural

Ensayos de sistemas

Desde el año 2000, el CTA ha realizado pruebas en los sistemas hidráulicos de numerosas aeronaves, incluyendo los actuadores NLGR/CLGR del Airbus A340, el actuador NLGR del Airbus A380, el sistema DRAS y LG del Airbus A400M y el actuador MLGR del Airbus A350XWB.



VI-Airbus A340

Además, el CTA ha desarrollado bancos de pruebas para servoválvulas cuyas pruebas se llevan a cabo bajo condiciones de alta presión y temperatura utilizando fluidos como skydrol y red oil.

Ensayos espaciales

A lo largo de los años, el CTA ha brindado servicios de pruebas de componentes para numerosos programas espaciales como GAIA, BEPICOLOMBO, SENTINEL, GALILEO, MTG EXOMARS y SOLAR ORBITER. Estos servicios incluyen pruebas de vibración, choque pirotécnico, vacío, térmicas y funcionales tanto para piezas pequeñas y simples como para componentes más grandes y complejos.

El CTA ha desempeñado un papel crucial en el desarrollo y la certificación de componentes utilizados en misiones espaciales de alto perfil. Las pruebas de vibración ayudan a garantizar que los componentes puedan soportar las condiciones extremas experimentadas durante el lanzamiento y el funcionamiento en el espacio. Las pruebas de choque pirotécnico simulan las condiciones explosivas asociadas con la separación de etapas o el despliegue de ciertos mecanismos en el espacio. Las pruebas en vacío permiten evaluar cómo los componentes se comportan en ausencia de presión atmosférica. Las pruebas térmicas ayudan a determinar la resistencia y el rendimiento de los componentes bajo variaciones extremas de temperatura. Además, las pruebas funcionales aseguran que los componentes cumplan con sus especificaciones y funcionen correctamente en el entorno espacial.



VII-Ensayo espacial

El CTA ha acumulado una sólida experiencia en el campo de las pruebas espaciales y ha sido un colaborador confiable para numerosos programas espaciales. Su experiencia abarca desde la prueba de piezas más simples hasta la evaluación de componentes más complejos y críticos para el éxito de las misiones espaciales. Con su amplia gama de servicios de prueba y su enfoque en la calidad y la excelencia, el CTA ha desempeñado un papel importante en el avance de la tecnología espacial y la garantía de la fiabilidad de los componentes utilizados en la exploración y observación del espacio.

Ensayos de fuego

El laboratorio de fuego del CTA es reconocido a nivel mundial como uno de los principales proveedores de servicios de pruebas de fuego. Las pruebas se realizan de acuerdo con las regulaciones de aeronavegabilidad de la FAA/EASA y los principales requisitos de los fabricantes de equipos originales (OEM, por sus siglas en inglés).

Monitorización

Desde 2001, CTA ha estado trabajando en la aplicación de la termografía infrarroja (IRT) para pruebas no destructivas (NDT) de materiales críticos y monitoreo de pruebas, con el objetivo de desarrollar un alto nivel de conocimiento y dominio de diferentes técnicas a través de proyectos de investigación y desarrollo (R&D) para proporcionar un valor agregado a sus pruebas.

Consultoría aeronáutica

CTA cuenta con un equipo de ingeniería aeronáutica con una amplia experiencia en la Gestión Continua de la Aeronavegabilidad, Vigilancia Tecnológica dentro de la industria aeroespacial y asesoramiento sobre Regulaciones Aeronáuticas para Empresas Aeroespaciales (ISO 9001; EN 9100; PRI-NADCAP, Parte M, Parte 145, Parte 21, ASTM, NAS, NSA y otros requisitos de empresas aeroespaciales).

CONTEXTO DEL PROYECTO

ESTADO DEL ARTE

En este apartado se ha realizado una investigación completa sobre las tecnologías de control avanzado aplicadas al utillaje inteligente. Estas técnicas de control más modernas ofrecen numerosas ventajas en comparación con los métodos tradicionales cuando se trata de aplicaciones donde estos últimos no son suficientes. La información sobre los diferentes sistemas de control y las ilustraciones se han obtenido de [3].

En primer lugar, se ha profundizado en las técnicas clásicas de control en lazo cerrado, explicando en detalle los conceptos básicos, los componentes involucrados y los parámetros que determinan la calidad de un sistema de control. Se han examinado enfoques como los controladores PID y las técnicas basadas en el espacio de estados.

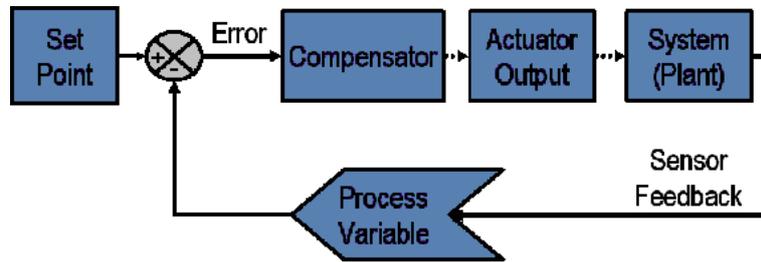
Posteriormente, se ha explorado en mayor profundidad las estrategias de control avanzado que han surgido recientemente. Se han estudiado la lógica difusa, las redes neuronales, los métodos evolutivos y los métodos predictivos como alternativas prometedoras. Se ha analizado cada una de estas estrategias en términos de sus principios fundamentales, su aplicación en el control del utillaje inteligente y las ventajas y desventajas que presentan en comparación con los enfoques tradicionales. Además, se ha destacado la posibilidad de combinar estas estrategias para crear sistemas de control híbridos que aprovechen las fortalezas individuales de cada enfoque y mejoren el rendimiento y la adaptabilidad del sistema.

En resumen, este apartado ofrece una revisión completa de las tecnologías de control avanzado aplicadas al utillaje inteligente. Al explorar las técnicas clásicas de control en lazo cerrado y las estrategias de control avanzado, se proporciona una comprensión profunda de las diferentes opciones disponibles. Esto permitirá a los investigadores y profesionales tomar decisiones informadas sobre qué estrategias de control son más adecuadas para sus necesidades específicas en el campo del utillaje inteligente.

CONTROL EN LAZO CERRADO

Un sistema de control se usa para controlar una o varias variables de un proceso en referencia a un "set point" o punto de referencia. Esta variable se mide con un sensor que proporciona un "feedback" o una retroalimentación. La diferencia entre este punto de referencia y el feedback es el error y es la entrada de la que hace uso el sistema de control para determinar la salida del actuador. Se llama control en lazo

cerrado porque la salida del sistema se utiliza para generar la señal de control, de forma que se crea un lazo cerrado entre la salida y la entrada del sistema.



VIII-Diagrama de bloques de un control en lazo cerrado

El rendimiento del sistema se mide habitualmente usando una función en escalón como referencia o set point, midiendo la respuesta de la variable a controlar. Algunos términos usados para definir el comportamiento del sistema son los siguientes:

- Tiempo de subida: es el tiempo que tarda el sistema en alcanzar un valor comprendido entre el 10% y el 90%.
- Rebose: es el valor máximo que la señal de salida supera al valor final, se expresa en porcentaje.
- Tiempo de estabilización: es el tiempo que tarda el sistema en alcanzar valores cercanos al valor final (5% habitualmente).
- Error final: es el error cuando la señal está estabilizada y hay una diferencia con respecto al set point.

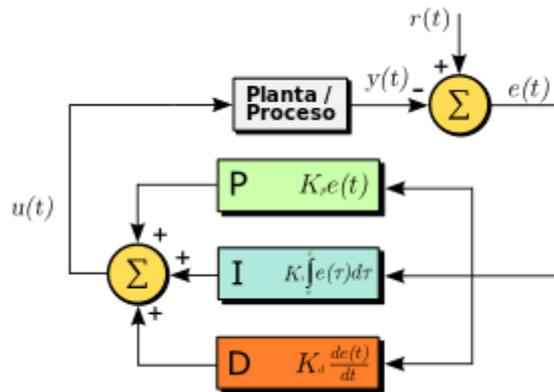
El sistema de control se diseña para cumplir con los requisitos en los casos más desfavorables. A veces el sistema se verá afectado por variables externas o perturbaciones que no se han tomado en cuenta en la fase de diseño.

Esto puede ocurrir en los sistemas no lineales en los que la dinámica del sistema no se puede modelar mediante ecuaciones lineales. En estos casos el sistema de control puede funcionar correctamente en algunos puntos de trabajo, pero lo normal es que la respuesta no sea satisfactoria en muchos puntos de trabajo. Si un sistema de control es capaz de trabajar en sistemas con perturbaciones y no linealidades se dice que el sistema es robusto.

PID

El PID es un algoritmo de control que consiste en tres parámetros: el proporcional, el integral y el derivativo. El proporcional depende del error actual, el integral depende de los errores pasados y el derivativo depende de los errores futuros. El proceso se ajusta mediante la suma de estos tres componentes. Es el control en lazo cerrado más utilizado, en un 95% de los casos. Dentro del control PID, el más usado es el PI, dejando de lado el componente derivativo del controlador.

El control PID es bastante simple pero se utiliza en combinación con funciones lógicas, funciones secuenciales y otros tipos de bloques para controlar procesos de actuación más complejos y sofisticados como modelos de control predictivos. Actualmente, los controladores PID se ejecutan principalmente en microprocesadores, facilitando la incorporación de otro tipo de herramientas como el ajuste automático, la programación de ganancia y la adaptación continua.



IX-Esquema de control PID

Componentes del control PID

Componente proporcional

El valor del componente proporcional del sistema depende del error actual y su valor consiste en el producto entre la señal de error y la constante proporcional para lograr que el error en estado estacionario se aproxime a cero, aunque es complicado que estos valores sean los óptimos. La fórmula del proporcional está dada por:

$$P_{sal} = K_p \cdot e(t)$$

Donde K_p es la ganancia proporcional y $e(t)$ es el error dado por la siguiente definición:

$$e(t) = SP - PV(t)$$

Donde SP es el punto de establecimiento o consigna y PV(t) es la variable de proceso. t es el tiempo instantáneo o actual.

Multiplicando la constante proporcional y el error se consigue el valor dado por el componente proporcional del controlador PID.

Componente integral

El valor del componente integral depende del error pasado y tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario que pueden ser provocados por perturbaciones exteriores y no pueden ser corregidos por el control proporcional. El control integral actúa cuando hay una desviación entre la variable y el punto de consigna integrando esta desviación o error en el tiempo y sumándola a la acción proporcional. El valor de la integral está dado por la siguiente definición:

$$I_{sal} = K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Donde K_i es la constante integral y e es la variable de integración, que toma en cuenta el valor desde el instante 0 hasta el instante actual t .

Componente derivativo

El valor del componente derivativo depende del error futuro y actúa únicamente cuando hay cambios en el valor del error. De esta manera, si el error es constante solo actúan los modos proporcional e integral. La función de la acción derivativa es evitar que el sistema tenga rebose, disminuyendo la señal de control proporcionalmente a la velocidad de reducción del error. Para esto, se deriva el error con respecto al tiempo y se multiplica por la constante K_d . El valor del derivativo viene dado por la siguiente definición:

$$D_{sal} = K_d \cdot \frac{de}{dt}$$

Donde K_d es la constante de derivación y t es el tiempo.

ESTRATEGIAS DE CONTROL INTELIGENTE

Entre las tecnologías de control se pueden dividir varias ramas, entre las que podemos encontrar el control clásico, basado en la función de transferencia o el control moderno que lo sucedió, basado en las ecuaciones de estado. La mayoría de estrategias de control tienen una base común, como es el disponer de información sobre el comportamiento de la planta, bien en forma de modelo analítico o bien representando de alguna otra manera su comportamiento. Sin embargo, la diversidad de modelos o requerimientos de operación puede hacer que esta información falte o sea incompleta, de manera en la que a finales del siglo XX surge el Control Inteligente, que nace con la intención de aplicar al control las técnicas de la Inteligencia Artificial.

Las herramientas principales para el control inteligente son:

- Sistemas de lógica difusa (fuzzy logic) que se basan en la experiencia de un operario humano, expresado de formas lingüísticas (reglas si-entonces)
- Redes neuronales (Artificial neural networks) que emulan los procesos neuronales biológicos, de modo que la red neuronal puede aprender diferentes patrones a partir de un proceso de aprendizaje, con o sin supervisión.
- Métodos evolutivos (Evolutionary methods) basados en los procesos evolutivos como la evolución natural que son básicamente procedimientos para la optimización.
- Métodos predictivos basados en metodología matemática que predice el comportamiento futuro del sistema.

Cada herramienta tiene sus ventajas y desventajas, pero algunas de las desventajas se pueden minimizar combinando dos o más métodos para producir un sistema híbrido.

SISTEMAS DE LÓGICA DIFUSA

La lógica clásica, está basada en el concepto fundamental de pertenencia, en donde cada elemento pertenece o no pertenece a un conjunto o cumple o no cumple unas características. Debido a esto, se definen claramente los límites en los que se encuentra un elemento que pertenezca al conjunto. Además de esto, un individuo no puede pertenecer a dos conjuntos a la vez, y una vez pertenece a uno, pertenece a él de un modo absoluto.

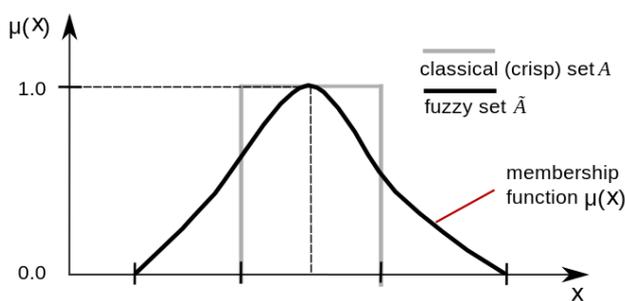
El mundo real, sin embargo, es un mundo muy incierto donde la información es muy enrevesada y escasa, por lo que los problemas que se presentan en el suelen ser complejos y los elementos que definen estos problemas no han de pertenecer a un conjunto u otro, sino que pueden pertenecer a varios conjuntos a la vez. Los humanos somos capaces de razonar aproximadamente con escasa información y no necesitamos una descripción completa del entorno del problema. Esto mismo es lo que se intenta lograr con las computadoras, conseguir que puedan lidiar con la incertidumbre para resolver los problemas que se puedan presentar aún de manera aproximada, por complejos que sean.

A este problema se le debe la aparición de la lógica difusa. La lógica difusa es una lógica que identifica fracciones de pertenencia a un conjunto o e valores verdaderos entre 0 y 1. De esta manera, mientras la lógica define los elementos como verdaderos o falsos y les da el valor de 1 o 0 respectivamente, la lógica difusa permite definir los elementos como parcialmente verdaderos o falsos, y permite asignarles cualquier valor entre 0 y 1 dependiendo de su grado de veracidad.

Por ejemplo, si imaginamos el concepto de "error grande", al analizar a un elemento, siendo este elemento una persona en este caso, la lógica definiría a este elemento como "grande" o "no grande", asignándole el valor de 1 o 0 respectivamente. La

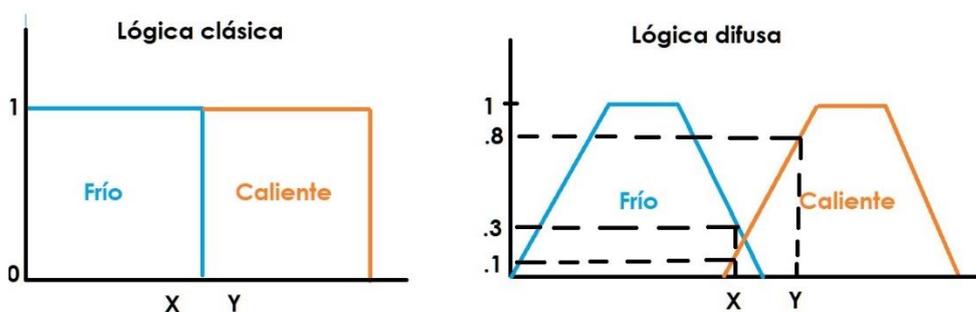
lógica difusa, sin embargo, permite definir a un elemento como "muy grande", "bastante grande", "nada grande" ... acercando el lenguaje usado en la lógica a conceptos cotidianos. El valor dado a cada elemento por su parte depende del grado de cumplimiento de este elemento con la premisa, acercándose más o incluso tomando el valor de 1 a medida que se cumple la premisa y acercándose o tomando el valor de 0 a medida que no se cumpla la premisa. Hay que añadir a esto, que en la lógica difusa un elemento puede pertenecer a varios conjuntos a la vez, cada uno con su grado de cumplimiento a diferencia de la lógica clásica.

Tomando como base esta lógica surge el controlador difuso que permite controlar sistemas usando un sistema basado en unas normas que se le introducirán. Primero, el controlador difuso clasifica la entrada o las entradas que le llegan en diferentes conjuntos difusos. Los conjuntos difusos son fracciones del universo de discurso. El grado de pertenencia a cada conjunto difuso lo define su función de pertenencia. Las funciones de pertenencia son herramientas matemáticas que indican la pertenencia de una entrada a un conjunto.



X-Función de pertenencia

En la imagen se puede observar un conjunto difuso y su función de pertenencia. En un controlador difuso se suelen definir más o menos funciones de pertenencia en la entrada y en la salida dependiendo de la función del controlador. De esta manera, una vez recibida la entrada el controlador la clasifica mediante las funciones de pertenencia y le asigna un valor de pertenencia a cada conjunto.



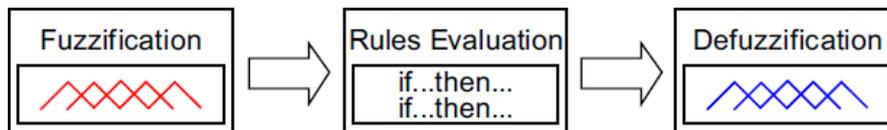
XI-Diferencia entre la lógica clásica y la lógica difusa

Al igual que la entrada la salida también está definida mediante conjuntos difusos y funciones de pertenencia y para relacionar la entrada y la salida existen las reglas difusas. Mediante estas reglas se define que salida ha de tener una entrada dependiendo del conjunto difuso al que pertenezca. La estructura de las reglas está definida como "SI ... y SI ... ENTONCES ...", es decir, si la entrada o las entradas pertenecen a uno o varios conjuntos, la salida o las salidas pertenecerán a otro u otros conjuntos definidos.

Los conjuntos difusos al igual que en la teoría clásica de conjuntos se trabaja con diferentes operaciones y términos:

- Operaciones booleanas: NOT, AND, OR.
- Operaciones difusas: Intersección, Unión.
- Fuzzificación: es el proceso de transformar un conjunto nítido, definido a un conjunto difuso, o puede ser utilizado para aumentar la difusividad del sistema.

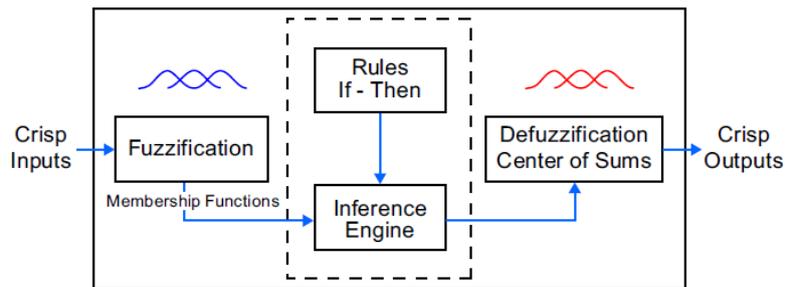
Los controladores difusos reaccionan de manera no lineal a la entrada haciendo uso de funciones de pertenencia y reglas heurísticas. Las funciones de pertenencia sirven para designar el grado de pertenencia de un elemento a un conjunto determinado. Las reglas heurísticas por su parte, incluyen dos partes diferentes. La primera evalúa los antecedentes (SI...) y la segunda implica una consecuencia si se cumplen los antecedentes (ENTONCES...). Existen varios tipos de controladores difusos FLC, y los principales elementos de la estructura de control son la fuzzificación, evaluación de las reglas y defuzzificación.



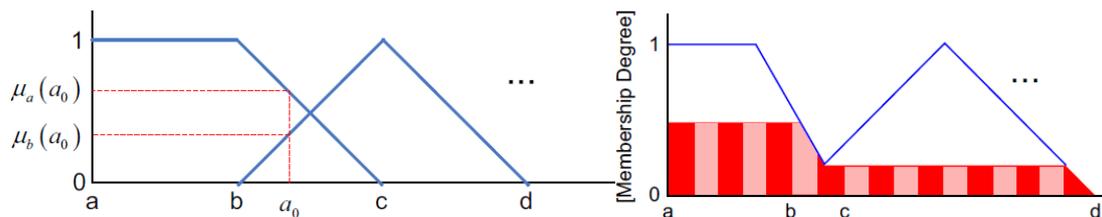
XII-Esquema de un controlador de lógica difusa

Controlador Difuso Mandami

Este controlador difuso está dividido en tres partes diferentes: en primer lugar, las variables definidas se fuzzifican por medio de funciones de pertenencia. En segundo lugar, se evalúan las reglas y se obtienen como resultado valores difusos utilizando un motor de inferencia. Finalmente, las salidas de cada regla se suman y los valores difusos se defusifican. Un método sencillo y con buenos resultados es utilizar el centroide como resultado de la defusificación.



XIII-Estructura Mandami



XIV-Fuzzificación y defuzzificación Mandami

Controlador Difuso Tsukamoto

El método de Tsukamoto es similar al método de Mandami, pero las funciones de pertenencia deben ser monótonas, es decir, creciente o decreciente, pero no ambas.

Controlador Difuso Takagi-Sugeno

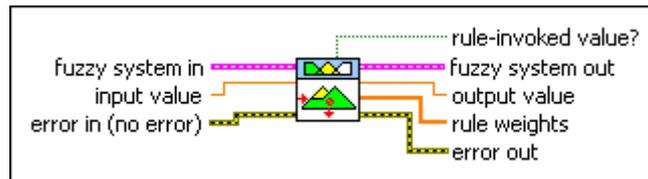
La principal diferencia con los métodos anteriores es que en la defuzzificación no se utilizan funciones de pertenencia, ya que cada regla tiene una salida exacta, que puede ser:

- Promedio ponderado de cada regla.
- Suma ponderada de cada regla.

Control difuso mediante LabView

Mediante LabView es posible construir un sistema de control difuso con el que controlar el demostrador. Para esto, primero se debe diseñar el sistema difuso. El primer paso es definir las entradas y salidas. Por otro lado, tendrá una salida cuyo valor dependerá de cómo esté diseñado el sistema difuso.

Cabe resaltar que un sistema difuso puede tener más de una entrada, así como más de una salida. Sin embargo, a medida que se añaden más entradas configurar el sistema difuso para que la salida dé el valor adecuado a cada momento se vuelve más y más complicado.



XV-Bloque del controlador difuso en LabView

Una vez definidas las entradas y salidas, se ha de definir el rango en el que actuarán cada una de ellas, ya que las funciones de pertenencia estarán ubicadas dentro del rango. Para definir el rango de entrada se debe tener en cuenta el rango en el que va a variar la entrada, ya que, si el rango es demasiado estrecho, el valor de la entrada podría sobrepasarlos por encima o por debajo, haciendo que las funciones de pertenencia dejaran de funcionar. Por otro lado, si el rango es demasiado amplio, el sistema deja de funcionar de manera precisa, ya que las funciones de pertenencia cercanas al límite del rango se quedan fuera de los valores del error. Debido a esto, es de suma importancia el ajuste del rango de la entrada.

En el rango de salida se deben de tener en cuenta los valores que maneja el sistema para su correcto funcionamiento, ya que, si los valores del rango sobrepasan a los valores de funcionamiento, la velocidad será demasiado alta y la máquina puede oscilar, funcionar de manera incorrecta o incluso sufrir daños. Por otro lado, si los valores son demasiado bajos el sistema responderá lento y su funcionamiento, además de ser menos preciso, no se podrá ajustar a la velocidad de operación requerida en algunas operaciones.

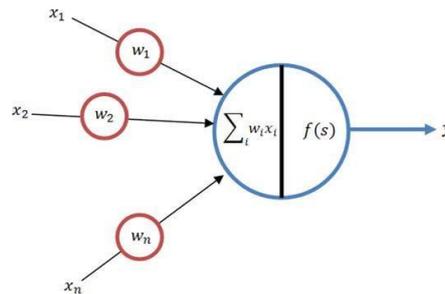
Una vez establecido el rango se deben configurar las funciones de pertenencia de entrada y salida. Cuantas más funciones de pertenencia se definan, más preciso será el funcionamiento del sistema, pero su ajuste será más complicado. Además de esto, hay varios tipos de funciones de pertenencia según su forma.

Estando definidas las funciones de pertenencia, lo único que falta para que el sistema difuso esté completado es definir las reglas del sistema. Estas reglas serán las que definan la relación entre la salida y la entrada, definiendo que función de membresía se debe tener en cuenta a la hora de asignar un valor a la salida según la función de membresía de la variable de entrada. De esta manera, el comportamiento de la salida y su reacción a diferentes entradas lo definirán las reglas que se definan.

En caso de contar con dos variables de entrada, las reglas se vuelven más complicadas, ya que hay que asignar una función de salida a cada par de reglas, haciendo que, por ejemplo, teniendo dos variables de entrada de tres funciones cada una y una salida de tres funciones, haya que definir nueve reglas.

REDES NEURONALES

Los sistemas de regulación de redes neuronales se fundamentan en el funcionamiento de las células cerebrales: las conexiones neuronales permiten la transmisión de señales eléctricas, las cuales se suman cuando una o varias señales alcanzan una neurona, resultando en un potencial final. Si el potencial alcanza cierto umbral determinado, la neurona genera una señal eléctrica, de lo contrario, no hay generación de señal. Este proceso se representa matemáticamente mediante una función de activación, siendo las más comunes la función sigmoide, la función lineal y la función tangente hiperbólica.



XVI-Modelo neuronal

Un conjunto de funciones neuronales conectadas entre sí forma una red neuronal artificial, las acciones que pueden desarrollar las redes neuronales son:

- Capaces de aprender datos e información
- Capaces de generalizar información
- Capaces de reconocer patrones
- Filtrado de señales
- Clasifican información
- Procesado en paralelo
- Predicción y aproximación de funciones
- Aproximación universal

Para llevar a cabo estas operaciones, las redes neuronales necesitan ser "entrenadas" inicialmente, con el propósito de minimizar el error de control. La estructura de una red neuronal puede ser de alimentación directa (feed-forward), en la cual la información fluye en una única dirección, o de retroalimentación (feedback), en la cual pueden existir conexiones cerradas dentro de la estructura. Las redes neuronales artificiales se pueden clasificar de la siguiente manera:

CONTROL DESLIZANTE

El control deslizante (SMC) es una técnica de control no lineal que ofrece resultados precisos y robustos, además de ser fácil de implementar y ajustar. Los sistemas de control deslizante se diseñan con el objetivo de llevar el estado del sistema a una superficie deslizante. Una vez que el sistema alcanza esta superficie deslizante, se

mantiene en ella a pesar de las incertidumbres que puedan presentarse en el sistema. El diseño del control deslizante consta de dos partes principales.

En primer lugar, se diseña una superficie deslizante en el plano de fase del sistema, en la cual el sistema compensado se moverá. En segundo lugar, se selecciona una ley de control que permita que el sistema sea atraído hacia la superficie deslizante y se mantenga en ese estado.

El SMC ofrece dos ventajas principales. En primer lugar, el comportamiento dinámico del sistema está gobernado por la superficie deslizante una vez que el sistema alcanza dicha superficie. En segundo lugar, la respuesta del sistema en lazo cerrado no se ve afectada por las incertidumbres, perturbaciones y no linealidades que puedan existir.

OBJETIVOS

Tomando como base los sistemas de control anteriormente mencionados, se han definido varios objetivos de cara a desarrollar el sistema de control. Primeramente, es necesario que el sistema de control mejore los resultados de los sistemas de control convencionales en cuanto a precisión se refiere. El sistema de control PID, aporta una gran precisión en sistemas cuyo comportamiento es predecible y funciona de una manera lineal, pero su rendimiento deja mucho que desear cuando el sistema se comporta de una forma no lineal. Debido a esto, haciendo uso del control difuso, se define que el sistema ha de funcionar correctamente cuando las condiciones no sean las idóneas. Para esto, se ha definido 1 mm como error máximo para que un sistema de control sea considerado aceptable, es decir, si en un ensayo el error sobrepasa este valor en algún momento, el sistema de control no se considerará aceptable.

El anterior objetivo tiene una gran relación con otro de los objetivos, que el controlador sea robusto y no pierda prestaciones ante inconvenientes que puedan presentarse. De esta manera, el controlador deberá seguir trabajando a pleno rendimiento ante adversidades como el mal funcionamiento de uno o varios componentes de la máquina que controle. La robustez del controlador es especialmente importante en entornos industriales, donde pueden ocurrir eventos inesperados o fallas en los componentes de la maquinaria o los sistemas. En tales circunstancias, un controlador robusto debe ser capaz de adaptarse y responder de manera adecuada para minimizar los efectos negativos en la operación y mantener un rendimiento óptimo.

Por otro lado, otro de los objetivos es la reducción de consumo de los sistemas de control. En el contexto actual, donde la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental están en el centro de atención, la reducción del consumo de energía se

ha convertido en un objetivo fundamental en todos los sectores industriales. La creciente conciencia sobre el agotamiento de los recursos naturales y la necesidad de minimizar el impacto ambiental ha impulsado a las organizaciones a buscar formas de optimizar su consumo energético.

Además, en el apartado económico, un controlador que consuma menos energía siempre será más barato, lo que da aún más importancia a este objetivo. Para esto, se hará uso de las características que aporta el control difuso, para reducir el consumo en los momentos en los que el error sea bajo y aumentarlo cuando el error sea alto, para corregir este error. Para esto, se analizará el consumo del controlador PID para, partiendo de esa base, tratar de reducir el consumo sin que el error aumente.

LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

DESCRIPCIÓN DEL BANCO

El Demostrador 1 ha sido diseñado y sus elementos han sido seleccionados teniendo en cuenta los diferentes elementos comúnmente usados en el mundo industrial, para que la aplicación de los sistemas de control desarrollados a partir de él tenga el mayor alcance posible. Los elementos con los que está conformado el demostrador son un motor, cuatro acoplamientos elásticos, un sistema de poleas, un freno magnético, una junta cardán, un husillo y un torquímetro.



XVII-Demostrador 1

MOTOR

El motor del Demostrador 1 es un servomotor síncrono de la marca Festo, modelo EMMS-AS-100-S-HS-RMB. Este servomotor síncrono dinámico, sin escobillas ofrece un alto sincronismo incluso a bajas velocidades de giro, tiene un momento de giro optimizado, revoluciones optimizadas y una técnica de conexión sencilla. Los parámetros de la dinámica del motor se ajustan mediante el programa de Festo, que controla el movimiento del servomotor mediante un controlador PI. Es muy importante seleccionar de manera adecuada los componentes en el programa para después ajustar los valores por defecto a los valores con los que el movimiento del motor se ajuste mejor al sistema. Por otro lado, los comandos se transmiten al motor mediante el programa de LabView desde el que se pueden enviar comandos en posición, par y velocidad. Este último tipo de comando ha sido el escogido para el programa, ya que es el que mejores resultados da. Este comando varía según la velocidad o la posición que se quiera conseguir, como se explicará más adelante.



XVIII-Motor Festo EMMS-AS-100-S-HS-RMB

ACOPLAMIENTOS ELÁSTICOS

Los acoplamientos elásticos absorben desalineaciones, reducen esfuerzos y amortiguan vibraciones y choques. De esta manera, se alarga la vida de los componentes del demostrador y se facilita el correcto funcionamiento de este. En el caso del Demostrador 1 hay instalados cuatro acoplamientos elásticos, entre el motor y el torquímetro, el torquímetro y el sistema de poleas, el sistema de poleas y el freno magnético y la junta cardán y el husillo. De esta manera, se reducen mucho las desalineaciones que se pueden dar entre los diferentes elementos, las vibraciones y los golpes que pueden sufrir los diferentes componentes del demostrador.

Hay instalados dos tipos de acoplamientos elásticos, dos de fuelle y dos de estrella.



XIX-Acoplamiento de fuelle



XX-Acoplamiento de estrella

SISTEMA DE POLEAS

El sistema de poleas instalado en el demostrador permite transferir el movimiento del eje del motor al eje del husillo. El sistema de poleas consta de una correa dentada o síncrona para evitar el deslizamiento de la correa y asegurando que el movimiento se transmitirá de forma precisa entre los dos ejes. En el caso del Demostrador 1, el sistema de poleas está diseñado de modo que se puede cambiar la relación de 1:1 a 1:3 para hacer pruebas con dos relaciones diferentes y comparando resultados, analizar si este cambio afecta al comportamiento del sistema. Además de esto, el sistema de poleas del segundo eje o eje del husillo consta de libertad de movimiento en la dirección de la correa, pudiendo así variar la tensión de la correa, aspecto interesante a analizar, ya que este parámetro tiene gran repercusión en el comportamiento del sistema.

FRENO MAGNÉTICO

El freno magnético es el responsable de introducir carga al sistema. Está acoplado al final del eje del motor, unido al sistema de poleas mediante un acoplamiento elástico de estrella. Este acoplamiento es el modelo MB9M-19 de la marca Warner Electric. Permite ajustar la intensidad del freno desde 1 Nm hasta 5 Nm. Este freno permite observar la repercusión de las diferentes cargas en el comportamiento del sistema, que tiene, por ejemplo, gran repercusión en el consumo eléctrico del motor.

JUNTA CARDÁN

La junta cardán del demostrador está instalada en el segundo eje, entre el sistema de poleas y el husillo. Esta junta cardán permite el movimiento del sistema de poleas del segundo eje en la dirección de la correa. Este movimiento crea una gran desalineación entre el sistema de poleas y el husillo, y para transmitir el movimiento entre uno y otro es necesaria la junta cardan.



XXI-Junta cardán

TORQUÍMETRO

El torquímetro del demostrador permite controlar en todo momento la posición la velocidad y el par del eje en el que esté acoplado. En este caso el torquímetro puede estar acoplado en dos posiciones diferentes, entre el motor y el sistema de poleas o

entre la junta cardán y el husillo. El torquímetro acoplado al Demostrador 1 es el modelo DR-2112-R-P de la marca Lorenz, que es un torquímetro sin escobillas con un rango entre 0,1 Nm y 20000 Nm.



XXII-Lorenz DR-2112-R-P

HUSILLO

El husillo es el elemento móvil del demostrador, que transforma el movimiento giratorio que genera el motor en movimiento lineal. La posición del husillo es una de las que se introduce como consigna en el programa de LabView, haciendo el cálculo con el paso que tiene. Siendo el posicionamiento del husillo es más interesante ya que en este entran en juego las no linealidades del sistema que harán que el husillo no se posicione correctamente algunas veces, error que hay que solventar mediante la estrategia de control. Además de esto, el husillo permite probar y comparar sensores y tecnologías de medición, siendo esta una de las funciones principales del Demostrador 1.

El husillo es el elemento final de la cadena de elementos que, iniciando desde el motor, forman el demostrador. Debido a esto, es el último elemento al que se le transmite el movimiento y, por tanto, en él se reflejan las no linealidades de los demás elementos.

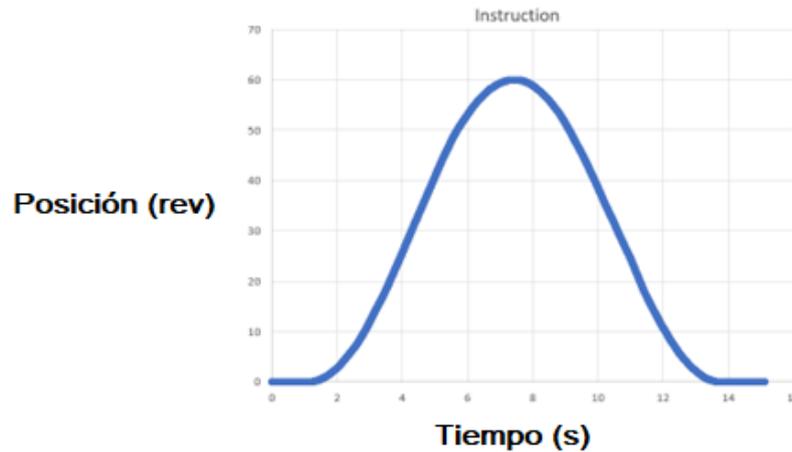
DESARROLLO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL AVANZADO

Para el desarrollo del sistema de control avanzado se han definido tres estrategias de control diferentes. Estas estrategias son el control mediante compensador PID, el control mediante compensador PID difuso de una entrada y el control mediante compensador PID difuso de dos entradas. Dichas estrategias han sido adoptadas después de varias pruebas en las que se ha concluido que dichas estrategias son las más adecuadas para conseguir unos buenos resultados.

El primer punto a tener en cuenta es la no linealidad del comportamiento del demostrador. El Demostrador 1 cuenta con varios elementos cuyo comportamiento no es perfecto y, por lo tanto, transfieren no linealidades al Demostrador. Ejemplo de esto son el deslizamiento que se puede dar en los rodamientos, la tensión de la correa o las vibraciones de las orejetas. Esto, hace que el comportamiento del demostrador no sea perfecto y es una característica muy a tomar en cuenta al desarrollar el control.

La estrategia al desarrollar el control ha consistido en empezar con un control PID, ampliamente extendido en la industria aeronáutica, y, una vez desarrollado, combinarlo con un controlador difuso para mejorar su rendimiento. Esto se debe a las no linealidades anteriormente mencionadas. Estas no linealidades afectan mucho al controlador PID, que está diseñado para trabajar bajo unos parámetros estables y los cambios que se dan debido a las no linealidades pueden provocar que no funcione correctamente. El controlador difuso, por otro lado, es muy adecuado para trabajar con sistemas cambiantes. De esta manera, se ha considerado que combinando los dos sistemas se puede conseguir un buen rendimiento del controlador, combinando la precisión del controlador PID con la adaptabilidad del controlador difuso.

Además de esto, se ha definido el perfil que se tomará como consigna para las pruebas de control que servirán para probar los sistemas de control. El perfil consiste en la siguiente onda sinusoidal:



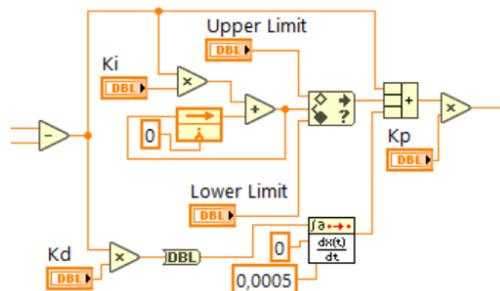
XXIII-Consigna

Esta onda oscila entre los valores 0 y 60, medidos en revoluciones, siendo este el recorrido del que dispone el husillo, ya que tiene un recorrido de 300 mm y un paso de 5 mm. La frecuencia es de 0,1 hz, de modo que el husillo tardará 10 segundos en completar el recorrido de ida y vuelta

SISTEMA DE CONTROL PID

El sistema de control PID desarrollado en un principio ha sido un simple sistema PID en el que el controlador recibe el error en posición y ordena la consigna en velocidad.

El sistema es el siguiente:



XXIV-Controlador PID

Los resultados del controlador PID no han resultado satisfactorios, ya que el error es muy grande y se ha comprobado que el controlador PID no es adecuado para este fin, ya que, con las ganancias bajas, el controlador no reacciona con la necesaria rapidez para mantener el error bajo, y con la ganancia alta, esta reacción es demasiado alta. Además de esto, se ha comprobado que el sistema es demasiado sensible a los cambios dados en el sistema, pequeños cambios provocados por las no linealidades, a los que el sistema PID reacciona de una manera muy brusca.

Ante esta situación, se ha decidido introducir un control de lazo abierto que aproximara el valor del demostrador al valor de la consigna.

LAZO ABIERTO

Como se ha mencionado antes, desde el controlador se introduce una consigna en velocidad al motor. Debido a esto, se ha definido un lazo abierto mediante derivada.

El principio de este lazo abierto es simple, la consigna en posición se deriva respecto al tiempo, consiguiendo la velocidad que se introducirá al motor.

$$v = \frac{dx}{dt}$$

Donde x es la posición del husillo, v es la velocidad del motor y t es el tiempo.

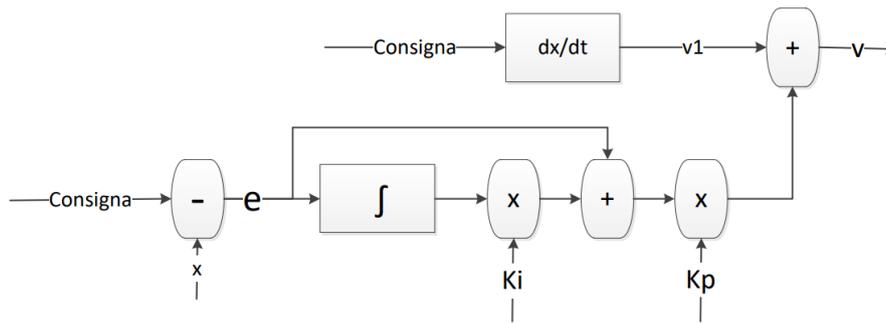


XXV-Esquema de control en lazo abierto

Este lazo abierto proporcionó resultados satisfactorios, con un error relativamente bajo, sirviendo como una buena base para ajustar este error mediante diferentes compensadores.

COMPENSADOR PI

El compensador PI funciona igual que el controlador PID explicado anteriormente, con la diferencia de que se ha desechado el apartado derivativo del controlador, dejando solo los apartados proporcional e integral, con los que se han conseguido los mejores resultados. que en este caso el controlador PI cuenta con la base o la ayuda que le aporta el control en lazo abierto. De esta manera, el compensador PI recibe el error entre el la consigna y la posición del Demostrador reducido considerablemente mediante el lazo abierto, y lo compensa sumando la salida del lazo abierto con el valor de salida del compensador, ajustando sus ganancias para que este último valor sea el adecuado para reducir al máximo el error.



XXVI-Esquema del compensador PI

COMPENSADOR PI DIFUSO

El compensador PI ofrece un buen rendimiento y reduce el error considerablemente, sin embargo, tiene ciertos aspectos que son muy mejorables. Por ejemplo, un aspecto claramente a mejorar es el apartado del consumo eléctrico, ya que, con la ganancia ajustada al máximo, aunque logra un error muy bajo, se consume una gran cantidad de energía. Por otro lado, si bajamos las ganancias para reducir el consumo, el error aumenta mucho.

Debido a esto, se ha planteado un compensador PI difuso que consigue combinar las características de los dos casos anteriores. Además de esto, como se ha mencionado anteriormente, el control difuso es un control muy adaptable a los cambios de comportamiento del sistema, característica que es perfecta para el control de este demostrador.

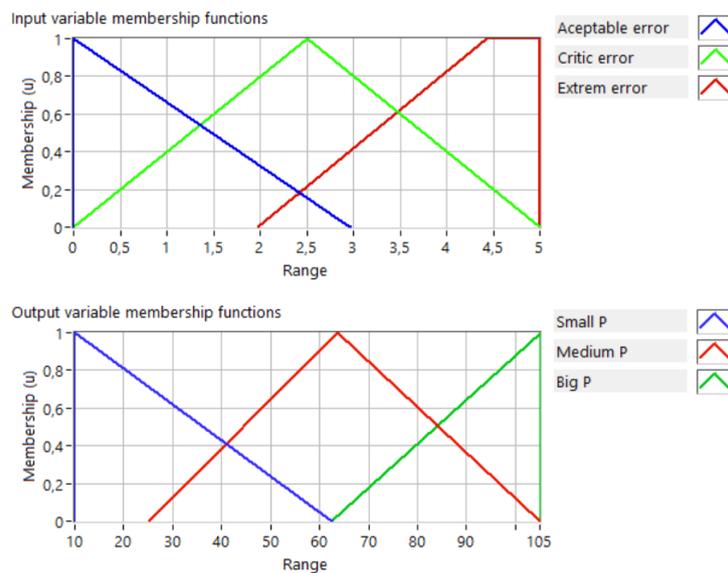
La información obtenida de [4], [5], [6], [7], [8], [9] y [10] ha sido de gran ayuda a la hora de desarrollar el compensador difuso, sirviendo de ejemplo para el diseño y el ajuste del controlador.

COMPENSADOR PI DIFUSO (UNA ENTRADA)

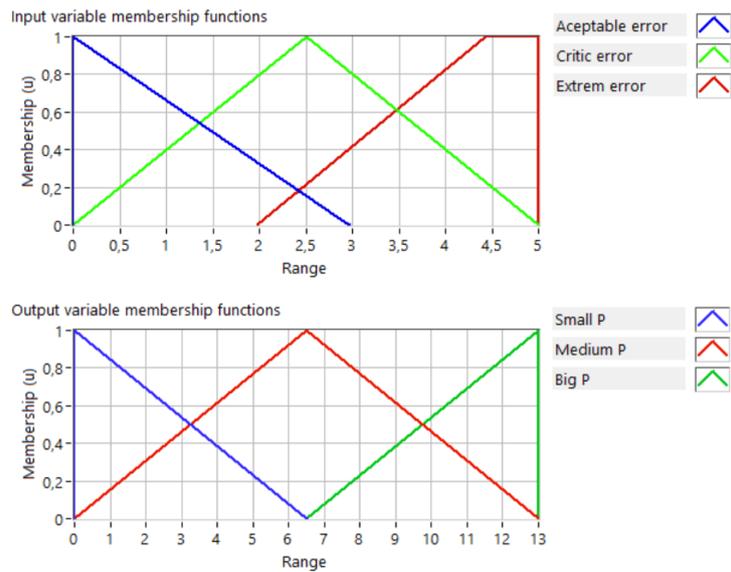
El controlador difuso diseñado para el control PI difuso de una entrada es un controlador con dos sistemas difusos diferentes, uno para cada entrada. Se han definido dos sistemas para controlar por separado el componente proporcional y el integral, siendo la entrada común el error entre la consigna y la posición. Cada sistema consta de tres funciones de pertenencia en la entrada y tres funciones de pertenencia en un rango definido partiendo de los datos conseguidos de las pruebas efectuadas con el compensador PI y el lazo abierto.

En estas pruebas se observaba claramente como cuanto más altos sean los valores de los componentes proporcional e integral del compensador PI, más alto es el consumo del motor, debido a los bruscos cambios de velocidad que se producen. Teniendo esto como base se ha ideado un sistema de control difuso que haciendo

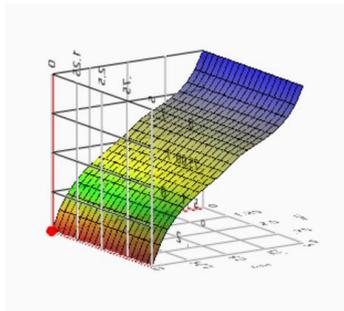
uso de la lógica difusa ajusta automáticamente los valores de los componentes integral y proporcional para que se aumente el valor de estos componentes cuando el error sea grande y los mantenga bajos cuando el error sea pequeño. De esta manera, el compensador reaccionará de manera suave a los cambios en el error que se den cuando el error sea bajo y reaccionará de manera más rápida a medida que el error vaya aumentando. Esto disminuye mucho los cambios de velocidad bruscos que son los que provocan picos en el consumo del motor. Debido al comportamiento de los controladores difusos, estos cambios de velocidad son constantes, ya que la velocidad va cambiando a medida que cambia el error, pero con este método, se hace que estos cambios sean mucho más suaves y sobre todo, se optimiza el funcionamiento del controlador PI haciendo uso de su potencial cuando sea necesario (error grande) y reduciendo su influencia a medida que se reduce el error.



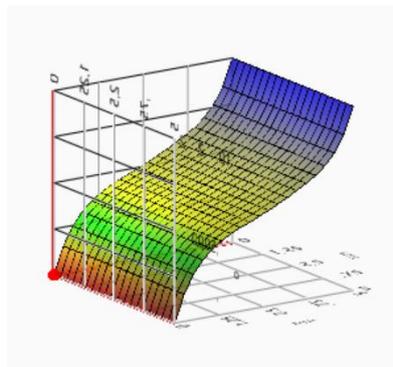
XXVII-Sistema difuso que controla el componente proporcional



XXVIII-Sistema difuso que controla el componente integral



XXIX-Representación de la relación entre el error y la salida proporcional



XXX-Representación de la relación entre el error y la salida integral

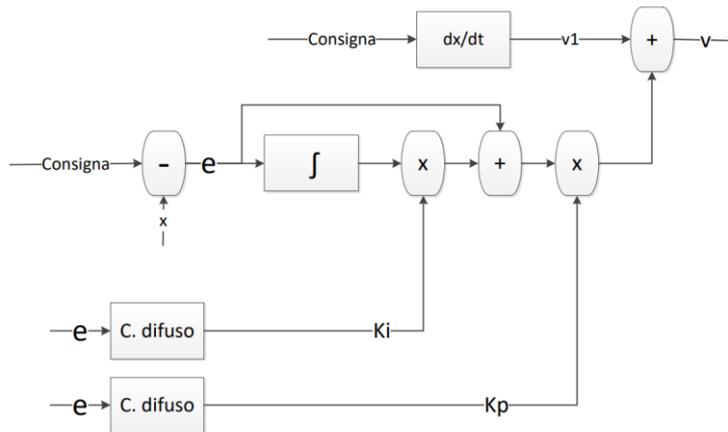
Las reglas difusas del sistema son simples, a mayor error más grande serán los valores del compensador PI y para esto, cuando el error sea aceptable los valores del PI serán pequeños, cuando el error sea crítico, los valores serán medianos y cuando el error sea extremo los valores serán grandes. El rango de error es de 0 a 5 revoluciones. Esto se debe a las pruebas efectuadas con el control en lazo abierto,

en las que el error es próximo a 5 revoluciones. De esta manera, es seguro que el error estará entre estos dos rangos, sin miedo a que el PI deje de funcionar correctamente y el error salga del rango de funcionamiento del controlador difuso.

Por otro lado, los sistemas difusos se han diseñado de modo en que la función de pertenencia del error aceptable abarca la mitad del rango. La razón de esto no es que el error sea aceptable desde 0 a 3 revoluciones, ya que se ha definido el error aceptable en 0,2 revoluciones, lo que correspondería un mm, y 3 revoluciones corresponden a 15 mm. La razón de que la función de pertenencia del error aceptable sea baja es la de mantener los valores del compensador PI bajos, para mantener el consumo energético al mínimo posible. Por otro lado, la función de pertenencia del error crítico, que comienza en el 0, sirve para mantener el error bajo, ya que aumentará los valores del compensador PI. De esta manera, se ha encontrado un equilibrio entre las dos funciones para aprovechar las características de cada una de ellas.

Por último, hay que destacar la forma trapezoidal de la función de pertenencia del error extremo, que comienza a funcionar en el límite de las 2 revoluciones y se vuelve plano cuando el error supera las 4 revoluciones y media. Esto se debe a que la función de pertenencia de error extremo es la que protege la máquina de sufrir daños debido al error de posición, daños que en nuestro caso se traducen a una salida del husillo de su recorrido. Esta función de pertenencia aumenta los valores del compensador PI, haciendo que el demostrador responda al error de una manera más rápida, aumentando mucho el consumo.

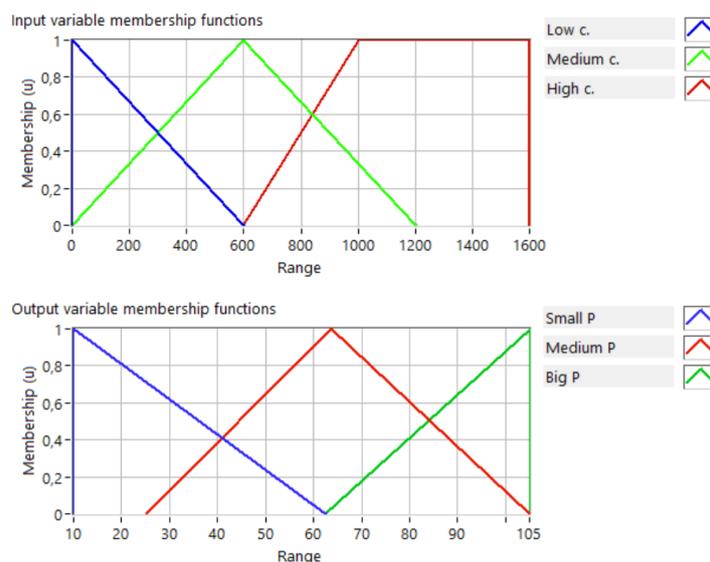
Las funciones de pertenencia de la salida se han dispuesto uniformemente, para que la relación entre la entrada y la salida sea lo más lineal posible, con el pequeño detalle del desplazamiento de la función del componente proporcional medio que está colocado un poco a la derecha, para que el valor del proporcional sea más cambiante al principio, pero se mantenga más lineal en los valores medios del error. Esto se observa en la gráfica que muestra la relación entre el error y el valor del componente proporcional en el que se puede observar como en la parte central de la gráfica la pendiente se mantiene más constante que en el caso del componente integral, en las cuales se ha mantenido el reparto uniforme de las funciones de salida debido a que estas variaciones no han representado un cambio en el funcionamiento del demostrador.



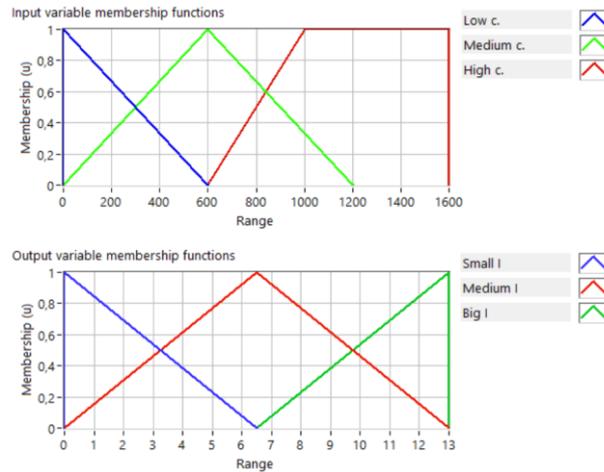
XXXI-Esquema del compensador PI difuso de una entrada

COMPENSADOR PI DIFUSO (DOS ENTRADAS)

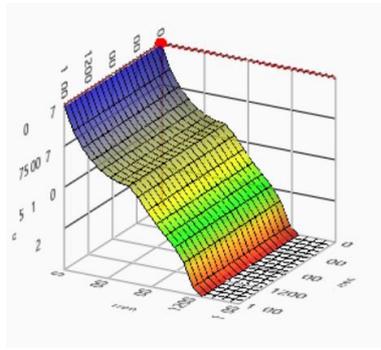
El controlador PI difuso de dos entradas tiene el mismo principio de funcionamiento que el compensador PI difuso de una entrada, sin embargo, este está diseñado para reducir el consumo al máximo posible, de modo que se ha diseñado un controlador igual que el controlador difuso explicado en el punto anterior con la diferencia de que en este caso se toma como entrada el consumo del motor, y se combinan los controladores que funcionan mediante la entrada de error y la entrada de consumo para sacar el máximo rendimiento posible del consumo eléctrico, o lo que es lo mismo, reducir el consumo energético al máximo manteniendo el error en un rango aceptable. Como se ha mencionado antes este error aceptable se ha definido en 1 mm.



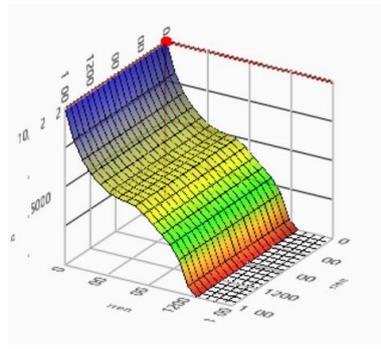
XXXII-Sistema difuso que controla el componente proporcional



XXXIII-Sistema difuso que controla el componente integral



XXXIV-representación de la relación entre el consumo y el componente proporcional



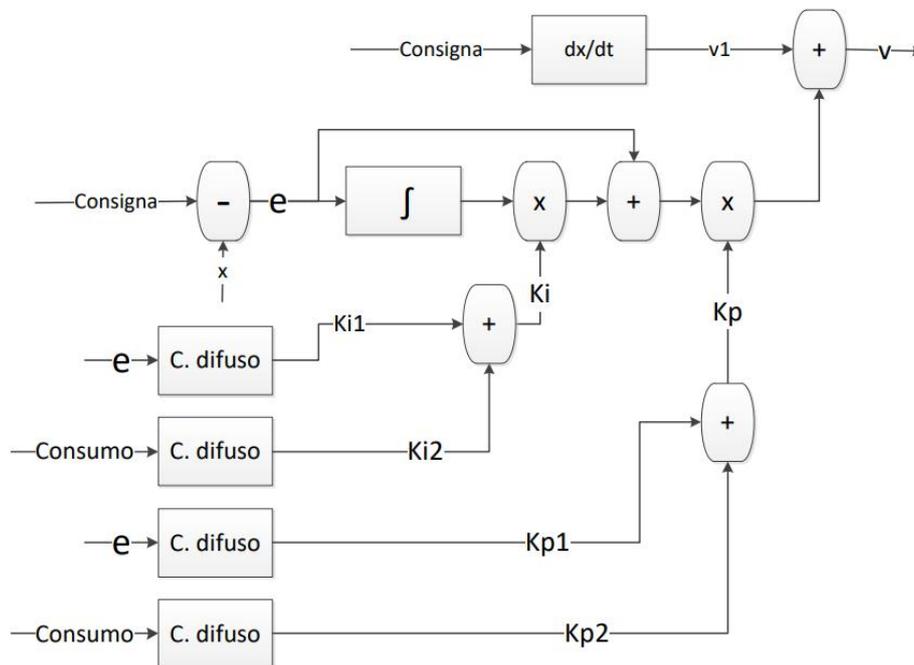
XXXV-Representación de la relación entre el consumo y el componente integral

Entre este sistema difuso y el sistema en el que la entrada es el error hay varias diferencias. La primera y la más destacable es que los valores de los componentes proporcional e integral aumentan a medida que el consumo baja. De esta manera, cuando el consumo sea bajo se aumentará el valor del compensador PID y el control será más preciso. Esto provocará que el consumo aumente, pero el controlador encuentra un equilibrio. Por otro lado, se observa que a diferencia de la entrada de error en este caso las funciones de pertenencia del consumo bajo y medio abarcan

mucho menos rango que la función de pertenencia del consumo alto. Esto se debe a que el fin de este controlador es reducir el consumo al máximo y por lo tanto en el momento en el que se alcanza ese nivel de consumo se mantienen los valores del compensador PI al máximo.

Este compensador se ha implantado en combinación con el compensador difuso con entrada de posición, de modo que trabajan juntos con una relación entre los valores de los componentes proporcional e integral de uno y de otro. De esta manera, según la relación de peso que introduzcamos, el valor de los componentes será uno u otro. Por ejemplo, si nuestra relación de peso es de 80-20, se hará la suma del 80% del valor de los componentes aportado por el compensador con entrada de posición y del 20% del valor de los componentes aportado por el compensador con entrada de consumo.

Esto se debe a que el compensador con entrada de consumo, aunque ofrece unos consumos muy bajos, es muy poco preciso al trabajar en solitario. De esta manera, se quiere aprovechar la precisión del compensador difuso con entrada en posición, aprovechando el bajo consumo del compensador PI con entrada en consumo para intentar que la estrategia de control sea lo más eficiente posible.



XXXVI-Esquema del controlador PI difuso de dos entradas

SIMULACIÓN MEDIANTE SIMULINK

MODELO DEL BANCO EN SIMULINK

Conocer de antemano el comportamiento que tendrá en banco ante las diferentes entradas que se le introduzcan mediante el motor, es necesario para tener un control preciso sobre el banco y sus respuestas. Así, para aproximar el comportamiento, se ha hecho un modelo en Simulink que permite simular el banco con diferentes entradas, que representan los diferentes torques que dará el motor.

Este modelado se ha hecho por partes, primero modelando el motor con la unión, y luego introduciendo las poleas y el husillo. De esta manera se van calibrando los diferentes modelos uno a uno para conseguir un modelo final más preciso que refleje mejor la respuesta del banco.

Como entrada se ha definido una onda sinusoidal que representa el torque introducido por el motor, que va a ser variable. El primer sistema modelado ha sido el sistema del motor y del eje, con el acoplamiento elástico. De esta manera se pueden calcular los parámetros que le llegan a la polea. Para esto se ha definido un sistema elástico en el que hay pérdidas por fricción y por fuerza elástica. Las pérdidas por fricción están relacionadas con la diferencia entre la velocidad inicial y la velocidad que le llega a la polea. La fuerza elástica por otro lado está relacionada con la diferencia entre la posición inicial y la posición de la polea.

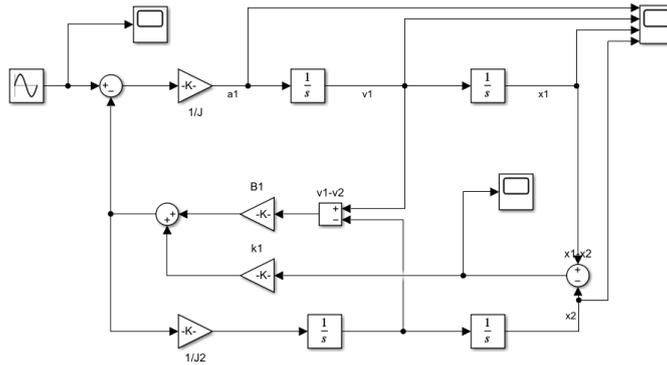
El primer paso para la construcción del modelo ha sido la definición de las ecuaciones diferenciales que la describen. Las ecuaciones que se han definido han sido las siguientes.

$$J_1 \cdot \ddot{\theta}_1 = T - k_1 \cdot (\theta_1 - \theta_2) - b_1 \cdot (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)$$

$$J_2 \cdot \ddot{\theta}_2 = k_1 \cdot (\theta_1 - \theta_2) + b_1 \cdot (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)$$

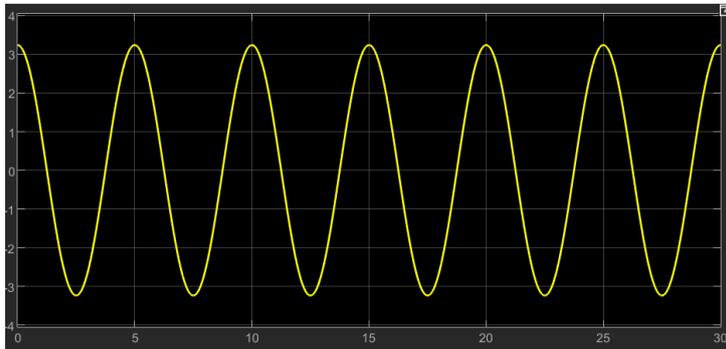
Donde θ es la posición angular del eje, J es el momento de inercia, T es el torque, k es la rigidez torsional y b es el coeficiente de fricción.

Una vez montado en Simulink, el modelo queda de esta manera:



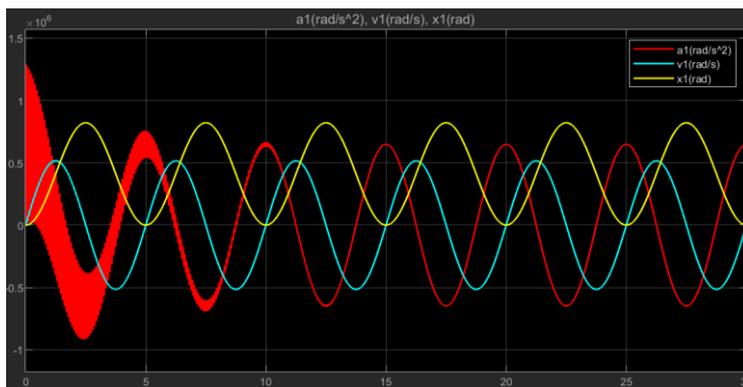
XXXVII-Sistema motor+unión

La entrada es una onda sinusoidal cuya amplitud es igual al Par nominal del motor.

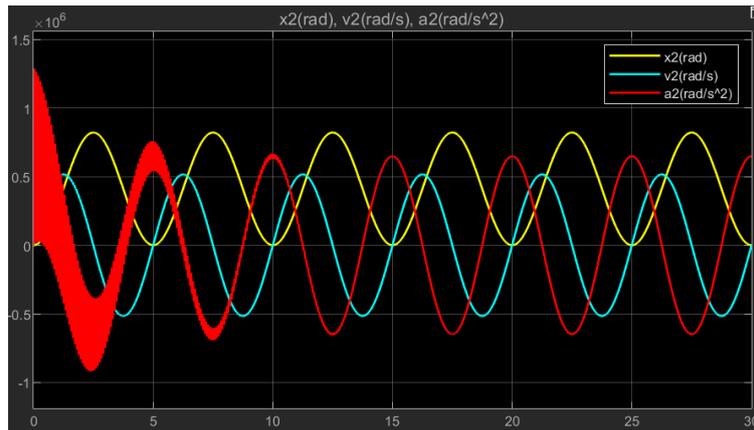


XXXVIII-Entrada del sistema (par)

Una vez simulado, los gráficos de la posición, velocidad y aceleración de los ejes son los siguientes:



XXXIX-Parámetros eje 1



XL-Parámetros eje 2

Se puede observar como al introducir el par del motor de golpe, al principio de la simulación las aceleraciones de los ejes oscilan bastante. Sin embargo, al ser su valor medio igual a la onda sinusoidal, la velocidad no varía y se mantiene en onda. Se puede observar también como la posición tiene la forma deseada, que consiste en una onda sinusoidal.

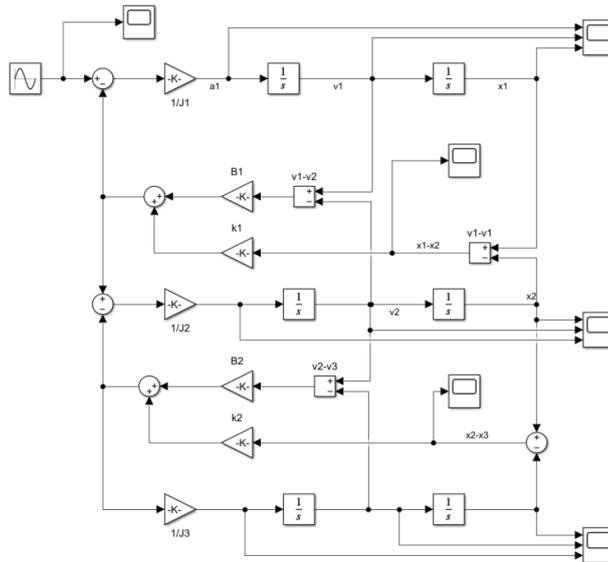
Una vez analizados los resultados del sistema de motor-uni3n-polea, el siguiente paso es introducir el siguiente elemento en el sistema, la segunda polea. Para esto es necesario modificar las ecuaciones anteriormente mencionadas con el fin de que tengan en cuenta las fuerzas ejercidas por la segunda polea. Esta polea ejercerá fuerza de fricci3n y fuerza elástica y, por lo tanto, la ecuaci3n a introducir es parecida a las ya definidas. En la ecuaci3n que describe el segundo elemento, sin embargo, es necesario ańadir la fuerza que el elemento introducido ejerce sobre este elemento y, por lo tanto, restarle estas fuerzas. Una vez definidas, las ecuaciones quedan de esta forma:

$$J_1 \cdot \ddot{\theta}_1 = T - k_1 \cdot (\theta_1 - \theta_2) - b_1 \cdot (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)$$

$$J_2 \cdot \ddot{\theta}_2 = k_1 \cdot (\theta_1 - \theta_2) + b_1 \cdot (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) - k_2 \cdot (\theta_2 - \theta_3) - b_2 \cdot (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3)$$

$$J_3 \cdot \ddot{\theta}_3 = k_2 \cdot (\theta_2 - \theta_3) + b_2 \cdot (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3)$$

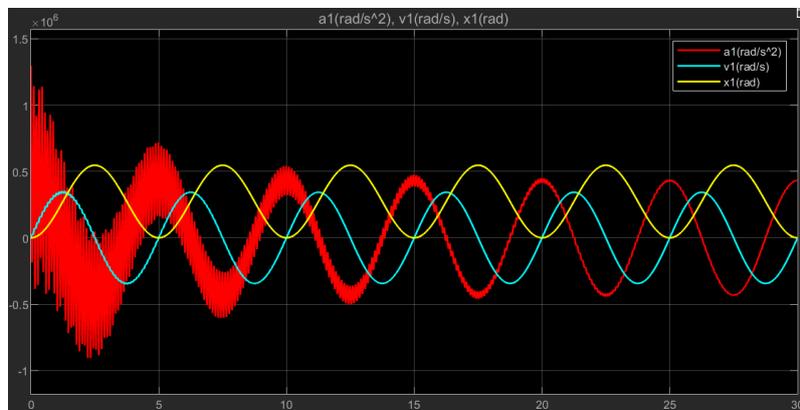
De esta manera, teniendo en cuenta los cambios en las ecuaciones, el modelo queda de este modo:



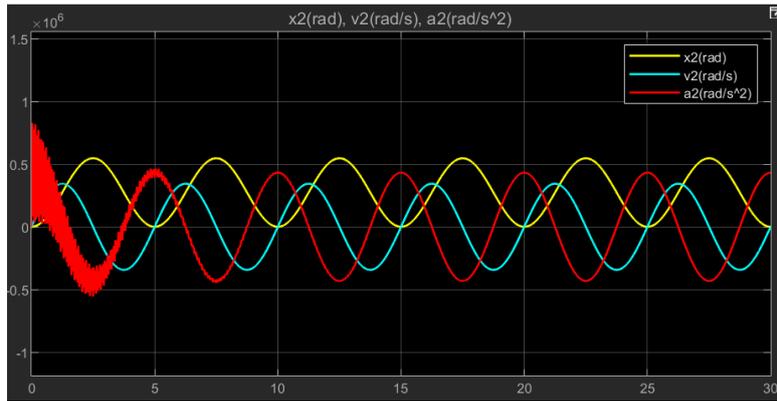
XLII-Sistema motor+unión+polea

En la parte inferior se puede apreciar el cambio respecto al modelo anterior, ya que se han añadido varios bloques al sistema para modelizar la ecuación añadida.

Una vez simulado, si analizamos el comportamiento de la posición, velocidad y aceleración de las poleas, los gráficos que describen estos parámetros son los siguientes:



XLII-Parámetros eje 1

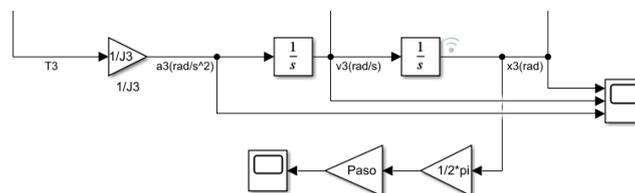


XLIII-Parámetros eje 2



XLIV-parámetros eje 3

El último paso para completar el modelo del banco es introducir el husillo. De esta manera hay que convertir el movimiento simulado hasta ahora, que era circular, en movimiento lineal. El paso del husillo es la distancia que el husillo recorrerá por cada vuelta que dé su eje. Al multiplicar la posición del eje (en revoluciones) por el paso del husillo, se consigue la posición de este último y, por lo tanto, con añadir un par de bloques al modelo es suficiente para integrar el husillo.



XLV-Bloques del husillo

El primer bloque, sirve para pasar los datos de radianes a revoluciones, y el segundo multiplica estas revoluciones por el paso, que define el avance del husillo por cada revolución.

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

Para el modelizado en Simulink de la transmisión, se ha llevado a cabo un proceso en el que se ha empezado a modelizar por el motor, añadiéndole después los diferentes componentes. Así pues, para la modelización del motor se ha introducido una entrada en forma de torque y se han tenido en cuenta diferentes pérdidas para tener un resultado aproximado al que se dará en la realidad.

Las pérdidas tenidas en cuenta para la modelización del motor han sido las perdidas por fricción y la fuerza elástica que el segundo componente ejerce en la dirección opuesta al movimiento del eje. Para definir los valores de las pérdidas se han de definir el coeficiente de fricción (b) del motor y la rigidez torsional (k) del eje. El primero, junto con la velocidad, define las pérdidas por fricción que sufrirá el motor y el segundo define la fuerza que se ejercerá según la diferencia de posición que haya entre los dos extremos del eje.

Para definir el parámetro b se ha de suponer la proporción de la fuerza del motor que se perderá en forma de pérdidas por fricción. En este caso, se ha supuesto que, al ser baja la fricción del motor, se perderá el 0,1% de la fuerza del motor a 4600 rpm, la velocidad nominal del motor en el que ejerce 3,24 Nm de fuerza. Así pues, sabiendo la definición de las pérdidas por fricción, el parámetro b se calcula de esta manera:

$$\omega \cdot b = T * (\%)$$

De esta manera sustituyendo los valores:

$$481,71 \text{ rad/s} \cdot b = \frac{3,24 \text{ Nm} \cdot 0,1}{100}$$

$$b = 6,72 \cdot 10^{-6}$$

Después de calcular el valor del coeficiente de fricción se ha calculado el valor de la rigidez torsional del eje. Para esto se han definido dos casos, uno en el que el eje va conectado directamente al motor y otro caso en el que se ha puesto un acoplamiento elástico entre los dos para minimizar el golpe sufrido por el sistema en el momento en el que el motor comience a ejercer el torque. Primero se ha calculado la rigidez torsional del sistema sin acoplamiento elástico que es igual a la rigidez torsional del eje:

$$k1 = \frac{G \cdot J}{L}$$

Donde G es el módulo elástico transversal, J es el momento de inercia torsional y L es la longitud del eje. El valor de G se calcula de la siguiente manera:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

Donde E es el módulo de Young del material del que está fabricado el eje (en este caso acero) y ν es el valor del coeficiente de Poisson. Sustituyendo los valores:

$$G = \frac{20 \cdot 10^{10} N/m^2}{2 \cdot (1 + 0,3)}$$

$$G = 7,69 \cdot 10^{10} N/m^2$$

A su vez, el valor de J se calcula de esta manera:

$$J = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot m \cdot r^2$$

Donde r es el radio del eje. Sustituyendo los valores:

$$J = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 0,02m^4$$

$$J = 2,5 \cdot 10^{-7} rad/Nm$$

Una vez definidos estos dos valores y sabiendo que la longitud del eje es de 15 cm se puede calcular el valor de k_1 :

$$k_1 = \frac{7,69 \cdot 10^{10} N/m^2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-7} rad/Nm}{0,15m}$$

$$k_1 = 1,28 \cdot 10^5 rad/Nm$$

Una vez calculado el primer caso se ha incluido el acoplamiento elástico para el segundo cálculo. La rigidez torsional del acoplamiento elástico viene dada por el fabricante. En nuestro caso su valor es de 0,548 Deg/Nm. Sabido esto hay que combinar la rigidez torsional de el acoplamiento elástico con la rigidez torsional del eje para saber el valor de la rigidez torsional de la combinación de los dos elementos.

Para el cálculo de este valor se aplica la fórmula utilizada para medir la rigidez torsional de dos elementos en serie. La fórmula es la siguiente:

$$k_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}}$$

Donde k_1 y k_2 son las rigideces torsionales a combinar. Sustituyendo los valores:

$$k_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{1,28 \cdot 10^5 Deg/Nm} + \frac{1}{0.548 Deg/Nm}}$$

$$k_{eq} = 0.548 Deg/Nm$$

INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

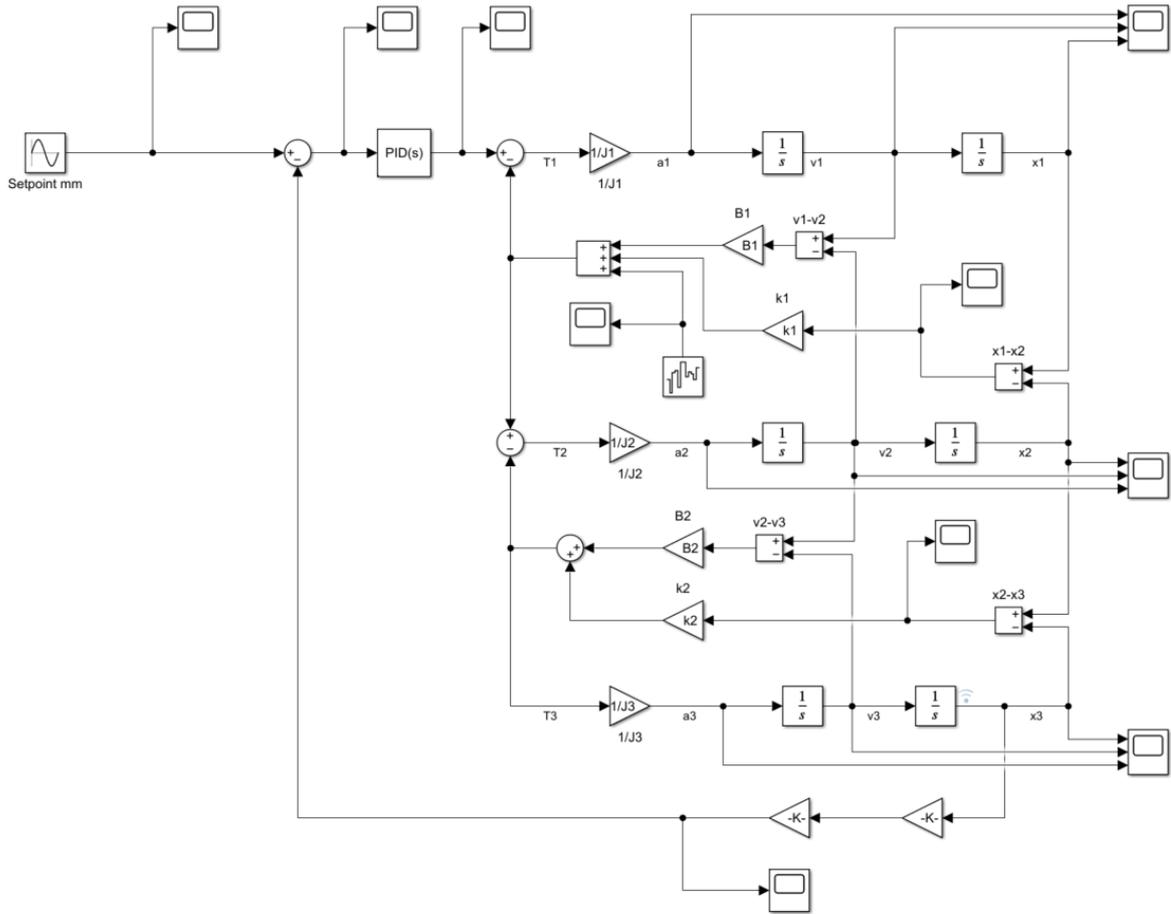
Una vez completado el modelo que define la dinámica del banco en función de la entrada establecida, el siguiente paso es integrar un sistema de control cuya función será controlar la respuesta que dé el sistema. De esta manera, se quiere integrar un sistema de control que adapte la entrada del sistema según la necesidad de cada momento teniendo en cuenta la consigna que se le introducirá al sistema de control.

El primer paso para construir un sistema de control para máquina herramienta ha sido la integración de un sistema de control PID.

INTEGRACIÓN DEL SISTEMA PID

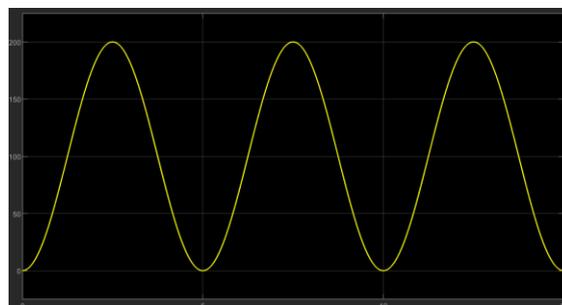
La integración del controlador PID en el modelo de Simulink permite controlar la respuesta dada por el sistema con cierta exactitud. Sin embargo, para conseguir que la respuesta se ajuste a la consigna establecida, es necesario ajustar los componentes que forman el controlador PID. Este ajuste se ha hecho de forma manual, probando diferentes valores para las constantes hasta conseguir un resultado aceptable. El controlador se ha integrado mediante el bloque PID Controller de Simulink.

El modelo con el controlador integrado es el siguiente:



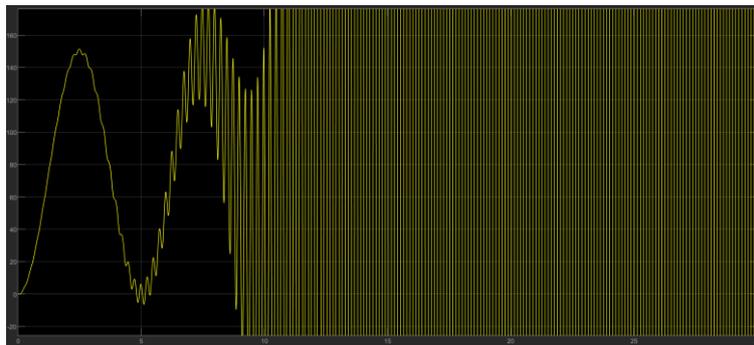
XLVI-Modelo completo con controlador PID

El bloque de entrada introduce una onda sinusoidal en la que la amplitud tiene el valor de la mitad de la carrera del husillo, buscando que el husillo se mueva de lado a lado en movimiento sinusoidal. A esta entrada se le resta la señal de respuesta, para que la entrada del PID reciba directamente el error. Una vez introducida la consigna se ha ajustado el controlador para que la respuesta del sistema se ajuste a esta y el error sea lo más pequeño posible. La entrada del sistema es la siguiente:



XLVII-Entrada del sistema (mm)

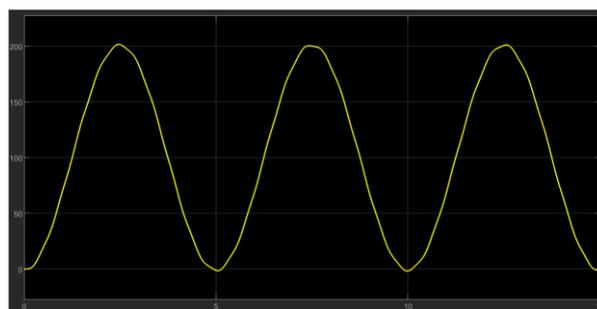
Para empezar, se ha probado el sistema para seleccionar los componentes que usar, ya que no siempre se usan los tres componentes del controlador PID. Para esto se ha asignado el valor de 1 y 0 a las constantes del controlador y se han hecho pruebas. Se ha comprobado de esta manera que el proporcional es el componente que funcionaba mejor en un principio. Una vez comprobado esto, se han hecho más pruebas esta vez cambiando los valores de los otros dos componentes para así comprobar si con un valor menor podían ser combinados con el proporcional. Se ha visto una ligera mejora de los resultados al dar un pequeño valor al componente integral, pero en el caso del componente derivativo el sistema oscilaba por muy pequeño que fuera el valor de este, por lo que se ha decidido pasar de un controlador PID a uno PI, dejando de lado el componente derivativo.



XLVIII-Respuesta del sistema con componente derivativo (mm)

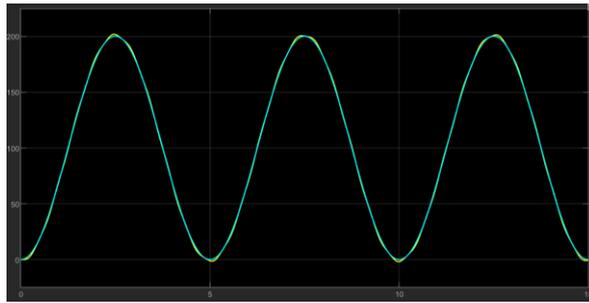
En este gráfico se puede observar como el sistema oscila al usar, en este caso, el componente derivativo.

A continuación, se ha ajustado la constante proporcional e integral haciendo más pruebas. Con un valor de K_p de 0.1, la respuesta del sistema es la siguiente:



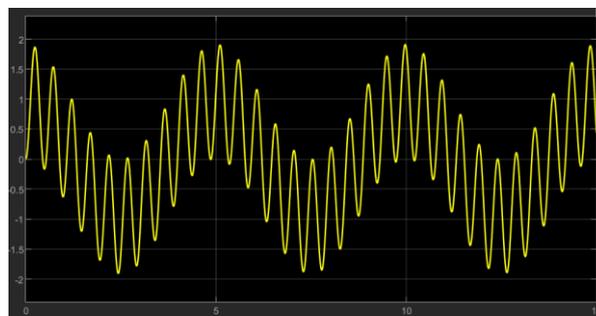
XLIX-Respuesta del sistema con valor de componente proporcional de 0,1 (mm)

En el siguiente gráfico se pueden observar la consigna y la repuesta superpuestas, siendo la consigna la señal azul y la repuesta la seña amarilla



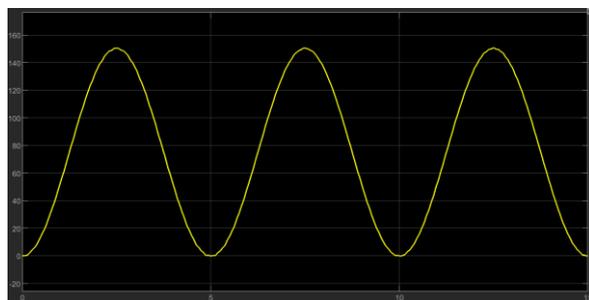
L-Respuesta+consigna

Se puede observar como la respuesta es parecida a la consigna, pero la forma no es limpia y hay mucho que ajustar aún. Esto se observa más claramente en el gráfico que muestra el error, que representa la diferencia entre la consigna y la respuesta a cada momento. El gráfico que representa el error es el siguiente:



LI-Error de posición (mm)

Se observa como el error es grande, ya que un error de casi dos milímetros no es aceptable en la dinámica de nuestro husillo. Debido a esto, se han seguido haciendo pruebas hasta que se ha concluido que el valor de K_p y K_i en el que la respuesta se acerca más a la consigna es el de 20 y 2,5 respectivamente. La respuesta con este valor es la siguiente:



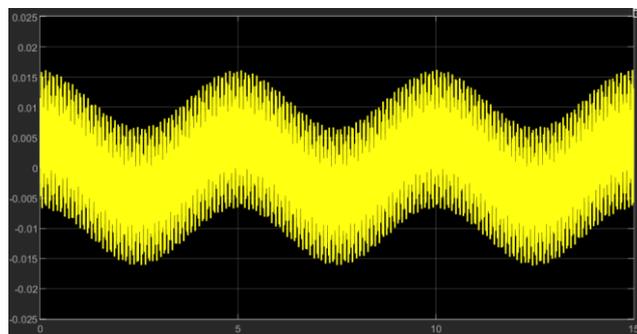
LII-Respuesta del sistema con $K_p= 20$ y $K_i=2,5$

En el siguiente gráfico se pueden observar la consigna y la respuesta superpuestas, siendo la señal azul la consigna y la señal amarilla la respuesta.



LIII-Respuesta+consigna

Se ve a simple vista que la respuesta y la consigna tienen un valor muy parecido. Sin embargo, en el gráfico que representa el error se ve aún mejor:



LIV-Error de posición (mm)

En este caso el error máximo es menor a 0.1. Este error sí que es más aceptable que en anteriores pruebas. Sin embargo, queda por ver el comportamiento del controlador PI en el modelo real, ya que puede variar mucho.

RESULTADOS

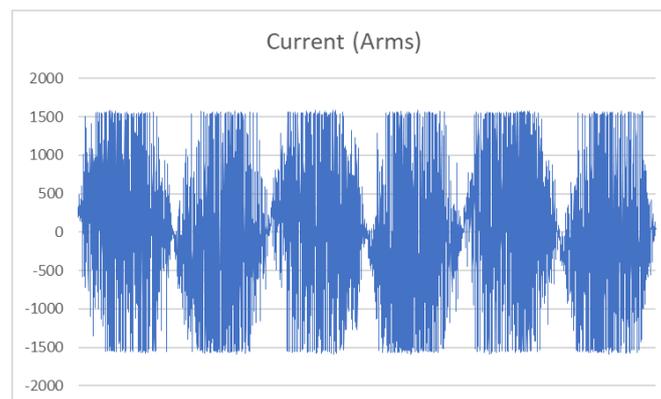
Para analizar los resultados conseguidos en cada una de las pruebas, se han graficado los siguientes parámetros: consumo, posición (instrucción y real), error de posición, velocidad, valor del componente proporcional y valor del componente integral. Por otro lado, se han analizado los siguientes datos para llegar a conclusiones sobre la precisión y eficiencia de cada una de las pruebas: Consumo máximo, consumo medio, error máximo y error medio.

De esta manera se ha ejecutado la consigna explicada anteriormente (la onda sinusoidal) mediante cada una de las estrategias de control y se han repetido tres veces en cada una de ellas para comprobar que los resultados son regulares. Se ha cogido la primera prueba como prueba definitiva en cada una de las estrategias de control.

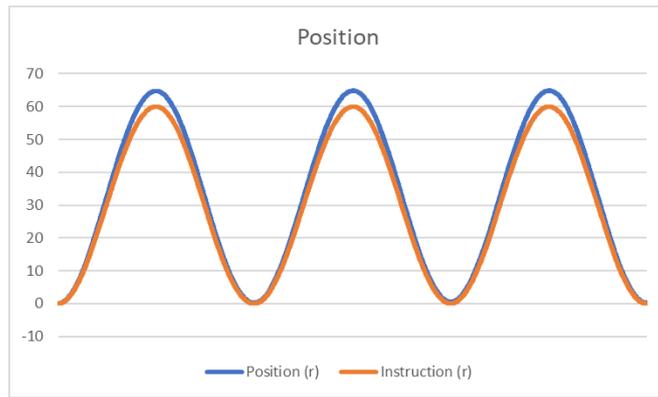
LAZO ABIERTO

Para hacer las pruebas en lazo abierto, se ha definido una ganancia a la salida de la derivada para ajustar la respuesta del sistema a la consigna. Los valores de la respuesta de la derivada, aun con una forma igual, eran muy bajos comparando con los valores de la consigna. Debido a esto, mediante la ganancia, al ser tener la misma forma la respuesta y la consigna, se ha ajustado lo máximo posible, resultando en unos resultados muy aceptables considerando que el control el lazo abierto tiene como fin ofrecer una aproximación y no una respuesta exacta.

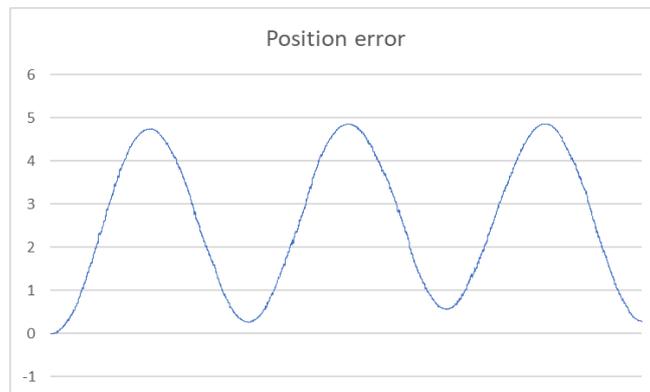
Las gráficas logradas mediante el lazo abierto son las siguientes:



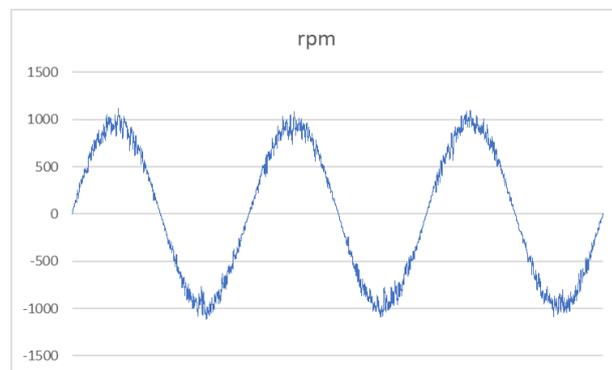
LV-Consumo en lazo abierto



LVI-Posición en lazo abierto



LVII-Error de posición en lazo abierto



LVIII-Velocidad de giro en lazo abierto

Los datos logrados son los siguientes:

ERROR MEDIO	2,594 r
ERROR MÁXIMO	4,867 r

CONSUMO MEDIO	572,76 Arms
CONSUMO MÁXIMO	1592 Arms

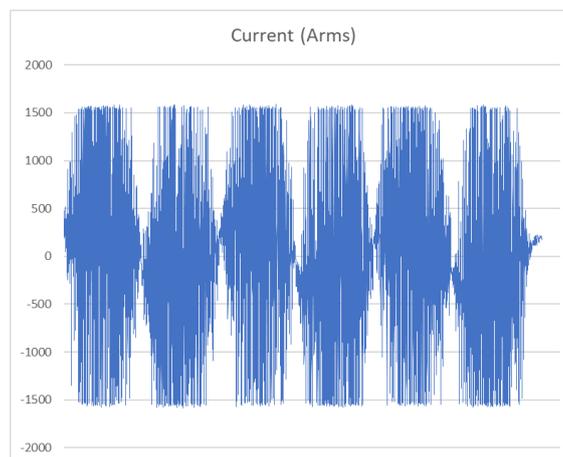
Los resultados obtenidos de las pruebas en lazo abierto han resultado satisfactorios, ya que ofrecen una buena aproximación a la consigna. Por otro lado, el consumo es aceptable.

COMPENSADOR PI

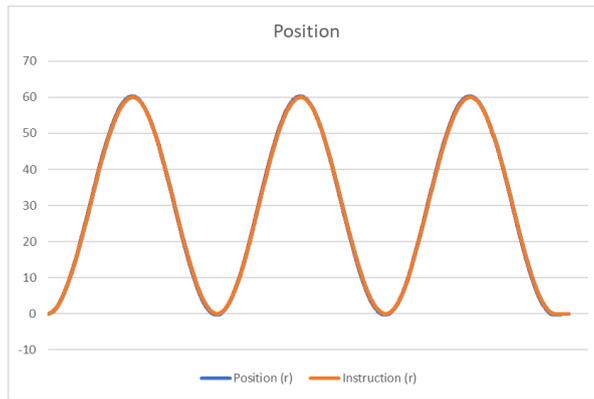
Para realizar las pruebas mediante el compensador PI se ha ajustado de manera que se ha empezado con unos valores bajos y se ha ido ajustando el controlador PI con unos valores bajos, subiéndolos después y tomando como valores definitivos los valores en los que el controlador ofreciera el mínimo error sin que el sistema oscilase o entrase en resonancia. Se han hecho muchas pruebas, de las que se han tomado tres como pruebas representativas, ya que muestran claramente como se comporta el sistema con valores bajos, altos y con los valores adecuados.

25-2,5

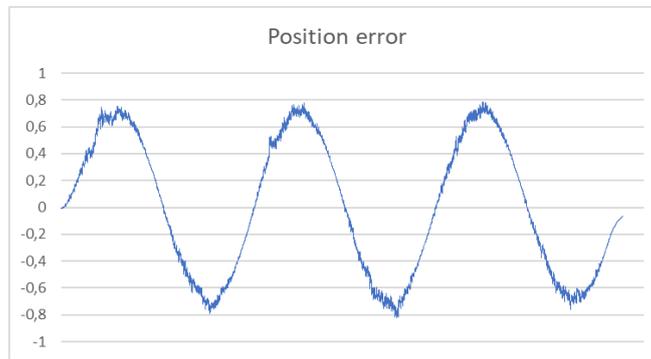
Las gráficas logradas mediante el compensador PI con valores de P:25 y I:2,5 son las siguientes:



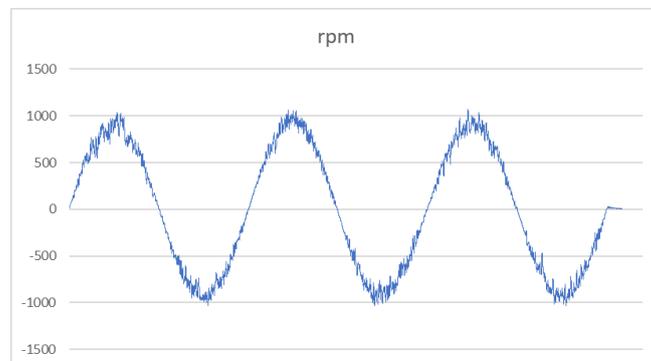
LIX-Consumo con compensador PI



LX-Posición con compensador PI



LXI-Error de posición con compensador PI



LXII-Velocidad de giro con compensador PI

Los datos logrados son los siguientes:

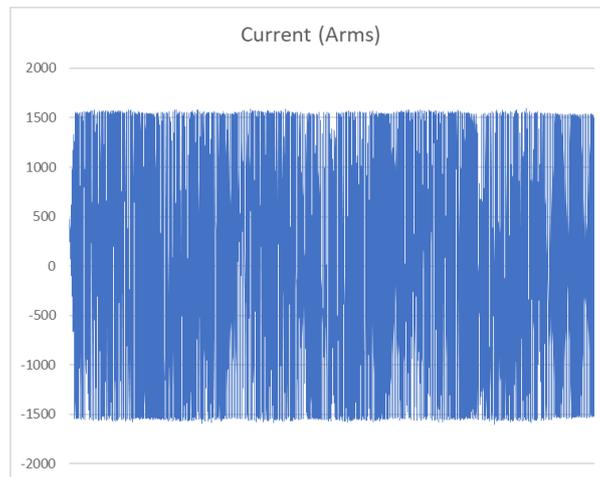
ERROR MEDIO	0,453 r
ERROR MÁXIMO	0,825 r

CONSUMO MEDIO	575,80 Arms
CONSUMO MÁXIMO	1589 Arms

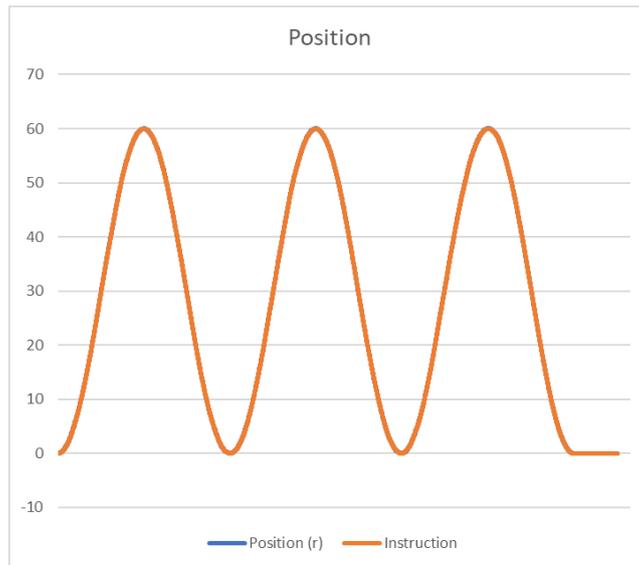
Los resultados de la prueba de PI con valores de componente proporcional e integral bajos han resultado en un error medio y máximo demasiado altos. Como se ha mencionado anteriormente, se ha definido el error máximo en 1 mm, o lo que es lo mismo, 0,2 revoluciones. Visto que el error supera ampliamente ese valor, se ha decidido subir el valor de los componentes PI.

130-15

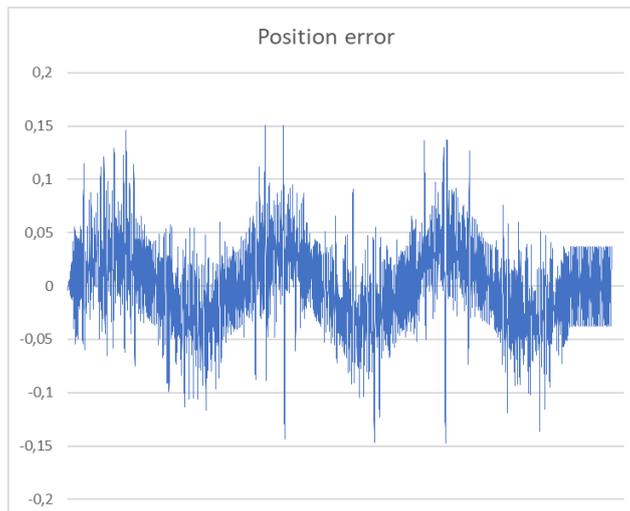
Las gráficas logradas mediante el compensador PI con valores de P:130 y I:15 son las siguientes:



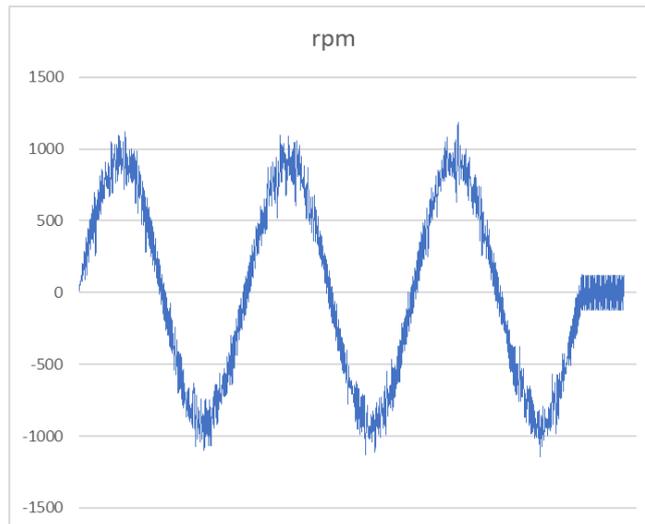
LXIII-Consumo con compensador PI



LXIV-Posición con compensador PI



LXV-Error de posición con compensador PI



LXVI-Velocidad de giro con compensador PI

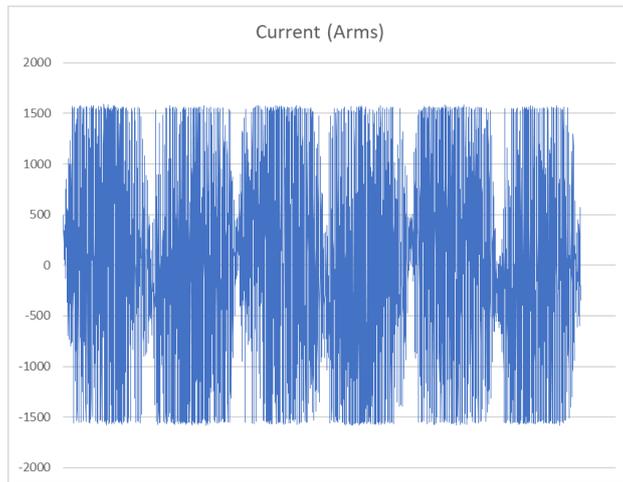
Los datos logrados son los siguientes:

ERROR MEDIO	0,031 r
ERROR MÁXIMO	0,150 r
CONSUMO MEDIO	988,92 Arms
CONSUMO MÁXIMO	1605 Arms

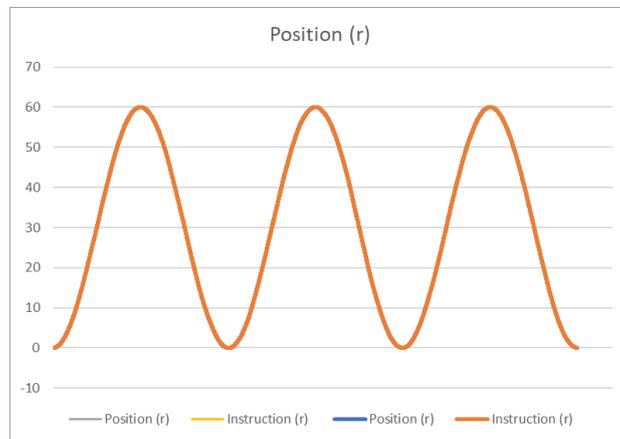
Los resultados obtenidos al subir los valores del componente PI, dejan claro que la subida ha sido excesiva, ya que, aunque la precisión es notable, siendo el error de posición muy bajo, hay dos problemas claros. El primero es el gran consumo que se ha dado en la prueba, casi duplicando la prueba con valores bajos. El segundo es la oscilación que se da al final de la prueba, cuando el demostrador no es capaz de llegar a la posición inicial y el controlador hace que oscile sin parar. Debido a esto, se ha optado por un valor de componente PI medio.

90-10

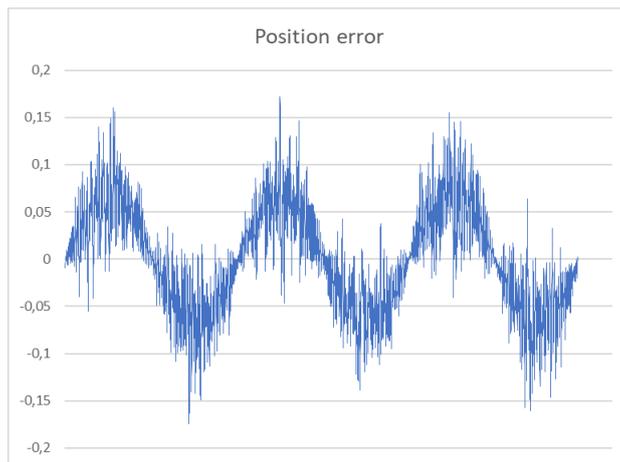
Las gráficas logradas mediante el compensador PI con valores de P:90 y I:10 son las siguientes:



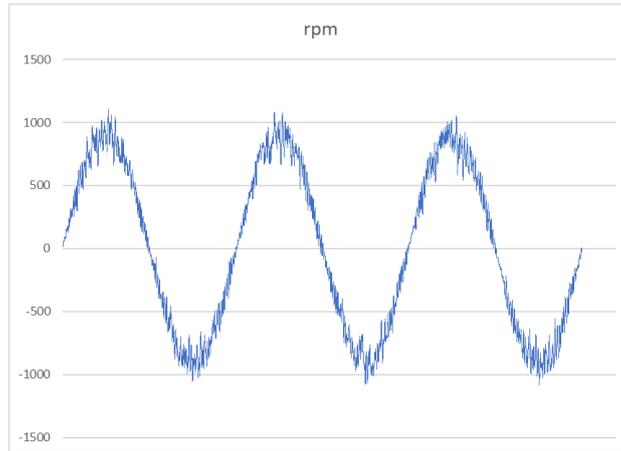
LXVII-Consumo con compensador PI



LXVIII-Posición con compensador PI



LXIX-Error de posición con compensador PI



LXX-Velocidad con compensador PI

Los datos logrados son los siguientes:

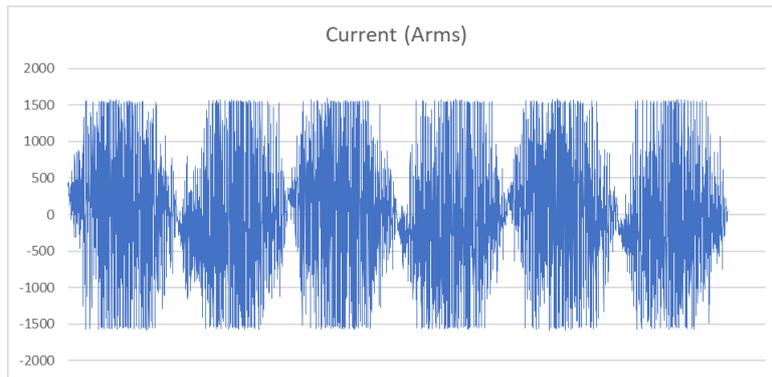
ERROR MEDIO	0,043 r
ERROR MÁXIMO	0,174 r
CONSUMO MEDIO	742,83 Arms
CONSUMO MÁXIMO	1595 Arms

Los valores PI con los que se han conseguido los mejores resultados han sido un valor proporcional de 90 y un valor integral de 10. Con estos valores, el error medio es de 0.21 mm, y el error máximo es de 0,87 mm, por lo que se ha considerado aceptable. El consumo es de 742 Arms de media, aceptable comparando el error y el consumo con las anteriores dos pruebas.

COMPENSADOR PI DIFUSO (1 ENTRADA)

Para llevar a cabo las pruebas con el compensador difuso de una entrada se han definido varios sistemas difusos, comenzando con un sistema difuso con tres funciones de pertenencia para ir haciendo pequeños cambios. Se han hecho pruebas con sistemas difusos aumentando el número de funciones de pertenencia y cambiando la forma de estas, mostrando los mejores resultados el sistema difuso descrito anteriormente.

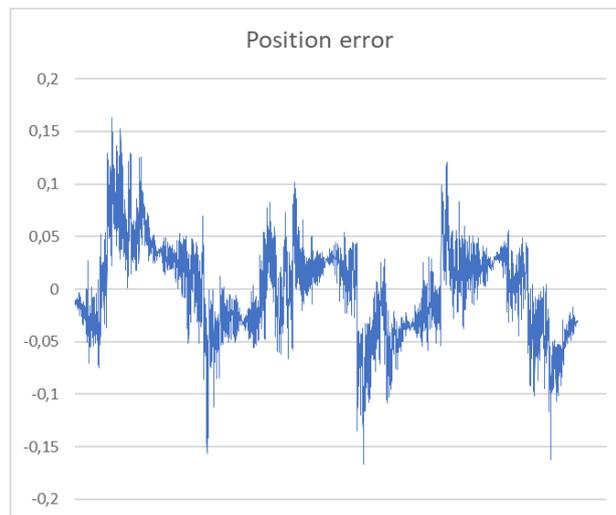
Las gráficas logradas mediante el compensador PI difuso de una entrada son las siguientes:



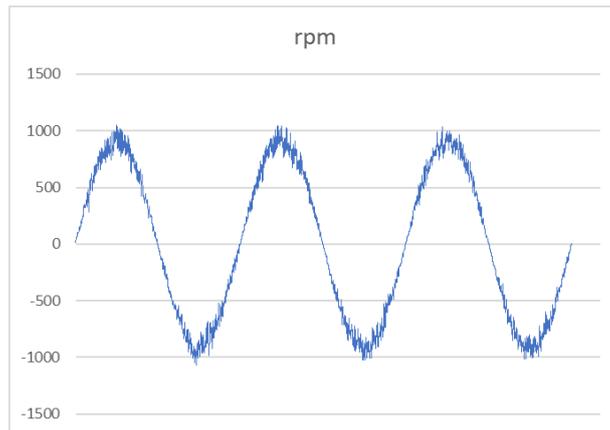
LXXI-Consumo con compensador difuso (1 entrada)



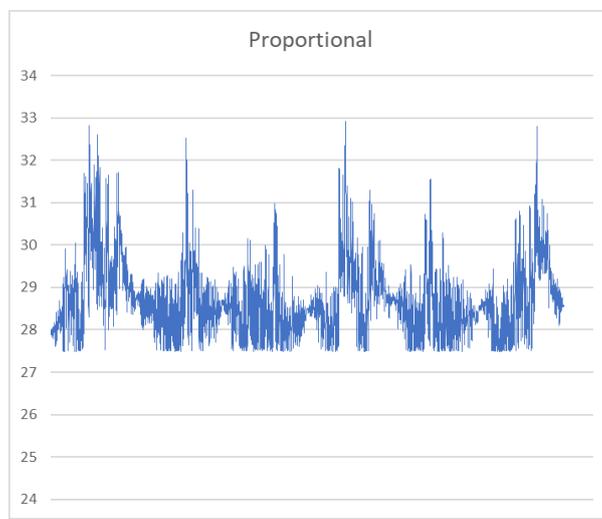
LXXII-Posición con compensador difuso (1 entrada)



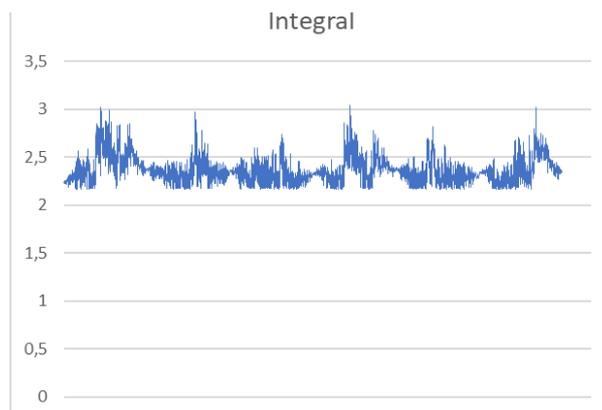
LXXIII-Error de posición con compensador difuso (1 entrada)



LXXIV-Velocidad de giro con compensador difuso (1 entrada)



LXXV-Componente proporcional con compensador difuso (1 entrada)



LXXVI-Componente integral con compensador difuso (1 entrada)

Los datos logrados son los siguientes:

ERROR MEDIO	0,034 r
ERROR MÁXIMO	0,166 r
CONSUMO MEDIO	569,18 Arms
CONSUMO MÁXIMO	1594 Arms
VALOR MEDIO COMP. PROPORCIONAL	28,69
VALOR MEDIO COMP. INTEGRAL	2,36

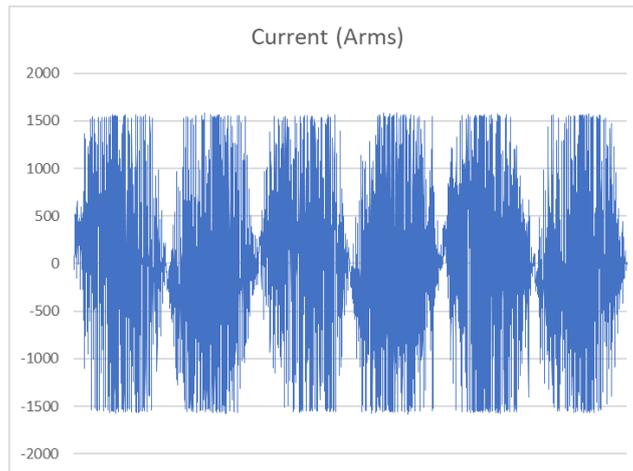
El compensador difuso PI ha demostrado gran eficiencia, reduciendo el consumo en un 23,4%, lo que implica un gasto menor y un menor consumo, siendo menos dañino para el medio ambiente. Además de esto, mediante este controlador se han reducido el error medio y el error máximo, dejando el primero en 0,17 mm y el segundo en 0,83 mm. De esta manera, el compensador PI ha demostrado ser una estrategia de control precisa y eficiente, mejorando mucho los niveles de consumo del controlador PI normal e incluso aumentando su precisión.

COMPENSADOR PI DIFUSO (2 ENTRADAS)

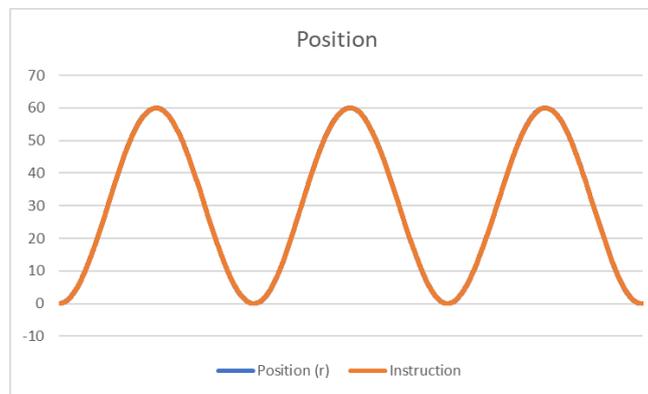
Para las pruebas con el compensador difuso de dos entradas, primero se ha diseñado el sistema difuso correspondiente a la entrada de consumo, que es muy parecido al sistema difuso correspondiente a la entrada de posición, con ligeros cambios para evitar el consumo alto. Una vez diseñado el sistema difuso, se han realizado pruebas con diferentes pesos. Comenzando con un peso del controlador difuso con entrada de consumo baja para ir aumentándolo poco a poco.

RELACIÓN PRECISIÓN-CONSUMO 80-20

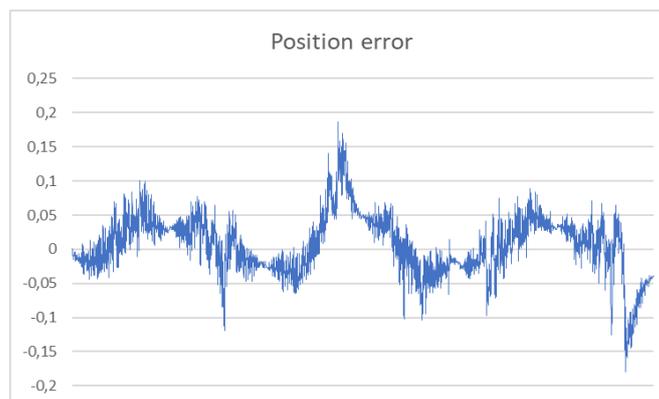
Las gráficas logradas mediante el compensador PI difuso de dos entradas con relación de 80-20 son las siguientes:



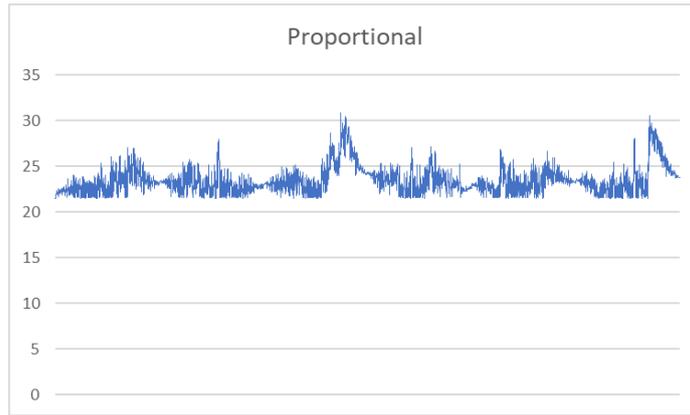
LXXVII-Consumo con compensador difuso (2 entradas)



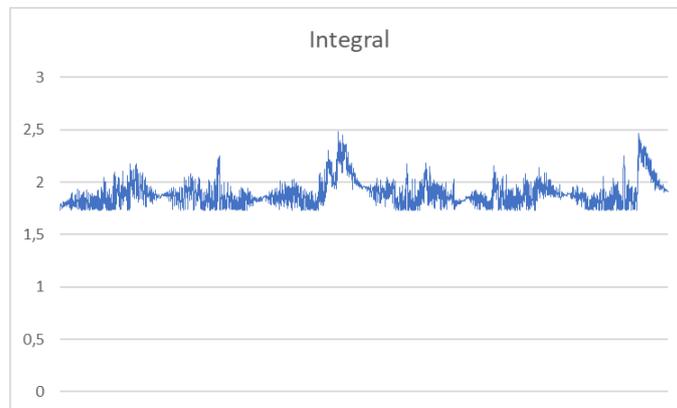
LXXVIII-Posición con compensador difuso (2 entradas)



LXXIX-Error de posición con compensador difuso (2 entradas)



LXXX-Componente proporcional con compensador difuso (2 entradas)



LXXXI-Componente integral con compensador difuso (2 entradas)

Los datos logrados son los siguientes:

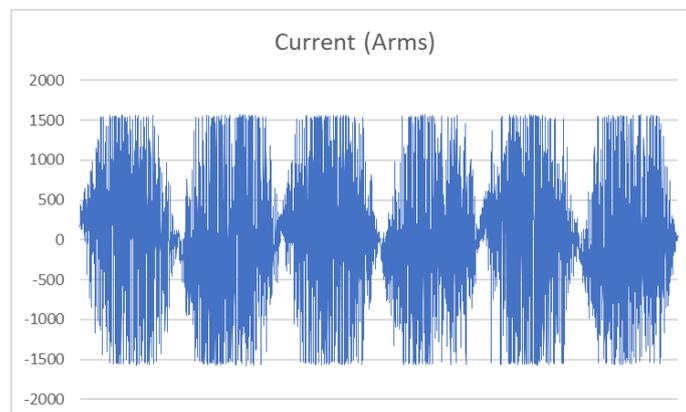
ERROR MEDIO	0,034 r
ERROR MÁXIMO	0,186 r
CONSUMO MEDIO	556,85 Arms
CONSUMO MÁXIMO	1583 Arms
VALOR MEDIO COMP. PROPORCIONAL	23,46

VALOR MEDIO COMP. INTEGRAL	1,88
----------------------------	------

El compensador difuso de dos entradas con relación 80-20 entre el compensador por posición y el compensador por consumo ha conseguido un error medio de 0,034 revoluciones, o lo que es lo mismo, 0,17 mm. Siendo este el mismo error medio que en el caso del compensador de una entrada. Sin embargo, como era de esperar, al tener menos peso la posición, el error máximo es un poco mas alto, de 0,93 mm, que, aunque está dentro del límite establecido, ya es un valor de error alto. Por otro lado, el fin de este compensador es bajar al máximo el consumo manteniendo el error en los límites previamente mencionados. Teniendo en cuenta esto, con un consumo medio de 556,85 Arms, el compensador PI difuso de dos entradas ha conseguido rebajar el consumo del compensador PI difuso de una entrada en un 2,2% extra, manteniendo el error máximo en el rango de 1mm y el error medio con el mismo valor que el compensador PI de una entrada.

RELACIÓN PRECISIÓN-CONSUMO 50-50

Las gráficas logradas mediante el compensador PI difuso de dos entradas con relación precisión-consumo de 50-50 son las siguientes:



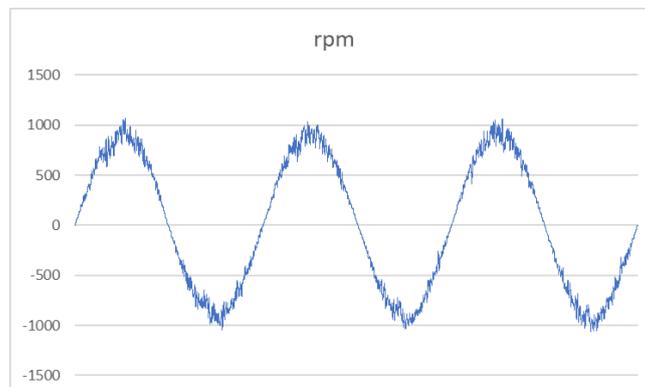
LXXXII-Consumo con compensador difuso



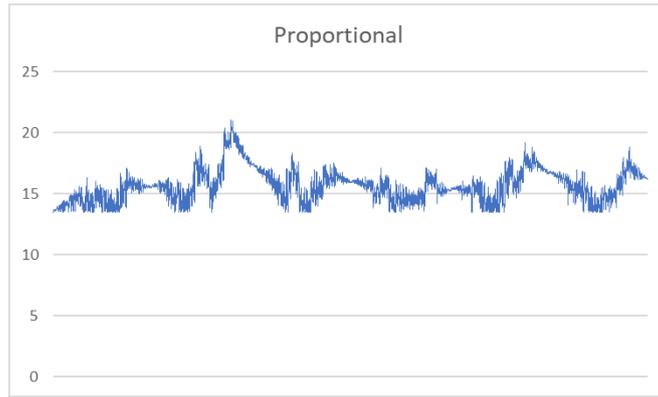
LXXXIII-Posición con compensador difuso



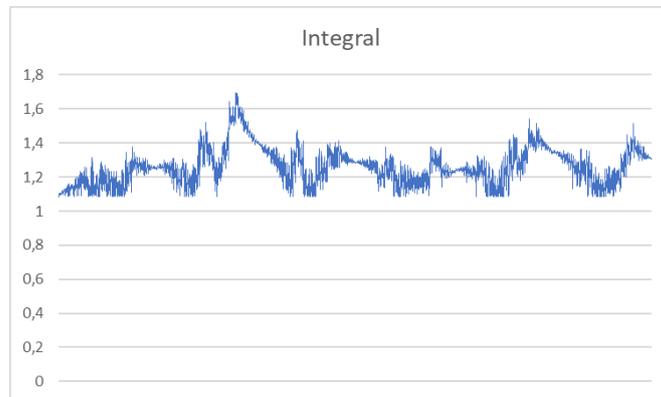
LXXXIV-Error de posición con compensador difuso



LXXXV-Velocidad con compensador difuso



LXXXVI-Componente proporcional con compensador difuso



LXXXVII-Componente integral con compensador difuso

Los datos logrados son los siguientes:

ERROR MEDIO	0,063 r
ERROR MÁXIMO	0,249 r
CONSUMO MEDIO	547,4 Arms
CONSUMO MÁXIMO	1585 Arms
VALOR MEDIO COMP. PROPORCIONAL	15,659
VALOR MEDIO COMP. INTEGRAL	1,259

Por último, con el fin de expresar los efectos del compensador PI difuso de dos

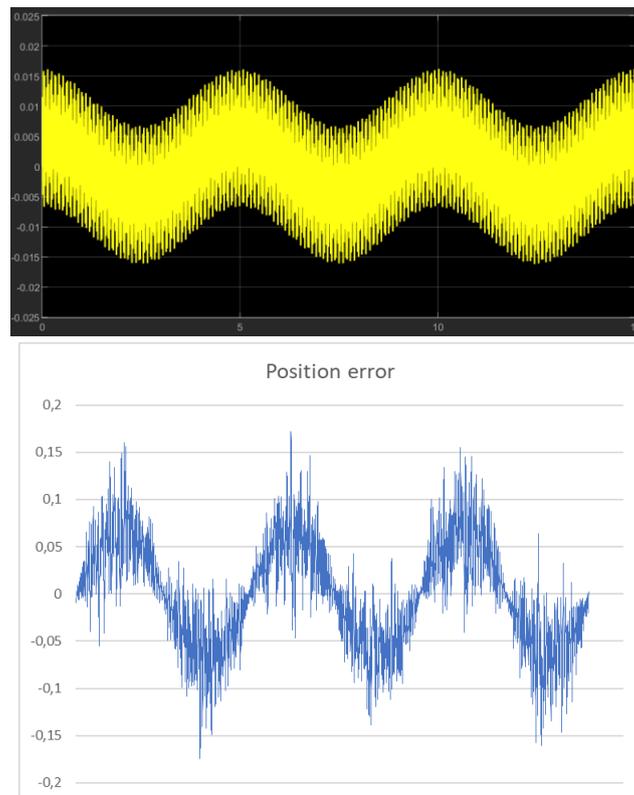
entradas, se ha subido el peso del compensador mediante consumo para estudiar los efectos que esto trae al control del demostrador. Se ha establecido un peso del 50% para cada compensador. Los resultados obtenidos, aunque demuestran que el compensador funciona como se esperaba, no entran en el rango de 1 mm de error establecido como máximo, por lo que se ha desechado esta posibilidad dentro de las estrategias de control. El error medio ha sido el doble de grande que con los compensadores difusos anteriormente mencionados, y el error máximo ha sido de 1,245 mm, superando el límite. Sin embargo, se ha comprobado como la subida de peso del compensador por consumo ha traído una bajada del consumo, que se ha visto reducido un 1,7% extra el consumo en comparación con el compensador de dos entradas con 20% de peso.

RESULTADOS COMPLETOS

	PI (25-2,5)	PI (130-15)	PI (90-10)	Difuso 1	Difuso 2 (80-20)	Difuso 2 (50-50)
Error medio	0,453 r	0,031 r	0,043 r	0,034 r	0,034 r	0,063 r
Error máximo	0,825 r	0,150 r	0,174 r	0,166 r	0,186 r	0,249 r
Consumo medio	575,8 Arms	988,92 Arms	742,83 Arms	569,18 Arms	556,18 Arms	547,7 Arms
Consumo máximo	1589 Arms	1605 Arms	1595 Arms	1594 Arms	1583 Arms	1585 Arms

CONCLUSIONES

De las pruebas efectuadas mediante el demostrador, se han derivado varias conclusiones, una vez analizados los resultados obtenidos con cada sistema de control. Primeramente, cabe destacar como viendo la comparación entre la simulación del controlador PI en Simulink y la prueba con el PI ajustado, el resultado, aunque no igual, es lo suficientemente aproximado como para tomar la simulación por buena, siendo la forma del error de posición el parámetro con el que más claro se ve esta similitud. Cabe resaltar también, que como en la simulación, en las pruebas reales el controlador también presenta un peor comportamiento en el momento en el que se introduce el componente derivativo.



LXXXVIII-Comparativa entre el error de posición simulado y el real

Por otro lado, si analizamos el comportamiento del compensador PI, observamos que el rendimiento que ofrece en cuanto a la precisión es muy bueno, ofreciendo una gran precisión. Sin embargo, cuanto más altos sean los valores de los componentes proporcional e integral, siendo el controlador más preciso, más alto es el consumo del motor, debido a los bruscos cambios de velocidad que se producen.

El sistema de control difuso de una entrada ha demostrado ser eficaz en cuanto a reducir el error que tenía el sistema PI, reduciendo tanto su error máximo como el

error medio. Además de esto, el controlador difuso de una entrada ha conseguido reducir el consumo del demostrador considerablemente, pasando de 742,83 Arms a 569,18 Arms. De esta manera, el controlador PI difuso de una entrada ha demostrado cumplir con solvencia los objetivos marcados, siendo un controlador eficiente y de gran versatilidad.

Por último, el controlador difuso de dos entradas ha conseguido reducir el consumo aún más, mientras mantiene el error en un rango aceptable. De esta manera, este controlador ha demostrado ser un controlador fiable en casos en los que sea necesario reducir el consumo manteniendo la precisión. Por otro lado, este controlador permite cambiar el peso de cada una de las entradas, por lo que, con este controlador, se puede regular el comportamiento del demostrador dependiendo de la necesidad de cada momento.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Auñamendi Eusko Entziklopedia. Fundación centro de tecnologías aeronáuticas. <https://aunamendi.eusko-ikaskuntza.eus/eu/fundacion-centro-de-tecnologias-aeronauticas-cta/ar-153667/>
- [2] Centro de tecnologías aeronáuticas. <http://ctaero.com/>
- [3] Pascual, J. V. (2021). Desarrollo de sistemas de control inteligente para utillaje aeronáutico (Doctoral dissertation, Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea).
- [4] Jantzen, J. (1998). Tuning of fuzzy PID controllers. Technical University of Denmark, Department of Automation, Bldg, 326.
- [5] Strietzel, R. (2000). Tuning of fuzzy controllers-an overview. IFAC Proceedings Volumes, 33(25), 313-318.
- [6] Nguyen, A. T., Taniguchi, T., Eciolaza, L., Campos, V., Palhares, R., & Sugeno, M. (2019). Fuzzy control systems: Past, present and future. IEEE Computational Intelligence Magazine, 14(1), 56-68.
- [7] Guney, E., & Demir, M. (2017, January). A comparative velocity control study of permanent magnet tubular linear DC motor by using PID and fuzzy-PID controllers. In 2017 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD) (pp. 390-395). IEEE.
- [8] Jang, J. O. (2001). A deadzone compensator of a DC motor system using fuzzy logic control. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 31(1), 42-48.
- [9] Yoo, B. K., & Ham, W. C. (2000). Adaptive control of robot manipulator using fuzzy compensator. IEEE Transactions on fuzzy systems, 8(2), 186-199.
- [10] Choi, Y. C., & Kim, C. H. (2007). CDP servo system control using fuzzy logic control. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 53(4), 1314-1321.