



Controlador Pid Dual Loop Auto-sintonizable para Regular la Posición de un Brazo Aerodinámico

Auto-tuneable Dual Loop Pid Controller for Adjusting Position of an Aerodynamic Arm

Miguel Monaco. miguel_monaco_6@hotmail.com / Código Orcid: 0000-0003-3458-393X
Universidad Privada Dr. Rafael Bellosó Chacín

Kenneth Rosillon. krosillon@urbe.edu.ve
Código Orcid: 0000-0003-0172-3828

Resumen

El objeto de esta investigación fue proponer un control PID Dual loop adaptativo auto-sintonizable para regular la posición de un brazo aerodinámico, que permita sobrellevar los problemas presentes en este tipo de sistemas con numerosas aplicaciones en la actualidad. Esta estuvo sustentada teóricamente por los autores Astrom y Wittenmark (2013) y Bobál, Bohm, Fessl y Machácek (2005), estos abarcan cada parte del procedimiento aplicado. Esta investigación se considera del tipo descriptiva no experimental, como consecuencia de no haber modificado ninguna estructura previamente existente; se encuentra fundamentada bajo la línea de investigación de control y automatización de procesos, en la temática de control de procesos. Así mismo, no se estudió en base a una población y muestra, pues el sistema está dado por una única unidad de análisis la cual es el prototipo de brazo aerodinámico. Los resultados obtenidos por medio de la respuesta de salida, así como en las pruebas tanto de perturbación como de cambio de referencias, mostraron que la estrategia de control presentó dificultades para responder ante dichas condiciones, además de no alcanzar el valor de referencia asignado, esto ocasionado por la dificultad en calcular de manera automática la sintonización de sus parámetros.

Palabras claves: PID, PID Dual loop, adaptativo, autosintonizable, control.

Abstract

The aim of this research was to propose a self-tuneable adaptive PID Dual loop control to regulate the position of an aerodynamic arm, which allows to overcome the problems present in this type of systems with numerous applications today. This was theoretically supported by the authors Astrom and Wittenmark (2013) and Bobál, Bohm, Fessl and Machácek (2005), these cover each part of the applied procedure. This research is considered of the non-experimental descriptive type, as a consequence of not having modified any previously existing structure; It is based on the research line of process control and automation, on the subject of process control. Likewise, it was not studied based on a population and sample, since the system is given by a single unit of analysis which is the prototype of the aerodynamic arm. The results obtained through the output response, as well as in the tests of both disturbance and change of references, showed that the control strategy presented difficulties in responding to these conditions, in addition to not reaching the assigned reference value, this caused by the difficulty in automatically calculating the tuning of its parameters.

Keywords: PID, PID Dual loop, adaptive, self-tuning, control.



Introducción

Los sistemas de control están presentes y son de suma importancia en la sociedad moderna, con numerosas aplicaciones en muchas áreas de la ingeniería. Con el fin de encontrar nuevas estrategias para solucionar problemas cada vez más complejos o simplemente mejorar el rendimiento y la eficiencia de existentes, continuamente se han realizado investigaciones con la ayuda de nuevas tecnologías emergentes. Una variable controlada muy estudiada es la posición angular presente en múltiples sistemas de diferentes áreas.

En los últimos años se han realizado a nivel mundial investigaciones donde se implementan estrategias de controladores para estabilizar la posición angular en diferentes tipos de sistemas como servomotores, pieza clave para el correcto funcionamiento de equipos robóticos. Además de estar presente en los estudios de control de dispositivos, tanto aerodinámicos como aeroespaciales, para cumplir con la finalidad de que estos se posicionen en una dirección deseada. Al mismo tiempo, en la región Latinoamericana se han utilizado plataformas experimentales para el análisis de dicha variable, con fines educativos y de investigación.

Ahora bien, los problemas que se presentan comúnmente en la regulación de posición angular, utilizando controladores PID, son: a) dificultad para alcanzar el valor deseado; b) respuestas oscilatorias; c) cambios en modelo matemático; y d) tendencia a la inestabilidad al realizar cambios en el valor de referencia. Estos problemas son causados por las no linealidades del sistema, las perturbaciones presentes en el ambiente donde operan los dispositivos, así como el desgaste de sus componentes. Es decir, que dicha estrategia no resulta suficiente para cumplir con el objetivo. Por consiguiente, para regular la posición angular de un sistema de manera rápida y eficiente, considerando la deficiencia y los inconvenientes planteados, se debe optar por una estrategia más avanzada o un mejor algoritmo del controlador PID clásico.

Objetivo General

Proponer un Controlador Pid Dual Loop Auto-sintonizable para Regular la Posición de un Brazo Aerodinámico.

Objetivos Específicos

Describir el funcionamiento de un brazo aerodinámico.

Modelar matemáticamente el brazo aerodinámico.

Diseñar el control PID Dual loop adaptativo auto-sintonizable para regular la posición de un brazo aerodinámico.

Evaluar el brazo aerodinámico en el control diseñado.

Metodología

Esta investigación se consideró descriptiva ya que se buscó especificar las características del comportamiento de la respuesta de la variable controlada del brazo aerodinámico, estudiando la presencia de máximos y mínimos sobrepasos error de estado estable, así como tiempo de estabilización del controlador PID Dual loop auto-sintonizable al someterlo a un análisis; adicionalmente se realizaron pruebas de perturbaciones y cambio de referencia. En ese sentido, Arias (2012, p.24) explica que “la investigación descriptiva consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento”.

Por otro lado, el presente estudio se considera de diseño no experimental, pues se trabajó la estrategia de control auto-sintonizable sin realizar cambios en la estructura del controlador como tal; este ya estaba previamente establecido en las bibliografías manejadas. Para Hernández, Fernández y Baptista (2014) la investigación de diseño no experimental es la que se realiza sin manipular deliberadamente variables. Es decir, se trata de estudios donde no se hace variar en forma intencional las variables independientes para ver su efecto sobre otras variables.

Cabe destacar, que esta investigación no se realizó con base en población y muestra, pues estuvo definida por una única unidad de análisis. Al respecto, Hurtado (2015) establece que la unidad de análisis está referida al contexto, al ser o entidad poseedora de la característica, evento, cualidad o variable a estudiar. La unidad de análisis de la presente investigación, está representada por una plataforma experimental de brazo aerodinámico, el proceso a controlar, el cual se estudiara de manera directa.

Los instrumentos de recolección de datos según Arias (2012, p.68) “es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información obtenida”. Para este caso, se utilizó un cuaderno de notas para registrar los valores que no fueron estimados por el programa utilizado, por lo cual estos debieron ser observados directamente de la señal obtenida. Por otra parte, se emplearon las librerías de las gráficas del comportamiento variable controlada con respecto al tiempo, generadas en el software y almacenada en la memoria de una computadora.

Fundamentación Teórica

PID Dual loop

El PID Dual loop que se presenta en la Figura 1, es un controlador que produce una señal de control de proceso en respuesta a una señal de variable de proceso, y una señal de referencia. La señal de la variable del proceso se resta de la señal referencia para producir una señal de diferencia, se produce una señal representativa de la derivada de la variable del proceso. En un bucle interno, la señal del punto de ajuste y la señal de diferencia, así como la señal derivada se amplifican por las respectivas ganancias ajustables.

En un bucle externo, la señal variable de proceso y la señal derivada se amplifican por las respectivas ganancias ajustables y la señal de diferencia está integrada. Las señales amplificadas e integradas se combinan aplicándose a otra ganancia ajustable para producir una señal de salida del bucle externo (De Santis, 1994).

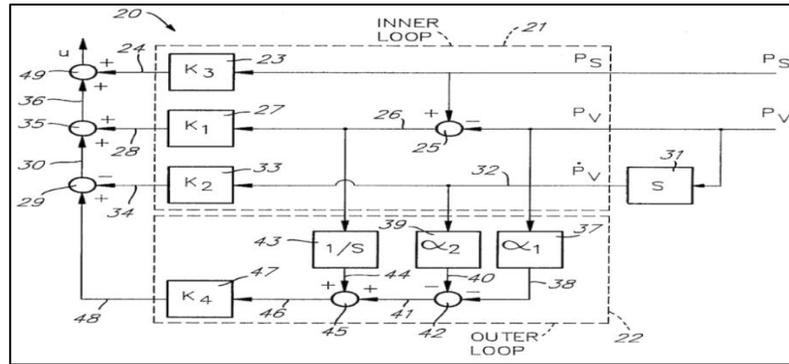


Figura 1. Estructura del PID Dual loop
Fuente: De Santis (1994)

En cuanto al punto de referencia amplificado, las señales de diferencia y derivadas, y la señal de salida del bucle externo, se combinan finalmente para producir la señal de control del proceso. Las ganancias del bucle interno afectan las características de entrada/salida del controlador y las ganancias del bucle externo la sensibilidad del controlador a las perturbaciones. Además, el ajuste de la sensibilidad a través de las ganancias del bucle externo no cambia las características de entrada/salida del controlador que se han ajustado previamente por medio de las ganancias del bucle interno.

$$U(s) = K_1(P_s(s) - P_v(s)) - SK_2P_v(s) + K_3P_s(s) + K_4 \left[\frac{P_s(s) - P_v(s)}{s} - \alpha_1P_v(s) - \alpha_2sP_v(s) \right] \quad (1)$$

De este modo, el PID Dual loop representa una versión más avanzada del PID clásico, el cual permite separar los efectos del estado transitorio y estado estable en el ajuste de los parámetros tanto derivativo como integral. A diferencia de su antecesor, este requiere una entrada adicional, la cual viene dada por la variable controlada del proceso cabe destacar que la componente derivativa viene en función de esta última y no del error del sistema.

Controlador auto-sintonizable

El desarrollo de un sistema de control involucra muchas tareas tales como modelado, diseño de una ley de control, implementación y validación. El regulador de autoajuste (STR) intenta automatizar varias de estas tareas; esto se ilustra en la Figura 2 donde muestra un diagrama de bloques de un proceso con un regulador de autoajuste. Se supone que se especifica la estructura de un modelo de proceso (Astrom y Wittenmark, 2013).

Los parámetros del modelo del proceso se estiman en línea, por medio del bloque etiquetado como "Estimación", el cual puede observarse en la Figura 2. Este bloque es un estimador recursivo del bloque denominado "Diseño del controlador" que contiene los cálculos necesarios para realizar un diseño de un controlador con un método específico y unos pocos parámetros de diseño que se pueden elegir externamente. Según Åstrom y Wittenmark (2013), el bloque denominado "Controlador" es una implementación del controlador cuyos parámetros se obtienen del diseño de control.

Para culminar, Astrom y Wittenmark (2013) definen el controlador auto-sintonizable como aquel que tiene la capacidad de realizar una estimación del modelo matemático del proceso en tiempo real, así calcular los parámetros de la ley de control en función de este. Esto permite sobrellevar cualquier cambio en las condiciones del sistema las cuales puedan ocurrir durante su funcionamiento, siendo una estrategia más confiable.

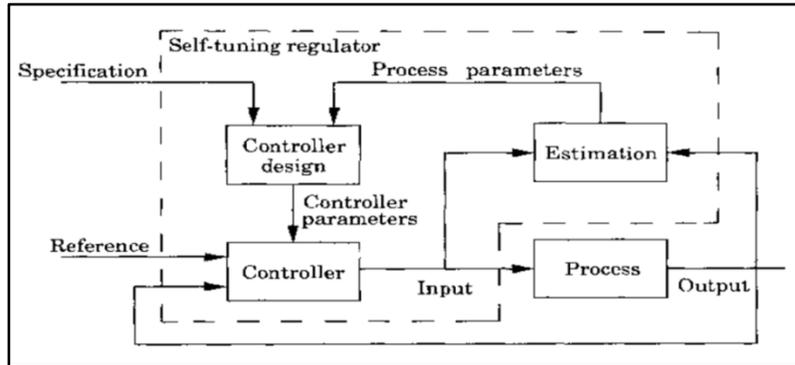


Figura 2. Control auto-sintonizable
Fuente: Astrom y Wittenmark (2013)

El enfoque descrito anteriormente implica la estructura algorítmica interna del controlador de autoajuste que se muestra esquemáticamente en la Figura 3. La separación forzada de la identificación y el control divide la estructura del controlador interno en partes para la identificación y el control, que solo se conectan a través de la transferencia de las estimaciones del parámetro del punto $\hat{\Theta}(k)$. Para Bobál, Bohm, Fessl y Machacek (2005), la estimación recursiva de los parámetros del modelo de proceso se lleva a cabo en la parte de identificación y se usa para predecir el valor $\hat{y}(k)$ de la salida del proceso $y(k)$.

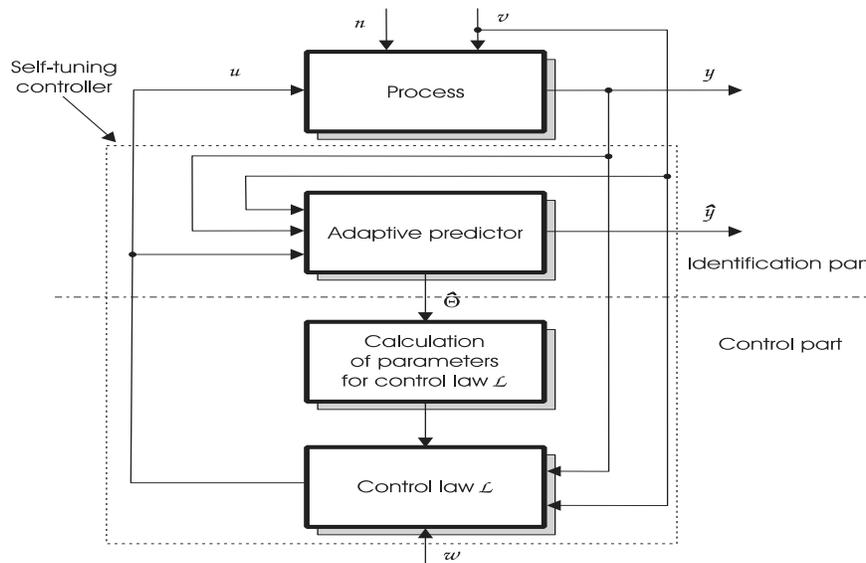


Figura 3. Algoritmo del control auto-sintonizable
Fuente: Bobál et al. (2005)

La parte de control contiene un bloque para calcular los parámetros de control (ley de control L) utilizando las estimaciones de parámetros del modelo de proceso $\hat{\Theta}(k)$. Los parámetros de control sirven para calcular el valor de la salida del controlador $u(k)$ para cada período de muestreo. A pesar de que ciertas condiciones específicas se aplican a la síntesis del control, puede afirmar que donde la identificación funciona bien, la síntesis puede llevarse a cabo utilizando algoritmos conocidos como los del diseño de asignación de polos, el control de latido muerto, el control de varianza mínima, control cuadrático lineal y métodos de síntesis digital para controladores PID (Bobál et al. 2005).

Resultados

Plataforma experimental o brazo aerodinámico

Para el desarrollo de la investigación se trabajó con una plataforma experimental denominada brazo aerodinámico, el cual representa un sistema de control de una salida y una entrada (SISO) de un solo lazo; cabe destacar que este presenta un comportamiento aerodinámico. Entre los componentes del sistema destacan el controlador, el actuador, la retroalimentación y el proceso a controlar. En la Figura 4 se indican la ubicación física de los elementos del sistema.

El sistema de brazo aerodinámico mostrado en la Figura 4, elaborado por Mónaco, Labarca y Corneiles (2017), consta de una estructura de madera y una serie de dispositivos; así mismo presenta un grado de libertad en el eje X. En primer lugar se tiene la barra horizontal que representa el proceso a controlar, cuya posición es medida con el transportado y retroalimenta con un potenciómetro que se encuentra en la parte superior de la barra vertical. En cuanto a la base, allí están situados el controlador, el circuito amplificador, así como la fuente de 12V. Finalmente, los ventiladores fan-coolers se encuentran en los extremos del sistema; estos representan el elemento final de control.

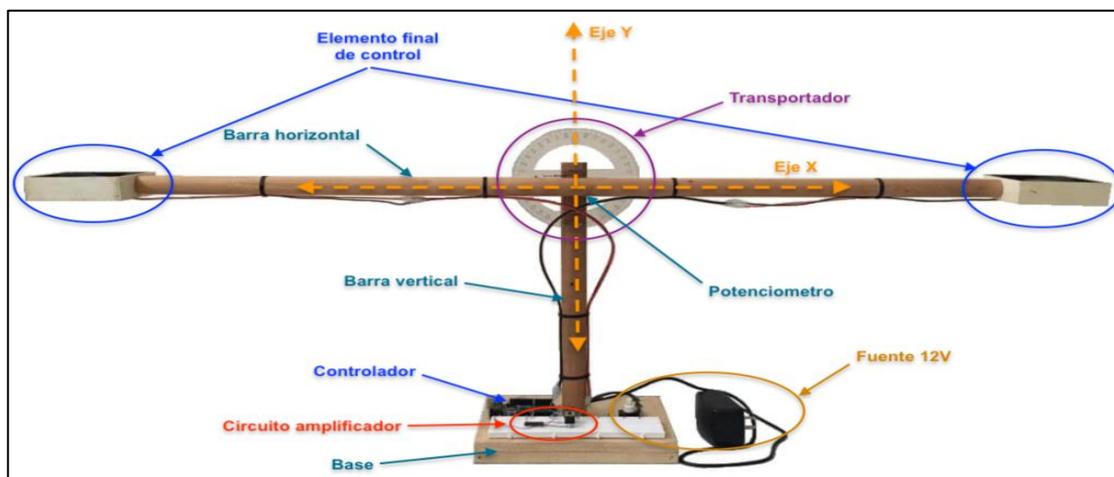


Figura 4. Sistema de brazo aerodinámico

Fuente: Adaptado de "Implementación de algoritmos de control para un brazo aerodinámico utilizando controladores del tipo PID", de Mónaco, Labarca y Corneiles, 2017, p. .

En el Cuadro 1 se muestran las dimensiones más destacables del brazo aerodinámico, así como las medidas de cada parte de la estructura de madera del brazo aerodinámico expresadas en centímetros. Cabe considerar, que las dimensiones de la base fueron seleccionadas de tal manera, que los circuitos electrónicos utilizados pudieran colocarse sobre ella sin inconvenientes y facilitar las conexiones entre los elementos. En cuanto a las barras, sus longitudes permitieron una libertad de movimiento de 75° antes de tocar la superficie, de manera que pudo imitar el desplazamiento angular realizado por los vehículos aéreos de doble hélice.

Cuadro 1
Dimensiones del brazo aerodinámico

Estructura de madera	
Parte	Dimensiones (cm)
Barra horizontal	Longitud: 83 Radio:1
Barra vertical	Longitud: 33.2 Radio:1.2
Base	Altura: 2.5 Largo: 19.5 Ancho: 16.5

Fuente: Elaboración propia (2018)

Los elementos del sistema de control de comportamiento eléctrico son el actuador y el controlador. Como se muestra en el Cuadro 2, los niveles de corriente y voltaje del controlador fueron inferiores a los requeridos por el elemento final de control para funcionar a máxima capacidad. Debido a esto se interconectaron ambas partes por medio de un circuito amplificador, este permitió elevar estos parámetros, el cual a su vez, requirió de una fuente de polarización externa de al menos 12V para realizar dicha función.

Las dimensiones físicas de la plataforma experimental expuesta influyeron en la estructura del modelo matemático, además de sus constantes. Sin embargo, no fueron consideradas directamente, pues la función de transferencia del proceso se obtuvo por medio de métodos paramétricos y no paramétricos, con una data de salida adquirida de manera experimental. De igual forma, las condiciones eléctricas mencionadas las cuales indican los niveles máximos de entrada y salida de cada elemento, actuaron en forma de saturación en el sistema.

Cuadro 2
Condiciones eléctricas de los elementos del sistema

Condiciones eléctricas		
Parámetro eléctrico	Controlador	Elemento final de control
Voltaje de entrada	5V	12V
Voltaje de salida	5V	-
Corriente de entrada	40mA	0.15A
Corriente de salida	40mA	-

Fuente: Elaboración propia (2018)

En el diagrama de bloque de la plataforma experimental de brazo aerodinámico mostrado en la Figura 5, se indican las variables presentes en el sistema; estas corresponden a la salida y entrada de cada etapa. El valor de referencia viene dado por un valor constante o función matemática, su valor se refiere a posición angular deseada.

La función de transferencia, obtenida por el método de Strejc, descrito por Cuenca (2015), resultado de orden 3 (tres) más retardo, incluyendo el elemento final de control y el proceso como tal, además se indicó el retardo. La variable controlada se calculó aplicando el teorema de Pitágoras, pero debido a que para cada arco tangente existen 2 (dos) posibles resultados con 180° de diferencia entre si y el bloque “atan” arrojó el menor de los resultados fue necesario sumar 180° en la salida.

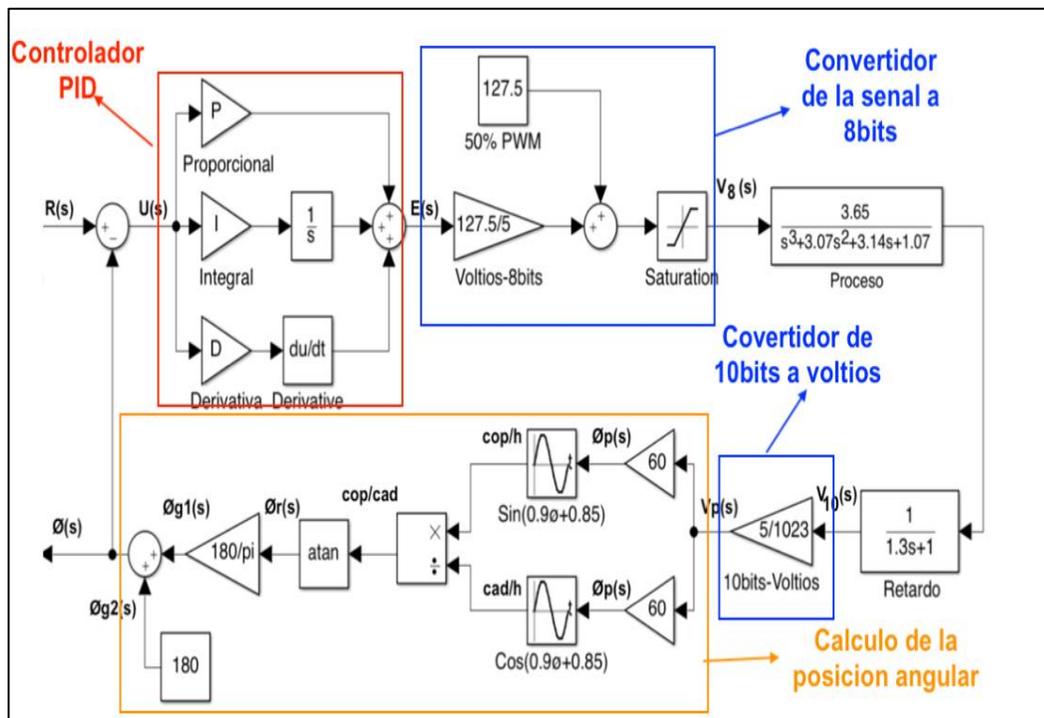


Figura 5. Diagrama de bloque de la plataforma experimental de brazo Aerodinámico. Fuente: Elaboración propia (2018)

En el Cuadro 3, se indican todas las variables presentes en el sistema. Un detalle por considerar, son las diferentes escalas para una misma variable, como lo es el caso de las respuestas de control y retroalimentación. Esto se debe a los tipos de señales requeridos por los puertos de salida digitales, así como los voltajes recibidos en los analógicos en las cuales son convertidos. El resto, son muy comunes en los sistemas de control, la posición angular fue el objeto de estudio de la investigación.

Cuadro 3
Variables del sistema de control

Variable	Descripción	Rangos
$R(s)$	Valor de referencia (posición angular deseada)	141 a 218
$E(s)$	Señal de error	-77 a 77
$U(s)$	Señal de control (corresponde a un nivel de voltaje)	-5 a 5
$V_8(s)$	Voltaje de la señal de control (llevado a una escala de 8bits)	0 a 255
$V_{10}(s)$	Voltaje del potenciómetro (en una escala de 10bits)	0 a 1024
$V_p(s)$	Voltaje del potenciómetro (en escala decimal)	0 a 5
$\emptyset p(s)$	Angulo del potenciómetro	-1 a 1
cop/h	Cateto opuesto sobre hipotenusa	-1 a 1
cad/h	Cateto adyacente sobre hipotenusa	-1 a 1
cop/cad	Cateto opuesto sobre cateto adyacente	-1 a 1
$\emptyset r(s)$	Posición angular en radianes	0- 2π
$\emptyset g1(s)$	Posición angular menos 180°	0-360
$\emptyset g2(s)$	180° constante	0-360
$\emptyset(s)$	Posición angular del sistema	141-218

Fuente: Elaboración propia (2018)

Modelado matemático del brazo aerodinámico

Cabe señalar, que la plataforma experimental o brazo aerodinámico tiene como variable controlada el voltaje generado por la tarjeta electrónica por medio de una señal PWM. Por otro lado, la variable controlada está dada por la posición angular en grados de la barra horizontal la cual es medida con un transportador. En el Cuadro 4 se indican rango total de trabajo, así como sus respectivas unidades.

Como se puede observar en el mismo Cuadro 4, en el caso de las variables controlada existe un valor máximo de posición que la barra horizontal puede alcanzar, antes de chocar con el terreno donde está colocada la plataforma experimental. En cuanto a la manipulada, esta no posee ningún impedimento para alcanzar sus niveles de operación, sin embargo, se establece un rango de trabajo permitiendo mantener los grados de salida sin tocar la superficie.

Cuadro 4
Variables del sistema

Variables	Símbolo	Mínimo	Máximo	Rango de trabajo	Unidad física
Variable manipulada	V	0	5	2-3.9	Voltios
Variable controlada	\emptyset	138	220	141-218	Grados

Fuente: Elaboración propia (2018)

Para realizar la identificación del modelo matemático del proceso se trabajó con el sistema a lazo abierto (Cuenca, 2015), eliminando tanto el controlador como la retroalimentación presente. Seguidamente, se aplicó una entrada escalón con el fin de obtener una serie de curvas en S que se encuentran dentro del rango de trabajo de la variable controlada y utilizarlas para hacer una aproximación de la función de transferencia a través de métodos paramétricos ARX, ARMAX, OE y BJ.

En el diagrama del sistema en Simulink presentado en la Figura 6, se puede observar la parte digital dentro del Arduino Uno, la cual abarca el envío y recepción de datos. Así mismo, se encuentran los traductores de señales de 8bits y 10bits, utilizadas tanto en el puerto de entrada como el de salida de la tarjeta electrónica respectivamente. Por otro lado, se tiene un subsistema que permite convertir los valores de voltajes en la posición en grado correspondiente. Finalmente, la variable controlada y la función aplicada son registradas en Matlab por medio de los bloques de Workspace, donde con la herramienta “ident” se realizará la identificación paramétrica.

Primeramente, se realizaron una serie de pruebas en las que se aplicó una función escalón con distintos valores en la entrada del proceso, con la finalidad de obtener en la salida una serie de curvas en S, las que describen el comportamiento del sistema, tanto en el rango total de operación como en cada parte de este. Los datos adquiridos fueron registrado en workspace en formato “Array”.

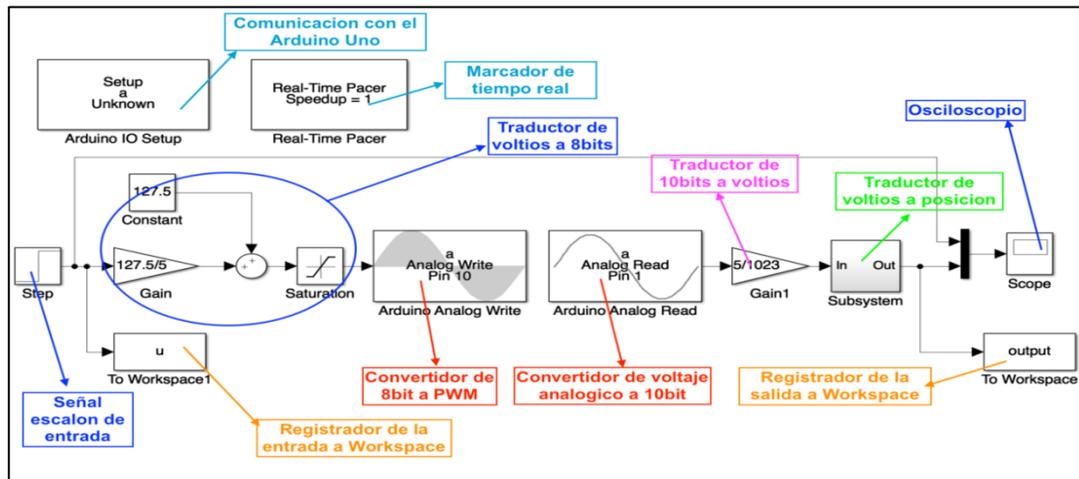


Figura 6. Diagrama del sistema en Simulink
Fuente: Elaboración propia (2018)

Analizando la Figura 7, se puede notar que al aplicar el escalón de -1 a 0, la plataforma experimental realizó un cambio desde una posición inicial de 144° hasta una final de 158°. Un aspecto por considerar es que la señal presenta muchas oscilaciones, las cuales no forman parte del comportamiento del sistema, las cuales son ocasionadas por el ruido generado por la tarjeta Arduino Uno descrito por Blum (2013). Para la curva en S y facilitar su análisis, se utilizó un alisador a través del comando “smooth()” de Matlab. El mismo procedimiento se aplicó para el resto de las datos obtenidas para los rangos de 158°-180°, 175°-190°, 190°-200° y 200°-216°.

Seguidamente, se utilizó el toolbox de Matlab “System identification”, así como la orientación del manual de usuario de MathWorks inc (2018), para obtener una aproximación del modelo matemático por medio de los métodos ARX, ARMAX, OE y BJ. Para realizar esta estimación, fueron requeridas 2 (dos) de las 3 (tres) señales adquiridas, una destinada al modelado y otra para validación. De igual manera, para cada método se fue variando el orden hasta lograr el mayor porcentaje de ajuste posible en cada método paramétrico.

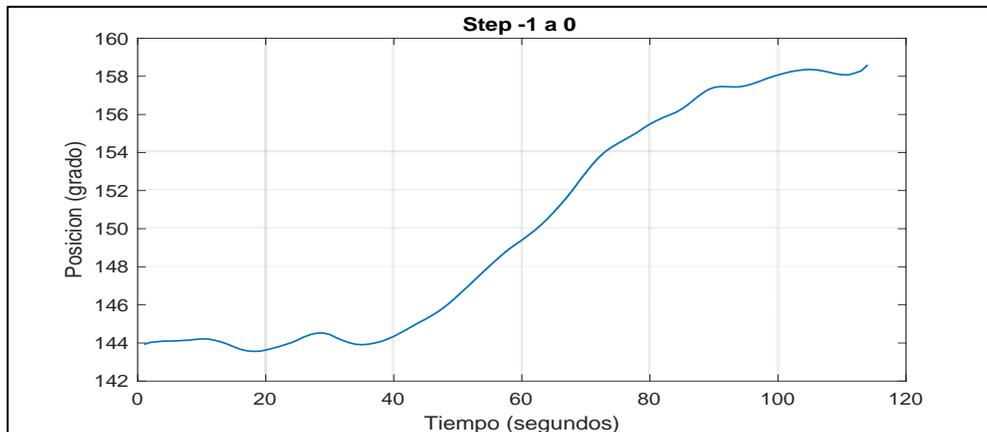


Figura 7. Respuesta de salida del primer step con filtro
Fuente: Elaboración propia (2018)

En el Cuadro 5 se resumen los resultados obtenidos por los métodos paramétricos en cada rango del sistema. En el caso de OE resultó aproximadamente de 90%. Sin embargo, las graficas de auto correlación de este último se encuentran parcial o totalmente fuera del rango de confiabilidad, indicando que muchas muestras no fueron consideradas en la estimación del modelo y por lo tanto no es recomendable utilizarlo. Ahora, en cuanto a los resultados arrojados por BJ se obtuvo una mejor aproximación de la función de transferencia con porcentaje de ajuste mayor de 90%, a diferencia de las demás pruebas. En la mayoría de los casos con el método paramétrico se obtuvo una función de transferencia de orden 3.

Cuadro 5
Resultado de los modelos paramétricos

Método	Rango	Orden	Ajuste	Método	Rango	Orden	Ajuste
ARX	144-158	211	72.14	OE	144-158	241	32.82
	158-180	311	78.32		158-180	331	93.68
	175-190	201	61.7		175-190	231	85.79
	190-200	132	61.03		190-200	231	91.35
	200-216	442	75.87		200-216	231	91.77
ARMAX	144-158	2221	73.63	BJ	144-158	11243	94.68
	158-180	3332	79.59		158-180	30131	93.19
	175-190	2211	57.92		175-190	30131	92.97
	190-200	1111	55.59		190-200	31131	90.6
	200-216	4421	74.68		200-216	30131	92.75

Fuente: Elaboración propia (2018)

Al mismo tiempo, se puede observar una similitud entre varias funciones de transferencia obtenidas considerando sus estructuras, parámetros y orden. Por lo tanto, con la finalidad de reducir la cantidad de modelos matemáticos de cada rango de la variable controlada del sistema, se reconoce una única estructura para los casos en que se considere similar, la cual correspondería a cambio de posición de 158° a 218°.

Como se indica en el Cuadro 6, la cantidad de funciones de transferencia, las cuales se han reducido a solamente a 2, representan el comportamiento de rango de operación de la variable que controla del sistema. El nuevo modelo matemático obtenido presenta el mismo orden de las que sustituye, así como una estructura y parámetros similares. De esta manera se aprecian las no linealidades presentes la plataforma experimental.

Cuadro 6

Nuevo grupo de funciones de transferencia del sistema

Posición (grados)	Box-Jenkins		
	Orden	Ajuste (%)	Función de transferencia (B(z)/F(z))
144 a 158	11243	94.68	$\frac{0.006491z^{-3}}{1 - 3.014z^{-1} + 3.194z^{-2} - 1.336z^{-3} + 0.1566z^{-4}}$
158 a 218	30131	96.69	$\frac{0.2606z^{-1} - 0.5631z^{-2} + 0.3247z^{-3}}{1 - 2.848z^{-1} + 2.707z^{-2} - 0.858z^{-3}}$

Fuente: Elaboración propia (2018)

Control PID Dual Loop Adaptativo Auto-Sintonizable

Para sobrellevar las variaciones del modelo matemático para rangos de la variable de salida, se desarrolló un controlador PID Dual loop auto-sintonizable. Para ello se utilizó la librería de Simulink "STCSL standard", elaborada por Bobál et al. (2005), el cual contiene una serie de bloques con distintos métodos de identificación de funciones de transferencia de segundo o tercer orden, así como diferentes leyes de control. Para este caso se sustituyó la estructura del PID clásico por la del PID Dual loop. En la Figura 8 se muestra su esquema de control y los cambios realizados.

Como se mencionó anteriormente, el sistema es similar al de Bobál et al. (2005), con la diferencia de que mientras se conserva el bloque "identification" intacto, la estructura del bloque del controlador ha sido reemplazado por la correspondiente ley de control del PID Dual loop. Por otra parte, las respuestas de la variable controlada, manipulada y de referencia se registran en el Workspace de Matlab para su posterior análisis.

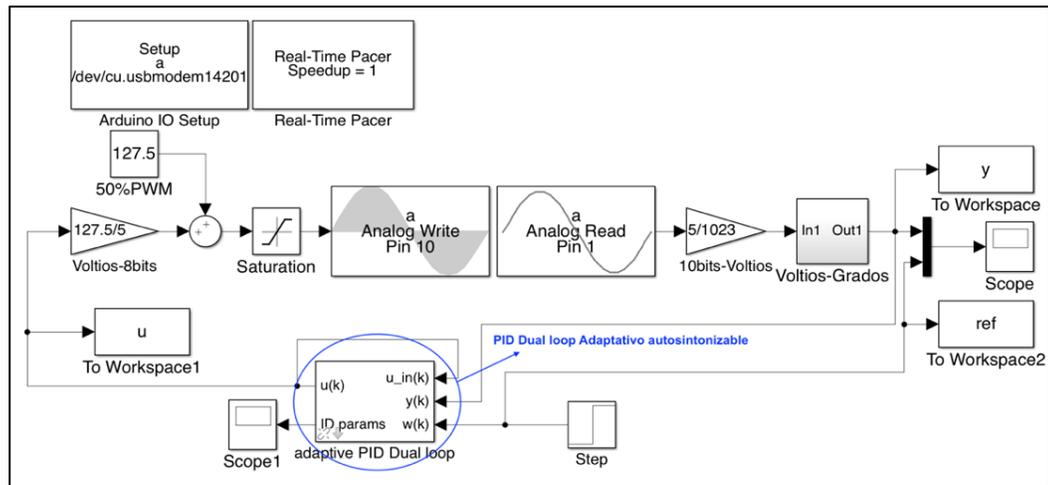


Figura 8. Control PID Dual loop auto-sintonizable
Fuente: Elaboración propia (2018)

Analizando la Figura 9, se pueden apreciar algunas diferencias con respecto al PID clásico. En cuanto al bloque “duallooptuning”, este calcula los parámetros del controlador, para lo cual utiliza la función de transferencia construida en base a las constantes generados por el bloque “identification”, para calcular por medio del comando “damp()” tanto el amortiguamiento como la frecuencia natural, los cuales son requeridos para A1 y A2. Igualmente, para el cálculo de Kp, Ki y Kd se acudió al comando “pidtune()”. Dado que no existe una versión en discreto del PID Dual loop, se trabajó con su estructura en tiempo continuo.

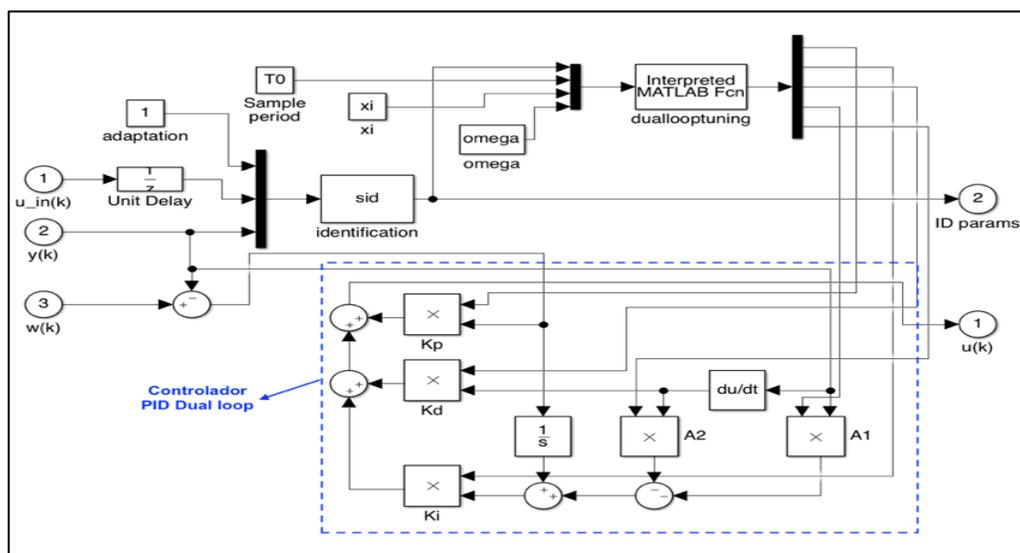


Figura 9. Estructura del control PID Dual loop autosintonizable
Fuente: Elaboración propia (2018)

En la Figura 10 se puede apreciar un mayor número de oscilaciones y tiempo de estabilización a diferencia de la respuesta obtenida en estudios anteriores realizados por Mónaco, Labarca y Cornieles (2017), indicando así, un mayor tiempo para el sistema en realizar la estimación de los parámetros del proceso. La señal presenta un error de estado estable notable de aproximadamente 5° , no obstante, la señal de control ejerce ninguna acción para corregirlo, pues los parámetros de las componentes tanto proporcional como derivativa calculados por el PID tuner de Matlab, son muy pequeños en este punto, prácticamente en el orden de las décimas. Esto hace que el producto de estas con la señal de error y de salida sea reducido a aproximadamente 0 (cero) aun cuando existe error de estado estable.

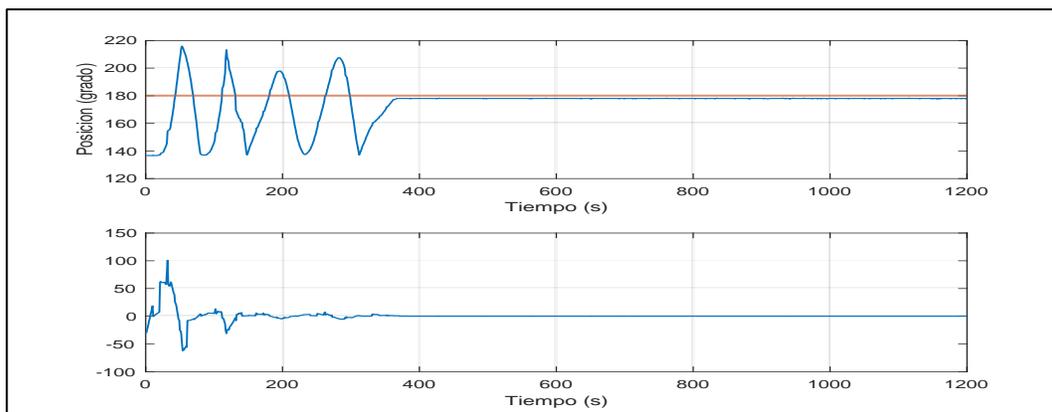


Figura 10. Respuesta del sistema con control PID Dual loop auto-sintonizable
Fuente: Elaboración propia (2018)

Al igual que ocurre con el caso del PID auto-sintonizable, en este caso el bloque "Identification" también tarda un periodo de tiempo en calcular los parámetros utilizando los datos de tanto de entrada como de salida, los cuales corresponderían a las variables manipulada y controlada respectivamente, como puede observarse en la Figura 11. Una vez estimados los parámetros estos se mantienen constantes mientras no haya cambios en la dinámica del proceso.

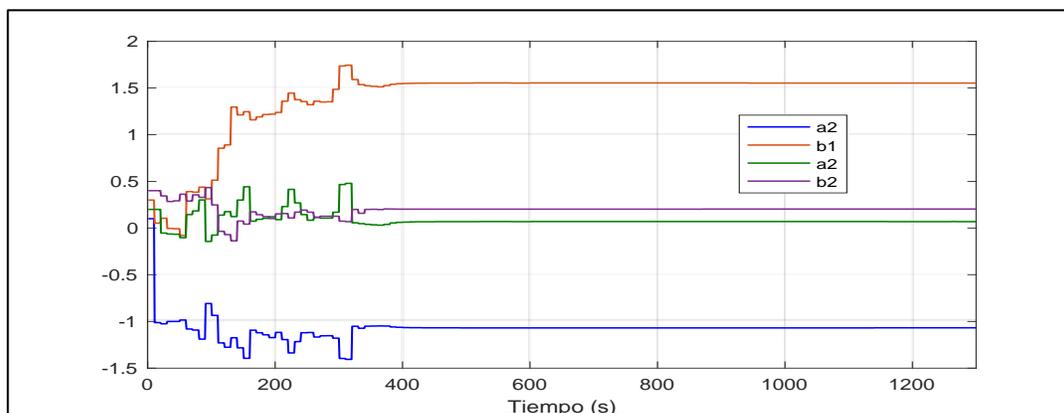


Figura 11. Valores de los parámetros estimado por el identificados del PID Dual loop
Fuente: Elaboración propia (2018)

Evaluación experimental del control diseñado sobre el brazo aerodinámico

Ahora bien, para evaluar el desempeño de esta estrategia de control correspondiente al sistema, se realizaron de la misma forma las pruebas de perturbaciones y cambios de referencia, que se pueden visualizar en la figura 12. Cabe destacar, que para cada una fue necesario esperar que la señal de salida se estabilizara en el valor de referencia, respuesta que se representará más adelante.

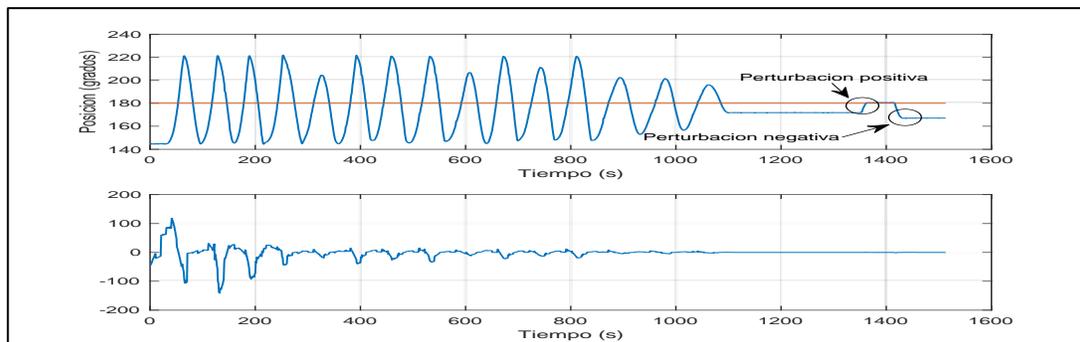


Figura 12. Respuesta del sistema con control PID Dual loop auto-sintonizable ante perturbaciones

Fuente: Elaboración propia (2018)

En la siguiente imagen se muestra la respuesta obtenida con su respectiva variable manipulada. Estudiando la Figura 13, se puede observar un número de oscilaciones elevado, así como el tiempo de estabilización. También, se aprecia un error de estado estable, sin embargo, a pesar de que el sistema se estabilizó ante las perturbaciones, la acción de la señal de control fue prácticamente nula. Ahora, a continuación, se realiza la prueba de cambio de referencia.

Analizando la respuesta de salida, se puede observar un error de estado estable de aproximadamente 10° , al mismo tiempo la señal de control no realiza ninguna acción para corregirlo manteniéndose la variable manipulada en 0. Algo similar ocurre al realizar los cambios de referencia donde la acción del controlador es muy pequeña ocasionando que el sistema se estabilice en un valor de posición angular distinto al deseado.

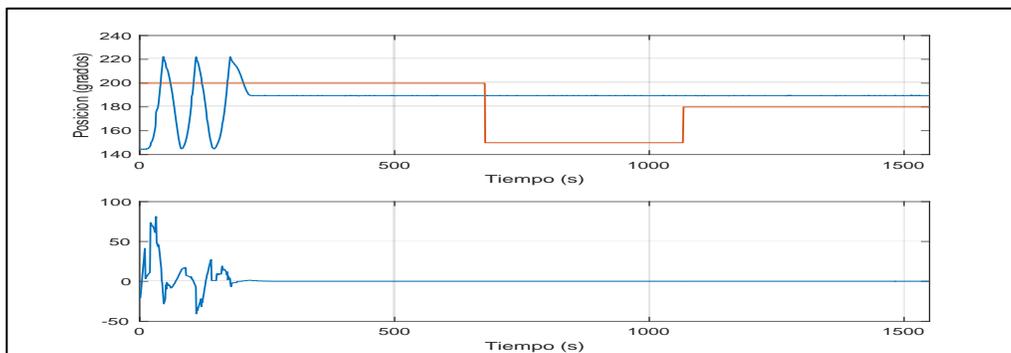


Figura 13. Respuesta del sistema con control PID Dual loop auto-sintonizable ante cambios de referencia

Fuente: Elaboración propia (2018)

Ahora bien, para observar el desempeño de las estrategias de control implementadas, se realizó en la plataforma experimental una gráfica comparativa entre las respuestas obtenidas, empleando el PID adaptativo auto-sintonizable de Bobál et al. (2005), cuyo resultado se muestra en la Figura 14. Con cada estrategia de control se buscó alcanzar la posición angular de 180°. Para su análisis se consideró su tiempo de estabilización, error de estado estable y máximo pico.

Analizando las estrategias expuestas en la Figura 14, se puede apreciar que los controladores auto-sintonizable presentan una respuesta de tipo sub-amortiguado debido a las oscilaciones en su régimen transitorio, las cuales ocurren en el momento cuando el controlador realiza la estimación los parámetros de la función de transferencia del proceso. De igual modo, la señal del controlador por ganancias programada es críticamente amortiguada.

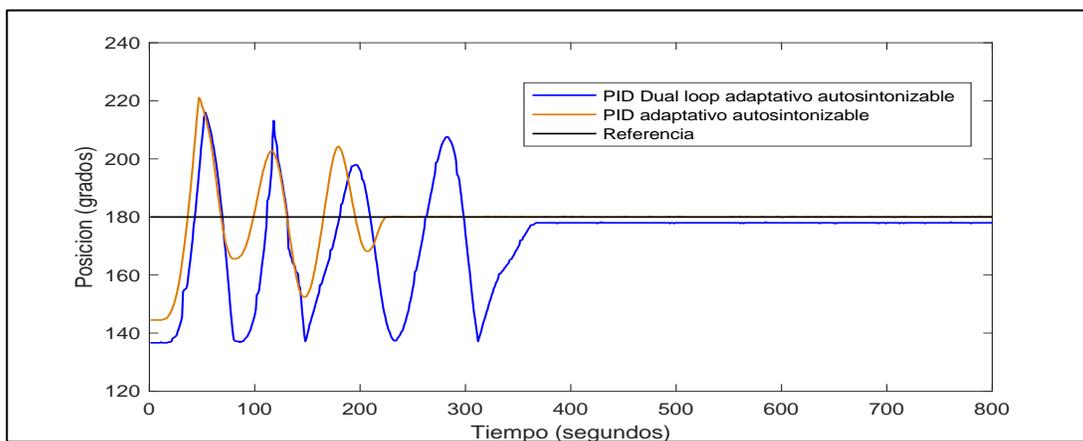


Figura 14. Respuesta del sistema con diferentes estrategias de control
Fuente: Elaboración propia (2018)

En el Cuadro 7 se destacan los valores de tiempo de estabilización, error de estado estable y máximo pico. Considerando el resultado presentado, uno de los detalles más resaltante fueron los sobre-pico, los cuales llegaron al valor máximo que la plataforma experimental puede alcanzar, debido a los límites de la superficie física donde se ubicó. Por otro lado, la estrategia de control con una respuesta más rápida resultó ser el control PID Dual loop auto sintonizable, estabilizándose en tan solo 16.8 segundos, además de presentar un error de estado estable muy pequeño.

Cuadro 7

Tabla comparativa de diferentes estrategias de control

Estrategia de control	Tiempo de estabilización	Error de estado estable	Sobre-pico
PID auto-sintonizable	22.2	0.2	221.1
PID Dual loop auto-sintonizable	36.9	2	216

Fuente: Elaboración propia (2018)

Finalmente, se puede decir que el desempeño del método de ganancias programadas, así como PID auto-sintonizable, resultó favorable para la regulación de posición de la plataforma experimental gracias a sus características adaptables que permitieron hacer frente a las no linealidades del sistema aerodinámico. Nuevamente, el problema presente en el PID Dual loop auto-sintonizable expuesto en la fase anterior, se evidenció en las pruebas realizadas. Es decir, su falta de acción ante el error de estado estable a causa de los valores muy pequeños del componente proporcional calculado por el PID tuner de Matlab, ocasionó dificultad al controlador ante cambios de referencias.

Conclusiones

Una plataforma experimental de brazo aerodinámico está conformada por elementos físicos, mecánicos y de electricidad, uno de ellos es la tarjeta electrónica Arduino Uno, que permite la captura de los datos del voltaje del potenciómetro (otro de los equipos que la componen), y el envío de señales de control al elemento final de control instalado y representado en el diagrama de bloque diseñado, donde se indican cada una de las variables presentes a medir.

Se realizó una identificación del sistema por medio de métodos paramétricos, siendo Box-Jenkins con el cual se logró alcanzar una aproximación por encima de 90% de la función de transferencia en comparación con la data real adquirida. Igualmente, se aplicó el mismo procedimiento mencionado en cinco rangos de la variable controlada, aplicando el método en cada uno de ellos, observándose similitudes y en algunos casos la reducción a solo dos.

La investigación permitió el diseño del control auto-sintonizable, sustituyendo la ley de control por un PID Dual loop de la estructura original con PID clásico, manteniendo el mismo bloque para identificar los parámetros de la planta. Aplicando el método de los mínimos cuadrados se logró observar que la respuesta de salida mostraba un elevado error de estado estable, pero al aplicar numerosas oscilaciones por proceso de identificación de parámetros la respuesta fue de tipo sub-amortiguada.

Por último, se realizó la validación en tiempo real de las estrategias de control utilizada para ver su efectividad ante perturbaciones y cambios de referencia, verificando así su robustez ante dichas condiciones, sin embargo el PID Dual loop adaptativo auto-sintonizable no ejerció ninguna acción de control al momento de buscar un nuevo valor de referencia. Finalmente se compara las señales de cada caso, en la situación de estabilizarse en 180° .

Referencias bibliográficas

- Arias, F. (2012). *El proceso de Investigación científica*. Caracas, Venezuela: Editorial Episteme.
- Astrom, L. y Wittenmark, K. (2013). *Adaptive control*. Estados Unidos: Dover Publications.
- Blum, J. (2013). *Exploring Arduino*. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
- Bobál, H., Bohm, K., Fessl, y Machacek, F. (2005). *Digital Self-tuning controllers*. Alemania: Pringe-Verlag.



- Cuenca, I (2015). Identificación de sistemas en lazo abierto mediante del método de Strejc. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. DOI: 10.13140/RG.2.1.1223.6328
- De Santis, R. (1994). Dual loop PID configuration. Patente US 5481453 A, Corporation De L'ecole Polytechnique.
- Hernández, R. Fernández, C. y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. México: McGraw Hill
- Hurtado, J. (2015). *Metodología de la investigación. Guía para la comprensión holística de la ciencia*. Bogotá: Quirón.
- Mónaco M., Labarca C. y Cornieles, E. (2017). *Implementación de algoritmos de control para un brazo aerodinámico utilizando controladores del tipo PID*. Tesis de xxxxxxxx. Universidad Rafael Urdaneta.
- The Mathworks Inc. (2018). *System Identification Toolbox User's Guide*. Recuperado de: https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/ident/ident_ug.pdf