

Plantas experimentales para diseño de controladores SISO con fines educativos

Claudio Pose^{1,2} y Ezequiel Pecker-Marcosig^{1,3}

¹Laboratorio de Automática y Robótica, Facultad de Ingeniería - Universidad de Buenos Aires

²CONICET - Laboratorio de Inteligencia Artificial y Robótica - Universidad de San Andrés

³CONICET - Laboratorio de Simulación de Eventos Discretos - Universidad de Buenos Aires

Resumen—Este artículo presenta un conjunto de plantas experimentales construidas con el objetivo de funcionar como plataformas para el diseño e implementación de controladores SISO, con una dificultad adecuada para carreras de grado de ingeniería. Las mismas fueron concebidas para la realización de prácticas de laboratorio dentro del área de control automático. Se presentarán un conjunto de plantas construidas con ese fin, y un ejemplo de aplicación para el control de un péndulo simple y un péndulo rotativo.

Index Terms—Control SISO, Planta experimental, Educación, Learning-by-doing.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existe una creciente necesidad de preparar a futuros profesionales de las ingenierías para su inserción en el mundo laboral. Con este fin, los programas de estudio ofrecidos por las universidades buscan implementar una mayor carga experimental en actividades relacionadas con las áreas de aplicación de cada carrera. Particularmente hablando del área de control automático, una encuesta reciente [1] realizada en el ambiente académico e industrial sobre el desarrollo de un primer curso en control automático expuso la necesidad de poner el foco en los conceptos y las aplicaciones más que en complejos desarrollos matemáticos, haciendo un balance entre la teoría y la implementación, con el objetivo de motivar a estudiantes a tomar cursos avanzados de control. Con respecto a este último punto, se destacan el uso de casos de estudio industriales, y la implementación de controladores.

El objetivo principal de estos cursos es enfrentar a estudiantes a situaciones realistas que aparecen en la práctica profesional con las consecuentes relaciones de compromiso [2], como limitaciones en la velocidad de lectura de sensores y/o en el rango dinámico (juego muerto, saturación), retardo de actuadores, y comportamientos no lineales.

Existen kits experimentales comerciales de uso difundido en cursos de control automático, e.g. Quanser [3] o TCLab [4], que vienen listos para usar y con interfaces para las herramientas de simulación más utilizadas en ingeniería (Matlab/Simulink, Scila/Xcos, LabView). No obstante, su costo es elevado y puede ser prohibitivo para un establecimiento educativo, e imposible de adquirir para un grupo de estudiantes. Surge entonces la necesidad de construir sistemas experimentales que sean adecuados para estos cursos, permitan abordar los conceptos teóricos y limitaciones prácticas de plantas reales, sean versátiles para realizar diversas experiencias,

simples de construir y económicas para ser reproducidas por estudiantes, de forma tal que puedan realizarse experiencias bajo el paradigma *take home labs* [5], [6].

En este trabajo se presentará un conjunto de plantas físicas creadas y utilizadas para realizar las prácticas experimentales de cursos de control como los mencionados, junto con los fundamentos detrás de su selección. Estas plantas involucran los dominios físicos típicamente tratados en la bibliografía del área [7], [8] que incluyen sistemas electrónicos, mecánicos, térmicos e hidráulicos. Los cursos para los cuales fueron pensadas están fuertemente orientados a la práctica e involucran el diseño y sintonía de controladores para sistemas reales, considerando además protocolos de comunicaciones e interfaces de usuario. En estas experiencias se incluye: la identificación de modelos y sus parámetros, respuesta en frecuencia y en el tiempo (e.g. respuesta al escalón en distintos puntos de trabajo), control directo y por realimentación (e.g. ON-OFF, PID), control en cascada, respuesta a perturbaciones, por mencionar algunos temas.

Este trabajo se estructura de la siguiente manera. En la Sección II se presentan los criterios seguidos para el diseño de las plantas que son desarrolladas en detalle en la Sección III. En la Sección IV se seleccionan dos plantas y presentan los resultados obtenidos a partir de la experimentación. Finalmente, la Sección V concluye el trabajo y presenta posibles extensiones para la realización de experiencias en los cursos de control.

II. PREMISAS DE LAS PLANTAS

Por un lado, es fundamental que las plantas sean simples y al mismo tiempo versátiles, a la vez que permitan realizar una amplia variedad de experiencias y admitan múltiples enfoques en su resolución. Por ejemplo, una planta no lineal permite analizar el problema de diseño en distintos puntos de equilibrio, y analizar conceptos de robustez de un controlador.

Se considera también que las plantas sean replicables/reproducibles (no necesariamente sencillas de construir), de forma tal que puedan ser implementadas múltiples instancias de la misma. Por ejemplo, para plantas a pequeña escala, diseños mecánicos que puedan ser impresos en 3D permiten generar sistemas mecánicos prácticamente iguales sin grandes esfuerzos. Si el objetivo es que sean plantas para ser construidas por estudiantes, será importante también que el precio sea accesible y que los componentes tengan alta

disponibilidad. Se aprovechará la gran cantidad de módulos compactos disponibles *off-the-shelf* para aplicaciones embebidas (e.g. Arduino, ESP32, Raspberry Pi), como sensores, actuadores y fuentes reguladas.

Es importante que los sistemas a considerar sean efectivamente un desafío equivalente al que se podría encontrar en una planta real en un entorno profesional. El uso de sensores o actuadores donde el tiempo de lectura y comando sean comparables a los tiempos de respuesta de la planta provee un problema didáctico donde los retardos deben considerarse en la implementación del controlador. Situaciones donde los componentes de la planta se vean afectados por el entorno (temperatura, humedad) también proveen desafíos adecuados.

III. PLANTAS PARA EL DESARROLLO DE LAS PRÁCTICAS EXPERIMENTALES

En esta sección se presentarán los detalles constructivos de las plantas físicas para el desarrollo de las prácticas experimentales de los cursos de laboratorio. Estas plantas abarcan los dominios mecánicos (péndulo lineal y rotativo, balancín), térmicos (refrigerador y calefactor) e hidráulicos (tanque cónico), y su control está implementado sobre Arduino y PLCs (Controladores Lógicos Programables). Para cada una de las plantas se abordarán las posibles aplicaciones en un curso, los desafíos presentados para el proceso de aprendizaje, y las dificultades en su construcción y operación.

III-A. Péndulo lineal sobre un carro

El péndulo lineal montado sobre un carro es un sistema electromecánico utilizado típicamente como planta *benchmark* para el estudio de estrategias de control automático debido a su modelización sencilla, comportamiento no lineal y por tratarse de un sistema de fase no mínima y subactuado, donde la inclinación del péndulo se controla indirectamente actuando sobre la posición del carro. Este sistema cuenta con una entrada (tensión aplicada al motor) y dos salidas (posición lineal del carro y angular de la barra). Asimismo, se puede utilizar para estudiar sistemas estables (péndulo simple) o inestables (péndulo invertido). El péndulo simple permite abstraer el comportamiento de sistemas robóticos como un *segway* o un puente grúa.

En la Fig. 1 se observa el péndulo construido. Para la estimación del ángulo del péndulo y la posición del carro se utilizan un *encoder* incremental en cuadratura rotativo y uno lineal respectivamente. Se complementa con dos finales de carrera para detectar los límites de la excursión del carro. Para actuar sobre el carro se utiliza un motor de corriente continua (MCC). Para reducir la fricción, el péndulo está montado sobre dos rulemanes sostenidos por dos piezas impresas en 3D.

III-A1. Complejidad de modelo: Los modelos del péndulo simple e invertido pueden consultarse en [7]. La diferencia entre ambos está del punto de trabajo en el cual se linealiza.

Para completar este modelo es necesario determinar las masas del carro y de la barra y ensayar al motor para determinar sus parámetros. El largo de la barra puede medirse directamente ($l = 432$ mm), o bien estimarse a partir del

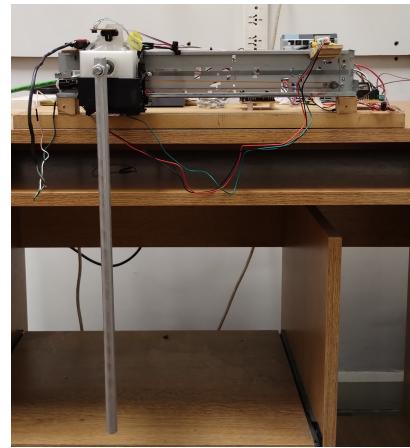


Figura 1: Péndulo lineal sobre carro.

período de oscilación ($T = 1,3$ s). No obstante, para el ajuste de un controlador PID pueden utilizarse métodos empíricos como Ziegler-Nichols.

III-A2. Desafíos de diseño del control: Si bien el control individual del ángulo del péndulo simple no presenta grandes desafíos, enfrenta a estudiantes a problemas reales de las plantas físicas. Por ejemplo, el rozamiento estático del carro con la guía causan una zona muerta en la respuesta del motor de 1,5 V. Además deben estimar las variables de interés, dado que los *encoders* devuelven pulsos que deben ser contados y luego convertidos en una posición (lineal o angular). Dado que el control se implementó en un PLC, se hace uso tanto de la función de biblioteca PID como del algoritmo de autoajuste provistos por el fabricante. No obstante, podrían implementarse leyes de control más complejas.

III-A3. Ventajas de la planta: La principal ventaja de este sistema es que es estudiado extensivamente en los cursos previos de control de forma teórica y mediante simulaciones.

Esta planta permite el diseño de controladores para el control individual del ángulo del péndulo o de la posición del carro. Asimismo, permite la utilización de ambos controladores simultáneamente, ya sea de forma independiente o como lazos anidados. Por otro lado, se trata de una planta versátil que puede ser utilizada tanto en modo péndulo simple (estable) como invertido (inestable). Por lo tanto, se puede utilizar para realizar múltiples prácticas de laboratorio.

III-A4. Dificultad de armado: El péndulo fue construido a partir de una impresora estándar de tipo *inkjet*, lo que simplificó enormemente el desarrollo mecánico. Las piezas auxiliares para el montaje fueron diseñadas e impresas en 3D. Al mismo tiempo, la reutilización de los componentes de la impresora (*encoders* y MCC) reducen considerablemente el costo. Sin embargo, la identificación de los terminales y parámetros de los componentes de la impresora no es trivial debido a la falta de hojas de datos.

Para el control del péndulo se utilizó un PLC Siemens de la familia S7-1200 (CPU S7-1214C) que cuenta con: 14 entradas digitales, 2 entradas analógicas (0 – 10 V), y 10 salidas digitales a relé. Este cuenta además con un módulo auxiliar de una salida analógica (0 – 10 V).

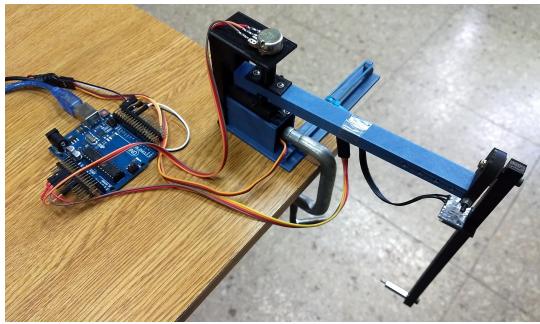


Figura 2: Péndulo rotativo.

Si bien en la industria se utilizan *drivers* compactos para el manejo de MCCs que simplifican la interfaz con el PLC, se decidió implementarlo de forma discreta mediante un *Puente H* con fines didácticos. Este *Puente H* debe recibir una señal de ancho de pulso modulado (PWM). Sin embargo, los PLCs disponibles solo cuentan con salidas digitales a relé, cuya máxima frecuencia de conmutación está muy por debajo de la necesaria para controlar un péndulo que en modo invertido es altamente inestable. Por este motivo, entre el PLC y el *Puente H* se utiliza un módulo Arduino Nano que recibe el valor de ciclo de trabajo mediante comunicación analógica.

Para compatibilizar las señales digitales compartidas entre el PLC, los *encoders* y Arduino Nano se construyó una placa adaptadora con componentes discretos.

III-B. Péndulo rotativo

El péndulo rotativo, radial, o de Furuta (caso invertido), es un ejemplo típico de libro de sistemas electromecánicos, que varía entre una complejidad media a alta, según se utilice su contraparte estable (péndulo normal) o inestable (péndulo invertido). A diferencia del péndulo lineal, es menos restrictivo en cuanto al tamaño y el espacio que requiere, así como también permite el uso de sensores mecánicamente menos complejos. En la versión construida de la Fig. 2 se utiliza una Unidad de Mediciones Inerciales (IMU) para estimar el ángulo del péndulo, y un potenciómetro para sensar la posición del brazo, a la vez que se utiliza un servomotor para el control de este último. Un pequeño rulemán en el extremo del brazo asegura un muy bajo rozamiento del péndulo. Este sistema es representativo (si bien muy simplificado) de brazos robot para aplicaciones industriales y de precisión.

III-B1. Complejidad de modelo: Si bien la complejidad en el diseño es diferente según el péndulo sea normal o invertido, en principio las ecuaciones diferenciales que gobiernan las dinámicas son las mismas [9] (salvo cambios de signo de algún término). Obtener el modelo exacto de la planta es considerablemente complicado, dado que, incluso teniendo las expresiones analíticas, se requiere una medición precisa de todos los componentes, donde los momentos de inercia de piezas tan livianas, el rozamiento del rulemán, el modelo interno del servo, y otros, pueden ser difíciles de conseguir.

III-B2. Desafíos de diseño del control: Existen múltiples enfoques para abordar el diseño de un controlador para la planta, cada uno con sus ventajas y desventajas. En su versión

de péndulo normal, dado que la planta es estable, es posible diseñar controladores heurísticos tipo PID anidados, considerando un lazo interno de control de ángulo de péndulo y otro externo de ángulo de brazo. También es posible implementar controladores por realimentación de estados con acción integral, obteniendo una solución similar al considerar ambos ángulos como estados.

En el caso de péndulo invertido, el diseño heurístico es mucho más difícil, dado que la planta es inestable, pero además, por la velocidad de respuesta necesaria, aparecen vibraciones en la estructura que deben considerarse, ya que afectan las mediciones de los ángulos y generan problemas con los términos derivativos del controlador.

III-B3. Ventajas de la planta: La planta propuesta presenta un problema que cubre una gran parte de los desafíos que aparecen al implementar un controlador real. La misma permite obtener el modelo de diferentes formas, ya sea haciendo un cálculo teórico de los pesos, momentos de inercia, y otros, basados en los factores constructivos, o también admite su obtención mediante técnicas de identificación.

En cuanto al diseño del controlador, permite múltiples implementaciones, como lazos de control anidados, realimentación de estados y sus variaciones, o modelos mixtos. Es posible también implementar controladores que no tengan en cuenta el ángulo del brazo (con cuidado de no exceder los límites de operación). Es ideal para probar dichos límites el uso de diversos *antiwindup*, tanto en la velocidad angular del servo como en sus ángulos máximos de funcionamiento.

III-B4. Dificultad de armado: La planta fue diseñada para ser implementada de forma fácil y económica por estudiantes, de forma tal de disponer de un proyecto sencillo y sin riesgos en su operación, dado que puede alimentarse utilizando las típicas fuentes USB de 5V. La estructura está diseñada para imprimirse en 3D, sin importar la calidad de la máquina dado que no posee formas complejas, y utiliza tornillos en todas sus uniones. Los componentes electrónicos (IMU, potenciómetro, Arduino), pueden ser fácilmente reemplazados por otros modelos, mientras que el cambio del servo o rulemán requieren un rediseño del *housing* correspondiente.

III-C. Plantas térmicas

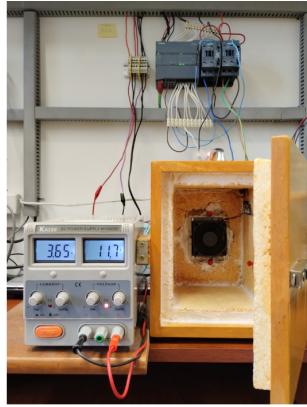
Se construyeron dos plantas térmicas, una planta calefactora y una refrigeradora (Fig. 3). En ambos casos, se trata de sistemas termoeléctricos de dinámica lenta y cuyo comportamiento es fácilmente entendible para un curso básico de control automático. Estas plantas cuentan con una entrada (tensión aplicada al actuador termoeléctrico) y una salida (temperatura).

Para la construcción de la planta refrigeradora se utilizó un recipiente adiabático de paredes de telgopor de alta densidad. Para la construcción de la planta calefactora las paredes del recinto están hechas de chapa galvanizada, con un vidrio en la parte frontal. Si bien esta última presenta un gran intercambio de calor con el ambiente, es muy útil con fines didácticos.

III-C1. Complejidad de modelo: Para hallar el modelo de estos sistemas es necesario obtener los modelos térmicos de ambos recipientes, en términos de resistencias y capacitancias



(a) Calefactor



(b) Refrigerador.

Figura 3: Plantas térmicas.

térmicas, y luego los coeficientes de la transferencia de calor (por conducción y convección) entre los actuadores y los recipientes y entre estos y el ambiente [7]. Asimismo, deberían obtenerse los modelos de la conversión de energía eléctrica en térmica de los actuadores. Por este motivo, y dado que la respuesta de estos sistemas es de primer orden, es más sencillo identificar un modelo de primer orden con retardo (FOPDT), para el que solo es necesario medir tres parámetros: ganancia, constante de tiempo y retardo.

III-C2. Desafíos de diseño del control: Estas plantas no presentan grandes desafíos desde el punto de vista del diseño del control dado que se trata de sistemas SISO estables. Desde el punto de vista del control, la planta refrigeradora presenta una acción negativa, dado que cuando el actuador está activo la temperatura baja.

El control se implementa mediante un PLC y nuevamente se hace uso de la función PID provista por el fabricante.

III-C3. Ventajas de la planta: A raíz de su sencillez, estas plantas ofrecen ventajas en términos didácticos. Asimismo, por tratarse de sistemas no lineales, permiten resaltar el cambio de comportamiento al ser operadas en distintos puntos de trabajo.

En el caso de la planta calefactora, el vidrio montado en el frente permite la visualización del efecto de la modulación del ancho de pulso (PWM) en el actuador (encendido/apagado de las lámparas) generado por el controlador.

III-C4. Dificultad de armado: La medición de la temperatura en el interior de ambos recintos se realiza con un sensor semiconductor de temperatura LM35 con un rango de medición entre -55°C y 150°C y una curva de respuesta lineal con una pendiente de $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$.

El actuador utilizado en la planta calefactora es una grilla de 6 lámparas incandescentes de 100 W. Para la actuación de la planta refrigeradora se utiliza una Celda Peltier de 48 W, en cuya cara caliente tiene montado un dissipador metálico refrigerado con un pequeño ventilador. Un segundo ventilador interior se encarga de uniformizar la temperatura.

Para el control se utiliza un PLC compacto (CPU S7-1214C). Para comandar los actuadores de las dos plantas se utilizan señales PWM. A diferencia del caso del péndulo simple, al trabajar con plantas lentas con constantes de tiempo



Figura 4: Tanque cónico.

largas, las señales de PWM se puede generar directamente con las salidas digitales a relé. Más aún, debido a los niveles de corriente que manejan los actuadores, las salidas digitales del PLC se conectan a estos por medio de contactores debidamente dimensionados, introduciendo retardos adicionales y limitando aún más la velocidad de respuesta.

III-D. Tanque cónico

La planta del tanque cónico responde al típico problema de control de nivel de un líquido en un recipiente, problema para el cual se suelen utilizar contenedores de sección constante, ya sea circular o rectangular. En este caso, como se muestra en la Fig. 4, la forma del contenedor es piramidal con punta inferior recortada. La misma cuenta con una entrada de agua en la parte superior, accionada por una bomba centrífuga ubicada dentro de un contenedor de agua montado en la base, y la cual puede regularse con una válvula manual. En la parte inferior del tanque se encuentra una válvula ON/OFF accionada con una señal tipo PWM para simular una apertura analógica entre un 0 % y 100 % de su sección. La medición de nivel se realiza mediante dos sensores de presión (se utilizan dos debido a una limitación en el rango individual), y como placa de control se utiliza un Arduino.

Las características de la planta real son: $q_i = 8 \text{ L min}^{-1}$ (flujo máximo de entrada por la parte superior), $d_2 = 10,65 \text{ mm}$ (diámetro de la cañería de salida), $l_1 = 10 \text{ cm}$ (lado de la base inferior), $l_2 = 40 \text{ cm}$ (lado de la base superior), $L = 0,9 \text{ m}$ (altura).

III-D1. Complejidad de modelo: La mayor complejidad en modelar esta planta se encuentra en el cálculo del volumen del líquido necesario para plantear la ecuación diferencial de caudal: $\dot{V} = q_i - q_o$. En el caso de la pirámide truncada, el volumen se relaciona con el área de la base inferior (constante), la altura h del líquido, y el área de la superficie del nivel de líquido. Esta última es proporcional al cuadrado

de la altura. Entonces, el volumen del líquido resulta cúbico respecto de h .

Al linealizar la ecuación diferencial del modelo en un punto de trabajo h_0 , resulta una función de transferencia entradasalida del sistema de primer orden, del tipo $T(s) = -k_1/(s+k_2)$, con k_1 y k_2 constantes positivas que dependen de h_0 .

III-D2. Desafíos de diseño del control: El diseño de controladores para esta planta no presenta una gran complejidad. En la escala actual y a lazo abierto, el tiempo de establecimiento ante un escalón en la referencia en torno a $h_0 = 45$ cm es de alrededor de 30 min, y se pueden diseñar controladores que disminuyan ese tiempo hasta 7 min.

III-D3. Ventajas de la planta: En la escala de la planta real, se puede diseñar un control para una dinámica bastante rápida (niveles en torno a los 10 cm - 20 cm), o para una muy lenta (niveles en torno a los 70 cm). El signo negativo en la transferencia se debe a que un aumento de la acción de control (mayor apertura de la válvula) implica una disminución del nivel h . Esto permite tratar el problema de requerir controladores con signo negativo.

III-D4. Dificultad de armado: En la escala propuesta, esta planta no es adecuada para ser construida por estudiantes, sino más bien para ser utilizada por todo un curso de manera cooperativa. Esto se debe a que se requieren paredes gruesas y bien selladas, en este caso en acrílico de 5 mm con sellado de cianoacrilato y poliuretánico, y una estructura robusta de hierro que no permita movimiento, considerando que cerca del llenado completo contiene unos 100 L de líquido. Además, se requieren conexiones a 220 V, lo cual resulta peligroso considerando la cercanía con el agua y requiere supervisión.

III-E. Balancín o Medio-Quadrotor

El balancín o medio-quadrotor permite abstraer el funcionamiento de vehículos aéreos multirotor, como un helicóptero con rotores en tandem o medio *quadrotor* (equivalente a la rotación sobre uno solo de sus ejes), y ejercitarse el problema de control y estabilización de los mismos y la operación mediante radio control. Se trata de un problema de control básico donde se aplican las leyes rotacionales de Newton, ya que es un conjunto de dos fuerzas aplicadas a una distancia fija de un eje de rotación, en un sistema con momento de inercia constante. La planta real construida se puede observar en la Fig. 5, donde pueden verse dos motores con hélices que generan empuje de manera perpendicular a la barra que los une. Cada conjunto actuador se comanda mediante una señal PWM que tiene relación cuadrática con la fuerza que ejerce el motor. El sentido de ángulo se obtiene mediante una IMU, y, si bien en el ejemplo presentado está controlado mediante una placa específica para vehículos multirotor, es fácilmente implementable en Arduino.

Los parámetros de la misma son: $f_M = 1$ kg (fuerza máxima del motor), $d = 22,5$ cm (distancia del eje de rotación al motor), $J = 0,03$ kg m² (momento de inercia).

III-E1. Complejidad de modelo: El modelo es simple, ya que se producen dos torques resultantes de la fuerza generada



Figura 5: Balancín o Medio-Quadrotor.

por cada rotor. En consecuencia, el modelo es simplemente $J\ddot{\theta} = (f_1 - f_2)d$ (sin considerar rozamiento).

III-E2. Desafíos de diseño del control: El diseño de un sistema SISO no es posible en este caso, si se considera que hay dos entradas independientes, la fuerza de cada motor. Sin embargo, para este problema particular, si se eligen las fuerzas tal que $f_1 = F_0 + f$ y $f_2 = F_0 - f$, con F_0 constante, se puede tomar f como una entrada de control virtual, y el modelo resulta en $\ddot{\theta} = (2d/J)f$. Luego, al momento de implementar el controlador, se comandan las fuerzas f_1 y f_2 calculadas.

En cuanto al diseño del controlador en sí, no presenta mayor dificultad debido a la sencillez del modelo. Sin embargo, los conjuntos motor-hélice tienen una inercia que no es despreciable cuando se exigen cambios bruscos de velocidad. Por ello, al diseñar controladores rápidos, esta dinámica será relevante y deberá ser considerada. La misma responde a la forma $T(s) = k_1/(s + k_2)$, y depende del conjunto motor-hélice.

III-E3. Ventajas de la planta: Este sistema permite la introducción a plantas con entradas de control virtuales, permitiendo establecer la lógica con la que se pueden seleccionar las mismas. Además, la dinámica de los motores es un tema bastante interesante, ya que no es sencilla de modelar, y no suele existir ese dato para todos los conjuntos motor-hélice existentes. Por ello, resulta a la vez un gran ejemplo para procesos de identificación de una planta, o para diseñar controladores considerando un modelo con incertidumbre.

III-E4. Dificultad de armado: Debe tenerse en cuenta que este sistema es peligroso de operar, aún por una persona con conocimiento, y se recomienda que sólo sea utilizado por una persona responsable. No obstante, las hélices están cubiertas por una protección plástica. Asimismo, existen módulos tipo mini-ventilador para Arduino, factibles para hacer una versión miniatura y segura. Para reducir las perturbaciones en el brazo del balancín, se eliminó el cableado externo alimentando la placa mediante una batería y usando módulos inalámbricos ZigBee para comunicarla con la PC. Por cuestiones de seguridad, la operación es totalmente remota desde un radio control.

IV. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

IV-A. Péndulo lineal

Para el primer ejemplo se realiza un ensayo sobre el péndulo lineal utilizado como péndulo simple. En este ensayo se utiliza un control PI para el ángulo, mientras que la posición del carro queda en lazo abierto.

La Fig. 6 muestra las curvas de respuesta a perturbaciones del control en lazo cerrado. La figura corresponde a un panel HMI simulado (KTP400) conectado con el PLC real. Se

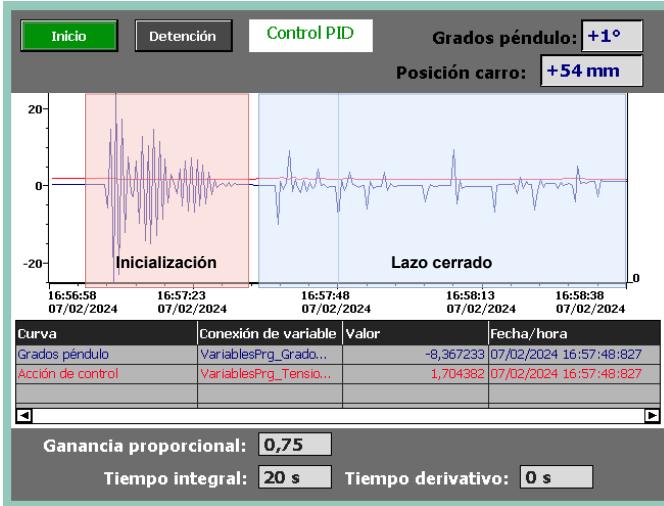


Figura 6: Respuesta en el ángulo de inclinación de la barra y acción de control del péndulo simple ante perturbaciones.

pueden diferenciar claramente dos etapas, una de inicialización y otra de control. En la etapa de inicialización, el carro recorre la guía para determinar los límites de la excursión y así definir la posición media que será el origen de coordenadas de la posición. En esta etapa el ángulo está en lazo abierto. En la etapa de control se cierra el lazo de control de ángulo. Se observa que el control responde rápidamente a las perturbaciones (golpes a la barra) llevando nuevamente el ángulo a cero. El ángulo presenta un pequeño sesgo debido a que para valores pequeños ($< 2,5^\circ$) el lazo de ángulo se abre.

En [10] puede observarse un video con el ensayo completo.

IV-B. Péndulo rotativo

Como ejemplo de aplicación, se muestra un simple experimento donde el controlador aplicado es un doble lazo PI anidado: uno interno que controla el ángulo del péndulo y cuyas acciones de control son las referencias del servomotor y uno externo que controla el ángulo del brazo y genera referencias para el ángulo del péndulo. El controlador fue diseñado mediante Ziegler-Nichols y ajustado empíricamente.

En los primeros 30 s de la Fig. 7 se muestra la respuesta del sistema completo, considerando todas las referencias angulares en cero, ante varias perturbaciones de diferente magnitud y dirección sobre el péndulo. Las perturbaciones causan un desvío del ángulo del péndulo hasta 50° , provocando una respuesta inmediata en la acción de control y en consecuencia del ángulo del brazo. En un tiempo de 2 s el sistema vuelve a su punto de equilibrio.

A partir de los 30 s, en la misma figura se muestra el comportamiento del sistema completo, en este caso ante cambios en la referencia de la posición del brazo de diferentes amplitudes y diferentes direcciones. La respuesta en el ángulo del brazo presenta un sobrepico de un 10% en un tiempo de 1 s después del cambio de referencia, y presenta un tiempo de establecimiento de 1,5 s. El desvío en el ángulo del péndulo (el cual siempre tiene referencia cero) ronda un máximo de 10° cuando la referencia del ángulo del brazo cambia 60° .

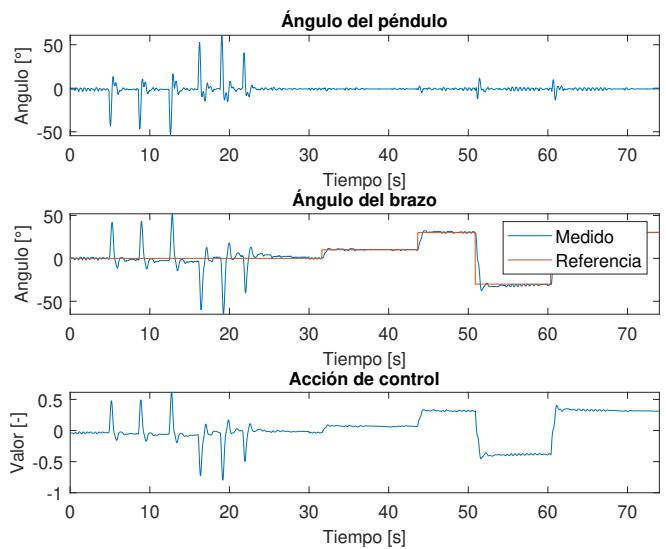


Figura 7: Respuesta en los ángulos y acción de control del péndulo rotativo.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Al momento, las plantas han sido probadas y evaluadas para cumplir con los requisitos básicos para un curso de control práctico. No obstante, todas poseen gran potencial para experimentar una amplia variedad de conceptos.

Como trabajo futuro se trabajará en la extensión a temas de control más avanzados, como observadores de estados (e.g. filtro de Kalman), identificación de perturbaciones, Predictor de Smith (para compensar retardos en las plantas térmicas y el tanque cónico), y controladores más complejos como Control Predictivo por Modelo (MPC), Control por Modos Deslizantes (SMC), e incluso técnicas de aprendizaje por refuerzo (RL).

REFERENCIAS

- [1] A. Rossiter, A. Serbezov, A. Visioli, K. Žáková, and M. Huba, “A survey of international views on a first course in systems and control for engineering undergraduates,” *IFAC Journal of Systems and Control*, vol. 13, p. 100092, 2020.
- [2] J. I. Giribet and R. S. Sánchez-Peña, *Fundamentos del control lineal robusto*. EUDEBA, 2022.
- [3] “Quanser,” <https://www.quanser.com/lab/control-systems-dynamics>, accedido: 06-02-2024.
- [4] “TCLab,” <https://apmonitor.com/pdc/index.php/Main/PurchaseLabKit>, accedido: 06-02-2024.
- [5] J. Rossiter, S. Pope, B. Jones, and J. Hedengren, “Evaluation and demonstration of take home laboratory kit,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 9, pp. 56–61, 2019, 12th IFAC Symposium on Advances in Control Education ACE 2019.
- [6] A. Hoyo, F. García-Mañas, J. Ramos-Teodoro, J. A. Sánchez-Molina, J. L. Guzmán, and F. Rodríguez, *Uso del paradigma Take-Home Labs para la enseñanza del control automático en estudios de ingeniería*. Servizo de Publicacións da UDC, Aug. 2021, p. 218–225.
- [7] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*. Pearson Educación, 2006.
- [8] R. C. Dorf and R. H. Bishop, *Modern Control Systems*, 9th ed. USA: Prentice-Hall, Inc., 2000.
- [9] “Furuta pendulum,” https://en.wikipedia.org/wiki/Furuta_pendulum#Simplifications, accedido: 06-02-2024.
- [10] “Control PI de un Péndulo Simple con Siemens S7-1200 y Arduino Nano,” <https://www.youtube.com/watch?v=U8uzFcIg-CM>, accedido: 25-02-2024.