

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL ADAPTATIVO TIPO SERVO-
INTEGRADOR PARA REGULAR LA POSICIÓN ANGULAR DE UNA
COMPUERTA ACCIONADA POR UNA CORRIENTE DE AIRE.**



**POLITÉCNICO COLOMBIANO
JAIME ISAZA CADAVID**

**JORGE IVAN ARANGO OSORIO
OMAR ALBERTO JIMENEZ GUARIN**

**POLITÉCNICO COLOMBIANO JAIME ISAZA CADAVID
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA EN INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
MEDELLÍN
2016**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL ADAPTATIVO TIPO SERVO-
INTEGRADOR PARA REGULAR LA POSICIÓN ANGULAR DE UNA
COMPUERTA ACCIONADA POR UNA CORRIENTE DE AIRE.**

**JORGE IVAN ARANGO OSORIO
OMAR ALBERTO JIMENEZ GUARIN**

**Trabajo dirigido y estructurado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero en Instrumentación y Control**

**Asesor Técnico
LUIS EDUARDO GARCIA JAIMES
Ingeniero en Instrumentación y Control**

**Asesor Metodológico
ÁLVARO URDINOLA RESTREPO
Sociólogo**

**POLITÉCNICO COLOMBIANO JAIME ISAZA CADAVID
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA EN INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
MEDELLÍN
2016**

Medellín, Mayo 27 de 2016

Ingeniero MARIO LEÓN MONTOYA MEJÍA

Coordinador de Programas Tecnológicos de la Facultad de Ingeniería

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

Asunto: Cumplimiento requisitos Técnico – Metodológico.

Nos permitimos certificar que el trabajo de grado: “DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL ADAPTATIVO TIPO SERVO-INTEGRADOR PARA REGULAR LA POSICIÓN ANGULAR DE UNA COMPUERTA ACCIONADA POR UNA CORRIENTE DE AIRE.” elaborado por los estudiantes:

JORGE IVAN ARANGO OSORIO C.C. 1.128.465.607

OMAR ALBERTO JIMENEZ GUARIN C.C. 1.128.273.790

Realizado bajo la modalidad de trabajo dirigido y estructurado como requisito parcial, para optar al título de Ingeniero en Instrumentación y Control, cumple los requisitos técnicos y metodológicos exigidos.

Se autoriza programar sustentación con jurado.

JURADO

ALVARO URDINOLA RESTRESPO

Asesor Metodológico

Dedicado a mi familia, en especial a mis padres Gloria Osorio Vélez y Medardo Arango Tamayo, Docentes, Compañeros y amigos que me ha brindado apoyo en el trascurso de mi vida y en el proceso de formación personal y profesional.

JORGE IVAN ARANGO OSORIO

Dedico este trabajo de grado a mi familia en especial a mis padres Piedad Guarín y Omar Jiménez quienes me apoyaron en todo momento durante mi vida y a mi esposa por su comprensión

OMAR ALBERTO JIMENEZ GUARIN

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a:

Luis Eduardo García Jaimes, Msc en Automatización Industrial y Asesor Técnico.

Álvaro Urdinola Restrepo, Sociólogo y Asesor Metodológico.

RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño del control adaptativo de la posición de una compuerta que es accionada por dos ventiladores axiales, para dicho control requiere de una captación del ángulo real del proceso a través de una cámara web y una adaptación mediante un estimador en línea para los controladores previamente diseñados, estos deben presentar un buen desempeño en su funcionamiento garantizando velocidad de repuesta y un error en estado estable bajo.

El inicio del trabajo es la descripción de la planta en su estado original para entender su funcionamiento y las modificaciones realizadas para el proyecto, donde la más importante es la adquisición de datos a través de visión artificial por medio de una cámara web y la adición de un ventilador para aumentar la fuerza aplicada en la compuerta.

Con la planta en un óptimo estado se procede a la identificación de la misma por métodos experimentales y métodos analíticos con el fin de obtener un modelo, e iniciar todo el proceso para la adaptación de la planta para generar los parámetros requeridos por la ley de control con lo que garantizaremos los lazos de control adaptables

Los controladores son unos de los últimos pasos, para el trabajo se utilizó un controlador tipo servo con integrador adaptativo el cual se desarrolla con la intención de mejorar el sistema cada vez que la adaptación estime de nuevo los parámetros, además también se implementa un controlador PI convencional y ambos se ejecutan en el *software* LabView® que integra todos los sistemas, como lo es la adquisición de datos y la ejecución de los controladores. Por último se comparan los controladores realizados y se utiliza las métricas del error para realizar una evaluación entre el controlador tipo servo con integrador y el controlador PI convencional con el fin de realizar unas conclusiones y entregar una planta de carácter pedagógico donde se pueden realizar prácticas de laboratorio que simulan controles muy complejos y una planta de singulares características.

TABLA DE CONTENIDO

Contenido

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABLAS.	11
GLOSARIO	14
1. GENERALIDADES	16
1.1 INTRODUCCION	16
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.3 OBJETIVOS	19
1.3.1 Objetivo general.	19
1.3.2 Objetivos específicos.....	19
1.4 ALCANCES Y LIMITANTES	20
1.4.1 Alcance	20
1.4.2 Limitantes.....	20
1.5 ANTECEDENTES.....	20
1.6 METODOLOGIA.....	22
2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA Y LOS ELEMENTOS UTILIZADOS PARA SU IMPLEMENTACIÓN Y CONTROL	25
2.1 DESCRIPCION DE PLANTA	25
2.2.1 Tarjeta de salida o de potencia.....	26
2.2.2 Tarjeta de adquisición de datos “P-TAD SO1”	27
2.3 MEDICION DE LA POSICION ANGULAR POR MEDIO DE VISION ARTIFICIAL. 29	
2.3.1 Medición de la posición angular de la compuerta utilizando la plataforma LabView®.	30
3.2 IDENTIFICACION UTILIZANDO METODOS EXPERIMENTALES.	40
3.2.1 Identificación por curva de reacción.	40
3.2.2 Identificación por mínimos cuadrados recursivos:	44
3.2.3 Adaptabilidad del control a los cambios del sistema.....	46
4. ALGORITMO DE CONTROL ADAPTATIVO TIPO SERVO-INTEGRADOR PARA CONTROLAR LA POSICIÓN ANGULAR DE LA COMPUERTA AFECTADA POR UNA CORRIENTE DE AIRE GENERADA POR EL VENTILADOR AXIAL	49
4.1 CONTROLADOR TIPO SERVO CON INTEGRADOR	49
4.2 CONTROLADOR PID POR CANCELACIÓN DE CEROS Y POLOS.....	54

4.3	COMPARACION POR MEDIO DE LAS METRICAS DEL ERROR ENTRE LOS CONTROLADORES DISEÑADOS.....	57
5.	CONCLUSIONES.....	62
6.	RECOMENDACIONES.....	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Foto real de la planta prototipo.	25
Figura 2.2 Tarjeta de salida o de potencia	26
Figura 2.3 Circuito de potencia para control motor DC	26
Figura 2.4 Tarjeta de adquisición de datos p-TAD SO1	27
Figura 2.5 Ventilador axial	27
Figura 2.6: Fuente de voltaje	28
Figura 2.7: Cámara Web	28
Figura 2.8 Icono de la Función Vision Acquisition	31
Figura 2.9 Ventana de configuración de la función Vision Acquisition	31
Figura 2.10 Implementación de la “mascara”	32
Figura 2.11 Imagen en escala de grises	32
Figura 2.11 Medición del Angulo	34
Figura 3.1 Diagrama de cuerpo libre de la compuerta	37
Figura 3.2 Dimensiones de la compuerta	38
Figura 3.2 Respuesta de la planta ante estímulos tipo escalón	40
Figura 3.3 Escalón recortado y trasladado.	41
Figura 3.4 Curva de reacción para modelo POR.	42
Figura 3.5 Estimador RLS LabView®	46
Figura 3.7 Servo integrador adaptativo	46
Figura 3.8 Estimación en línea	47
Figura 3.9 Implementación de control tipo servo	48
Figura 4.1 Sistema tipo Servo con realimentación del estado observado	49
Figura 4.2 Implementación ley de control tipo servo	53
Figura 4.3 Algoritmo control PID	57
Figura 4.4 Respuesta con controlador PID	58
Figura 4.5 Respuesta del controlador tipo SERVO.	59
Figura 4.6 Comparación controladores.	60

LISTA DE TABLAS.

Tabla 3.1 Relación entre el voltaje, el ángulo y el torque	38
Tabla 3.2 Parámetros obtenidos en la identificación	43
Tabla 3.3 Parámetros obtenidos por el toolkit	44
Tabla 4.0 Criterios de Error	60

LISTA DE ABREVIATURAS

ABREVIATURA	SIGNIFICADO
AC	<i>Alternating Current</i> (Corriente Alterna)
A/D	Conversión Análoga Digital
DC	<i>Direct Current</i> (Corriente Directa)
PI	Controlador Proporcional Integral
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulación por ancho de pulsos)
Mp	Máximo Sobreimpulso
AO	Amplificador Operacional
FT	Función de Transferencia
DSC	<i>Digital Signal Controller</i>
ESS	Error en Estado Estable (<i>Steady State Error</i>)
Ts	Tiempo de Establecimiento
Tp	Tiempo de Máximo Pico
DSP	<i>Digital Signal Processor</i> (Procesador Digital de Señal)
POR	Sistema de Primer Orden con Retardo
ICE	Integral del Error Cuadrático (<i>Integral of Squared Error</i>)
IAE	Integral del Error Absoluto (<i>Integral Absolute Error</i>)
PID	Controlador Proporcional, Integral y Derivativo
GPC	<i>Generalized Predictive Control</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
Θ	Retardo de la planta
I_{max}	Corriente máxima
A	Amperio
I	Corriente
Tm	Tiempo de Muestreo
mv	milvoltios
ms	milisegundos
mili	Miliamperios
Ω	Ohm (Ohmio)
τ	Constante de tiempo del sistema
K	Ganancia del sistema en lazo abierto
s	Segundos
V	Voltios
Tu	Período último de oscilación

GLOSARIO

ACTUADOR: es el elemento mediante el cual se modifica físicamente la variable a controlada

CONTROL PI: en este tipo de controlador, la señal de salida experimenta un salto inicial proporcional al error actuante y a continuación presenta una variación gradual a una velocidad proporcional al error.

ERROR: es la diferencia entre la señal de referencia y la señal de salida real. Se utiliza como entrada al controlador

LABVIEW®: *software* interactivo de programación gráfico, denominado también lenguaje G, una de sus utilidades es la comunicación y adquisición de datos.

PLANTA: es el elemento físico que se desea controlar. Planta puede ser: un compresor, una torre de destilación, una caldera, un motor, un robot, et.

PERTURBACIÓN: alteración o trastorno que se produce en el orden o en las características permanentes que conforman una cosa o en el desarrollo normal de un proceso.

PULSE WIDTH MODULATION (PWM): (modulación por ancho de pulso) método para ajustar la cantidad de potencia a una carga eléctrica modificando el ciclo de trabajo a una señal periódica cuadrada.

SEÑAL DE CONTROL: es la señal que produce el controlador para modificar la variable controlada de tal forma que el error se reduzca a cero o aun valor mínimo aceptable.

SEÑAL DE SALIDA: es la variable que se desea controlar. También se denomina variable controlada.

SET POINT: también llamada señal de referencia, es el valor que se desea que alcance la señal de salida.

PERTURBACIÓN: es una señal que tiende a afectar la salida del sistema, desviándola del valor deseado.

MODELO FENOMENOLOGICO: es la obtención del modelo matemático basándose en sus componentes, comportamiento y leyes que lo afectan.

VISION ARTIFICIAL: la visión artificial es una rama de la inteligencia artificial que tiene por objetivo modelar matemáticamente los procesos de percepción visual para ser leídos por una computadora.

CAMARA WEB: cámara conectada a una computadora para la toma de imágenes e interacción con la misma.

TOOLBOX: herramienta o librería desarrollada para el programa Matlab® la cual es especializada para una tarea específica.

1. GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCION

La posición, es una variable que debe controlarse en muchos procesos: motores, tornos, fresadoras, robots y procesos de manufactura entre otros y el control eficaz y exacto de esta variable permite obtener productos de alta calidad y que cumplen con los estándares de producción.

Para realizar el control de posición existen múltiples elementos que permiten la medición adecuada de dicha variable. Dependiendo de la aplicación, se necesita la medida de la posición a partir de un ángulo o de la distancia con respecto a un sistema de referencia para este fin, se utilizan diferentes elementos como potenciómetros, sensores ópticos, sensores infrarrojos o la visión artificial como método de medición no invasivo.

El propósito de este trabajo de grado es implementar un control adaptativo tipo Servo-Integrador para el control de la posición angular de una compuerta afectada por una corriente de aire generada por un ventilador axial, dicha posición será medida mediante un mecanismo de visión artificial utilizando una cámara *web*.

El control de la posición angular por medio de visión artificial se puede catalogar como un método de control no invasivo, ya que al no tener un contacto físico o directo con la compuerta no está influenciado por los factores del ambiente en el cual se desarrolla la medición.

La ejecución del proyecto de grado se realiza en cuatro fases: la primera se basa en la descripción de la planta, sus características y componentes. La segunda fase se refiere a la modelación matemática de la planta utilizando el método fenomenológico y el método de los mínimos cuadrados recursivos para obtener la

dinámica del sistema utilizando la respuesta de la planta ante perturbaciones en forma de escalón. La tercera fase se basa en el desarrollo del control adaptativo tipo Servo-Integrador para el control de la posición angular de la compuerta teniendo en cuenta los resultados que se obtienen en la fase de identificación por los diferentes métodos y finalmente, en la cuarta fase, se realiza la comparación del desempeño del controlador tipo servo con integrador con el de un control convencional tipo PI utilizando métricas de la integral del error.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el aprendizaje de diferentes tipos de procesos y variables durante un plan de estudios, en cualquier institución, se hace muy difícil la experimentación con algunos procesos y variables, ya que es necesario tener una infraestructura dedicada exclusivamente para este fin lo cual genera costos muy elevados para la institución no solo en la adquisición y el montaje sino en el mantenimiento de estos sistemas. Además, el hecho de tener un proceso específico instalado limita el aprendizaje de muchas variables y temas que no se encuentren en él.

La poca diversidad de procesos reales con que cuentan las instituciones y los estudiantes de cualquier plan de estudios, genera una falencia en el desarrollo académico de los estudiantes, ya que al momento de enfrentarse a procesos distintos a los desarrollados se verán sin las suficientes herramientas para el desarrollo de su trabajo.

Con este tipo de trabajos de grado, se trata de resolver los problemas que se presentan cuando las instituciones no cuentan con diferentes plantas de procesos industriales para que los estudiantes puedan experimentar y aplicar los conocimientos adquiridos en la parte teórica. Con la implementación de plantas prototipo de bajo costo es posible realizar el diseño e implementación de sistemas de control convencional y no convencional que permiten al estudiante adquirir experiencia en el área del control.

El objetivo de la planta prototipo es la medición de la posición angular de una compuerta afectada por la corriente de aire generada por un ventilador axial. A este sistema se le desarrolla un control avanzado tipo Servo con integrador.

La realización del trabajo permite establecer como punto de partida las siguientes preguntas:

La implementación de plantas prototipo de bajo costo será una buena solución para reemplazar equipos y procesos de laboratorio de alto costo?

Será posible utilizar ventajosamente la planta prototipo para probar diferentes algoritmos de control convencional y no convencional?

¿El uso de la visión artificial para medir la posición angular genera un sistema de medición y de control confiable?

¿El uso del control tipo Servo con integrador será adecuado para regular la posición de la compuerta y en general para realizar control de posición?

¿Cómo será el desempeño del control tipo Servo con Integrador con respecto al de un control PI convencional?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general.

Diseñar un sistema de control adaptativo tipo servo-integrador para regular la posición angular de una compuerta accionada por una corriente de aire

1.3.2 Objetivos específicos.

- Describir la planta y los elementos utilizados para su implementación y control.
- Obtener la dinámica de la planta mediante una identificación paramétrica utilizando mínimos cuadrados recursivos y la respuesta mediante una entrada en forma escalón.
- Elaborar un algoritmo de control adaptativo tipo servo-integrador que permita controlar la posición angular de la compuerta afectada por una corriente de aire generada por el ventilador axial.
- Analizar el comportamiento del control adaptativo tipo servo-integrador y comparar su desempeño con un control convencional PI utilizando métricas de la integral del error y su respuesta temporal.

1.4 ALCANCES Y LIMITANTES

1.4.1 Alcance

Se presenta en este trabajo de grado la implementación de un control tipo Servo-Integrador para controlar la posición angular de una compuerta afectada por una corriente de aire generada por un ventilador axial.

Al finalizar el trabajo se entrega el prototipo de la planta y un documento en formato digital en el cual se presenta la descripción del proceso, su modelado fenomenológico y experimental, el diseño e implementación de los controladores y el análisis de los resultados obtenidos.

1.4.2 Limitantes.

El limitante más significativo es el tiempo del que se dispone para la ejecución del trabajo ya que los autores, además de ser estudiantes, tienen compromisos laborales y el tiempo es relativamente corto para el desarrollo del mismo.

1.5 ANTECEDENTES.

A continuación se nombran algunas de las referencias teóricas que sirvieron como material de consulta para el planteamiento y ejecución del proyecto.

García y Arroyave (2010). En su artículo: *Controlador tipo servo con observador de orden completo y controlador según Ciancone Marlín para un sistema de flujo*, presentan el método de control de procesos por realimentación del estado utilizando técnicas de asignación de polos. Diseñan un observador de orden completo y le adicionan un integrador para corregir el error en estado estable, además se calcula un controlador utilizando las tablas de Ciancone Marlín con el fin de comparar el desempeño de los dos controladores en la regulación del proceso. La variable controlada es el flujo y para se utiliza un módulo didáctico diseñado y construido en

el laboratorio de Automatización y Robótica de la Institución Universitaria de Envigado.

Gordillo y Yanes (2009). En su tesis de grado *Aplicación de visión con LabVIEW para la detección de frascos con turbiedades*, describen las ventajas y desventajas de los sistemas de visión artificial, mencionan las potenciales áreas industriales para su aplicación, presentan aspectos importantes vinculados a la iluminación, tipo de cámaras y algoritmos matemáticos usados en el procesamiento digital de las imágenes, presentan una descripción de los instrumentos virtuales que tiene Labview® en su paquete NI Visión y muestran la implementación del sistema de detección de turbiedades en lenguaje gráfico y sus especificaciones de funcionamiento.

Pineda y Vivas (2008). En su tesis de grado *Control de un modelo aerodinámico aplicando sistemas difusos*, presentan el diseño, la implementación y los resultados de un controlador PI que utiliza como herramienta principal la lógica difusa, es decir, un Controlador Difuso PI, desarrollado para el control de un Sistema Aerodinámico, consistente en una compuerta móvil posicionada por una corriente de aire mostrando la aplicación práctica que estas tecnologías tienen en la industria. Este trabajo se realiza con el objetivo de abordar los problemas que presenta un sistema no lineal y de las múltiples ventajas que aporta un Controlador Difuso para solucionar esos inconvenientes.

Mosquera, Bacca, Quiñones y Díaz (2012). En su artículo: *Control de posición de un sistema de levitación neumático*, presentan el diseño, modelado y control de posición de un sistema de levitación neumático, el controlador PID implementado en este trabajo sostiene una esfera a una altura deseada mediante la regulación de la velocidad del ventilador accionado por un motor, la cual está directamente relacionada con el flujo de aire que contrarresta las fuerzas que se ejercen sobre la esfera; un sensor de ultrasonido permite al sistema en lazo cerrado obtener la información para regular la altura.

Tamayo (2014) En su tesis de grado: *Construcción y control por variables de estado de una plataforma didáctica de levitación magnética*, diseña y construye para el laboratorio de control automático de la facultad de Eléctrica Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional, un módulo no-lineal que permite al estudiante conectar el proceso de aprendizaje teórico y aplicarlo a la plataforma construida, pasando por los procesos de: modelado de ecuaciones intrínsecas de la planta, linealización, análisis de estabilidad, control por variables de estado e implementación de la ley control. El proyecto consta de un electroimán diseñado y construido acorde a las especificaciones necesarias que permitan la levitación de una esfera magnética y una tarjeta de adquisición de datos NI USB-6008 la cual permite la lectura del sensor de posición de la esfera, la conexión entre la planta y HMI y la salida análoga de la ley de control. El mecanismo de control se da por el método de realimentación del estado y asignación de polos con sistema tipo servo con integrador. El proyecto tiene una interface que permite el ingreso de los parámetros, el tiempo de muestreo y la visualización grafica del set point, la respuesta de la planta y la ley de control.

Vargas (2010) en su tesis de grado: “*Sistema de visión artificial para el control de calidad en piezas cromadas*” *Desarrolla un sistema en tiempo real para la inspección visual automática de piezas con recubrimiento de cromo*”. El cual permite una inspección al 100% de las piezas de manera confiable, acelerando el tiempo empleado en su verificación visual de los defectos disminuyendo la posibilidad de errores humanos. Aumentando así la productividad y la eficiencia del proceso además de mejorar notablemente la calidad del producto final.

1.6 METODOLOGIA.

En este trabajo se diseña e implementa un controlador tipo servo con integrador para controlar la posición de una compuerta regulando el flujo de aire que produce

un ventilador axial y que al incidir sobre la compuerta modifica su ángulo de inclinación.

Para el desarrollo del trabajo se utiliza la metodología de investigación aplicada ya que es necesario tener un conocimiento técnico y a su vez práctico del proceso que se está modelando.

Para realizar el proyecto en la planta prototipo, se cambió el sensor de posición original que era un potenciómetro lineal, por un sistema de visión artificial con una cámara web comandada por la plataforma Labview®.

Una vez calibrada la cámara y ajustada para la lectura de la posición angular en grados, se realiza la identificación paramétrica del sistema utilizando mínimos cuadrados recursivos con los cuales se obtiene la dinámica de la planta. También se realiza una modelación fenomenológica de la planta resultando un modelo no lineal de segundo orden.

Finalmente se diseña un controlador tipo servo con integrador y un controlador PI, se implementan en plataforma Labview® y se comparan sus desempeños con respecto a métricas de la integral del error.

Para la realización del trabajo se realizaron las siguientes actividades:

- Revisión bibliográfica sobre el tema objeto de estudio.
- Desarrollo de las bases teóricas para el modelamiento matemático del sistema.
- Análisis fenomenológico para hallar la ecuación diferencial que describa la dinámica del sistema.
- Representación del sistema en Función de Transferencia y en Espacio de estados.
- Diseño de un controlador PI y un controlador tipo servo con integrados utilizando técnicas de realimentación del estado y de Asignación de Polos.
- Simulación del sistema controlado.
- Implementación del control en el sistema real para controlar la posición de la compuerta.
- Análisis de resultados y conclusiones.

- Presentación del informe final
- Sustentación del trabajo de grado

2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA Y LOS ELEMENTOS UTILIZADOS PARA SU IMPLEMENTACIÓN Y CONTROL.

2.1 DESCRIPCION DE PLANTA

El sistema está compuesto básicamente por 3 partes principales a saber: la primera corresponde al sistema de adquisición de la variable en este caso una cámara web manejada mediante el software de LABVIEW®. La segunda parte es la etapa de potencia que genera el voltaje para regular, mediante una señal análoga de 0 a 12Vdc la velocidad del ventilador axial. La tercera parte consiste en la compuerta de acrílico que será posicionada por el flujo de aire proveniente del ventilador.

Se implementa un control indirecto, ya que se desea controlar la posición angular de la placa de acrílico manipulando la velocidad del ventilador. La figura 2.1 muestra el sistema utilizado para la realización del trabajo.

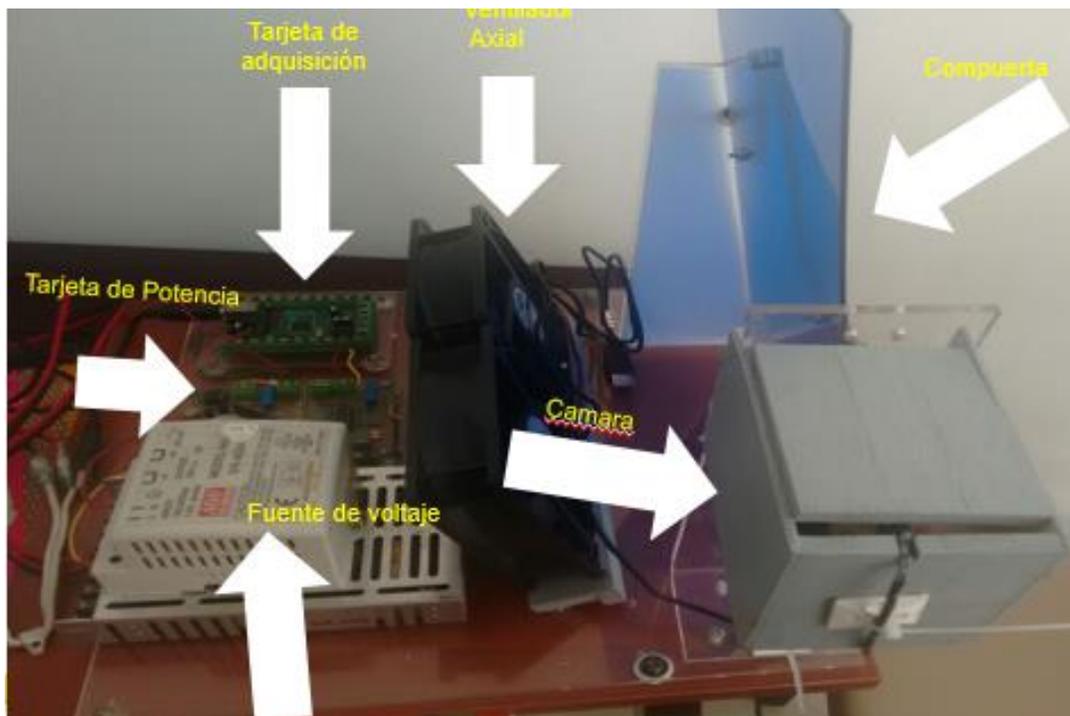


Figura 2.1 Foto real de la planta prototipo.

Fuente: Foto tomada por los autores.

2.2 ELEMENTOS UTILIZADOS EN LA IMPLEMENTACION DE LA PLANTA

2.2.1 Tarjeta de salida o de potencia: En la planta se utilizó una tarjeta de potencia la cual recibe la señal análoga de 0 a 5 Vdc generada por el sistema de control a través de la tarjeta de adquisición de datos, al recibir dicha señal la tarjeta de potencia amplifica el voltaje que se envía al ventilador axial, la tarjeta de potencia fue diseñada para enviar un voltaje no mayor a 15 VDC. Este voltaje es definido de acuerdo a las características operacionales del ventilador. En la figura 2.2 se presenta una fotografía de la tarjeta que constituye el sistema de potencia



Figura 2.2 Tarjeta de salida o de potencia

Fuente: Luis E García Jaimes

En la figura a figura 2.3 se muestra el plano de la tarjeta de potencia

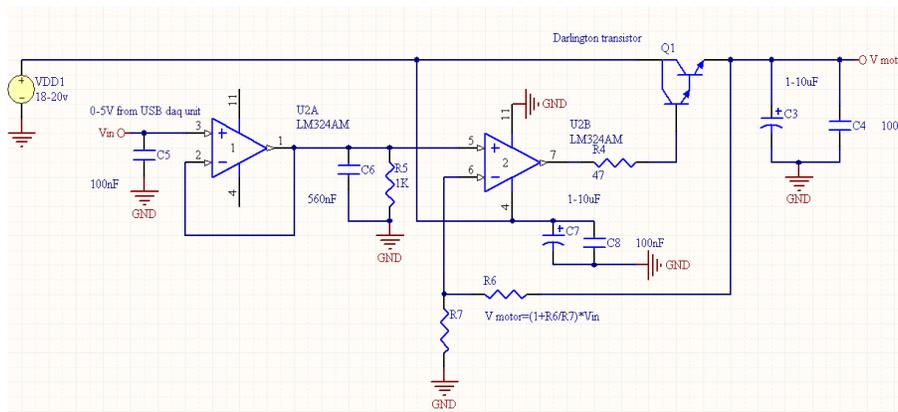


Figura 2.3 Circuito de potencia para control motor DC

Fuente: Luis E García Jaimes.

2.2.2 Tarjeta de adquisición de datos “P-TAD SO1”: Se utiliza la tarjeta de adquisición de datos **P-TAD SO1** (mirar anexo) como interface de salida para generar la señal análoga de 0 a 5Vdc, con el fin de controlar el voltaje de entrada al ventilador axial y así controlar la posición angular de la compuerta afectada por la corriente de aire. La tarjeta es programada en la plataforma LABVIEW®. La figura 2.4 muestra la tarjeta de adquisición de datos.

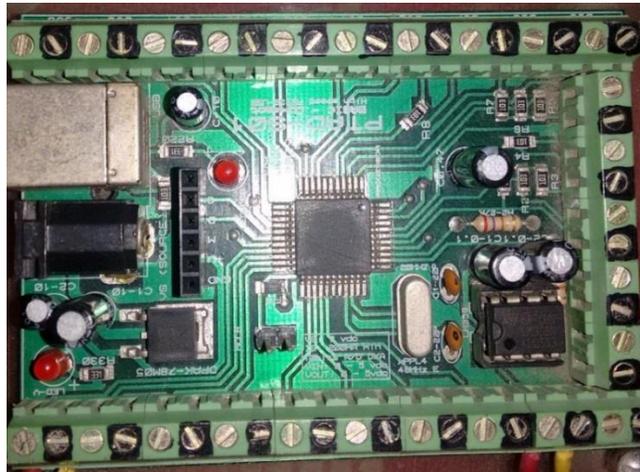


Figura 2.4 Tarjeta de adquisición de datos p-TAD SO1

Fuente: Fotografía tomada por los autores

2.2.3 Ventilador axial: El ventilador axial (ver figura 2.5), es un componente utilizado en la mayoría de veces como enfriador de partes electrónicas, recibe un voltaje máximo de 15 VDC con un amperaje de 0.5 A. Por medio de este ventilador se genera el flujo de aire que modifica la posición de la compuerta.



Figura 2.5 Ventilador axial

Fuente: Fotografía tomada por los autores.

2.2.4 Fuente de voltaje: Se utiliza una fuente de voltaje fija la cual recibe desde 90 hasta 132 VAC y lo convierte y regula a dos salidas de 5 VDC y 15 VDC, estos voltajes de salida se usan para la alimentación de la tarjeta de potencia o de salida. La figura 2.6 muestra la fuente de voltaje.



Figura 2.6: Fuente de voltaje

Fuente: Fotografía tomada por los autores

2.2.5 Cámara web: En el presente trabajo se realiza la medición de la variable a controlar por medio de la cámara web mostrada en la figura 2.7 HD de 720p que para el caso en particular cumple con las necesidades.



Figura 2.7 Cámara Web

Fuente: <http://www.geniusnet.com/Genius/wSite/ct?xltem=55882&ctNode=1304>

2.3 MEDICION DE LA POSICION ANGULAR POR MEDIO DE VISION ARTIFICIAL.

Las empresas y los entornos industriales siempre se ven sometidos a grandes cambios para aumentar sus niveles de calidad. Por esto muchos de los desarrollos actuales han venido de la academia con sus principales investigaciones y nuevas aplicaciones.

Para el trabajo se utiliza un avance de la industria moderna el cual es la visión artificial, la visión artificial facilita una continua inspección del producto o variable a medir para garantizar que todos los elementos son medidos sin excepción por ende la supervisión es continua. Esto a la hora del desarrollo de un algoritmo de control es muy útil y proporciona la información a la unidad de procesamiento de una forma oportuna y sin interrupciones.

Los sistemas de visión artificial consisten en un rayo de luz que está dirigido hacia el objeto que se desea controlar, esta imagen es asimilada o captada por una cámara que envía la señal digital a una unidad de procesamiento, esta puede ser genérica (CPU u ordenador) o desarrollada por algún fabricante de elementos electrónicos, ambos para pasar a una etapa de adquisición y tratamiento que consta de robustos algoritmos.

La imagen adquirida comienza su tratamiento para poder ser procesada, dentro de este proceso existe numerosas operaciones o cambios en la estética de la imagen como lo puede ser la eliminación de ruido, es concentrarse en la variable a medir, validar los colores importantes y establecer patrones. Después de ser procesada, se debe obtener las especificaciones de control deseadas para ser usadas en los algoritmos. Para terminar, se debe tener la fidelidad de la imagen obtenida y elaborar un aprendizaje continuo que garantice que los datos obtenidos son representativos.

Para el trabajo se tiene una medición constante del ángulo de la compuerta, el cual es una distancia desde la vertical hasta la posición actual, es decir, la visión artificial puede captar características de un objeto pero también obtener su trayectoria y una distancia medida desde un punto, esto es muy común en cualquier proceso industrial o académico.

Lo más importante de la visión artificial es que es un método no invasivo, el concepto se refiere a la no perturbación por la obtención de la variable controlada sin disminuir la precisión y exactitud en la medida siendo la visión artificial un método muy útil en el cual se obtienen valores reales y que pueden ser comprobados con una fidelidad muy alta. Es importante anotar que con la compra de un dispositivo como la cámara *web* son muchas las aplicaciones que se pueden realizar y con solo modificar el algoritmo se hace que evolucione o se adapte a las necesidades futuras del proceso sin mucho traumatismo.

2.3.1 Medición de la posición angular de la compuerta utilizando la plataforma LabView®: En el trabajo desarrollado se utiliza la plataforma LabView® para obtener la posición angular e igual para el desarrollo del algoritmo de control tipo servo-integrador y del PID por cancelación de polos. A continuación se describirá el uso de la plataforma para la medición de la posición angular de la compuerta afectada por aire.

Se utiliza la librería de visión artificial de la plataforma LabView® en conjunto con la función *Vision Acquisition* (Figura 2.8) la cual permite configurar la cámara y sus diferentes parámetros y obtener un chequeo en tiempo real (Figura 2.9).

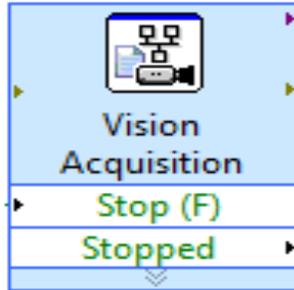


Figura 2.8 Icono de la Función *Vision Acquisition*

Fuente: LabView®

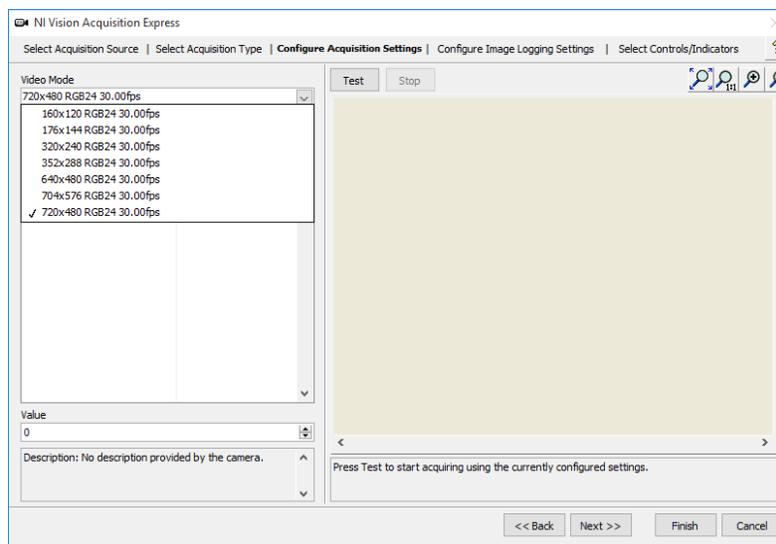


Figura 2.9 Ventana de configuración de la función *Vision Acquisition*

Fuente: LabView®

Luego de haber configurado el tipo de cámara y el modo en que se obtendrá la imagen se continua con la siguiente función incluida en la librería, esta función se llama: *Vision assistant*. Esta función permite hacer un tratamiento a la imagen además de configurar la medición de atributos de la misma para ser utilizados como elementos de referencia y así poder desarrollar la aplicación deseada.

En el caso en particular se inicia con la implementación de una "mascara" (Figura 2.10) a la imagen es decir: se delimita el área de importancia de la imagen para que en esta solo sea visible la parte transversal de la compuerta y no tome en cuenta factores externos que puedan alterar la medición del ángulo.

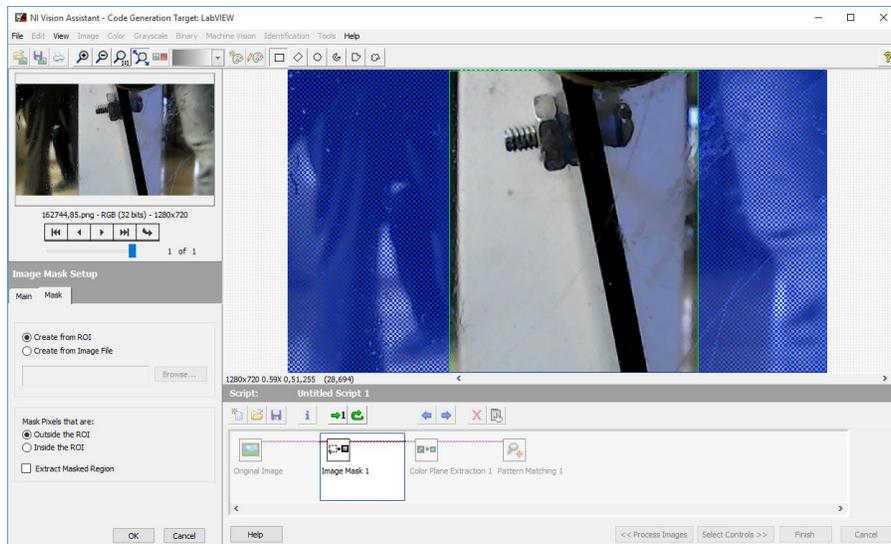


Figura 2.10 Implementación de la mascara

Fuente: LabView®

Luego de la implementación de la “mascara” el tratamiento que continúa es la conversión a escala de grises eliminando el color rojo de la paleta RGB que compone la imagen (Figura 2.11). Esto se hace por que en esta aplicación no es relevante ningún color en especial además de mejorar el contraste de la sección transversal de la compuerta con el fondo.

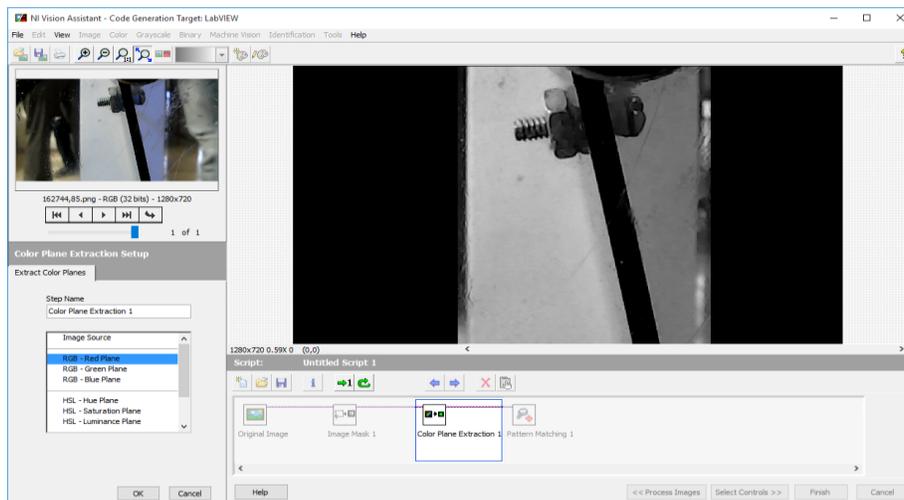


Figura 2.11 Imagen en escala de grises

Fuente: LabView®

Por ultimo después del tratamiento realizado a la imagen se programa el algoritmo para tomar la sección trasversal de la compuerta pero no toda, solo una pequeña

porción ya que esto permite un número mayor de posibilidades en la medición (Figura 2.11), además de indicarle que a dicha porción se le tome el ángulo con respecto al eje vertical.

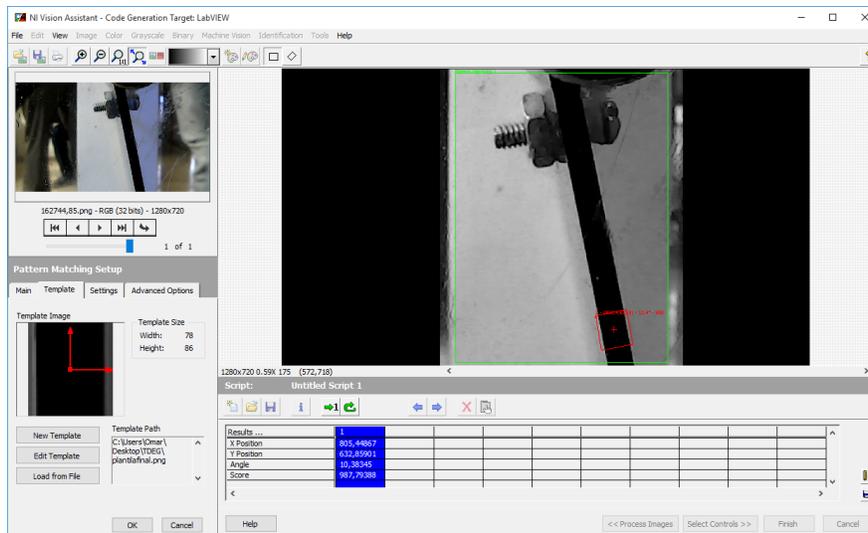


Figura 2.11 Medición del Angulo

Fuente: LabView®

Una vez realizado todo el tratamiento digital a la imagen esta función retorna el ángulo de la porción medida y un puntaje de concordancia, este puntaje permite eliminar posibles interferencias que pueda tener la imagen al momento de su captura. Una de las principales limitaciones que tiene el manejo de la visión artificial es el hecho de a iluminación con que será desarrollada, en diferentes aplicaciones es necesario la implementación de una iluminación propia para no generar perturbaciones en la toma de la imagen, En este caso no se tiene ese problema ya que el elemento a medir tiene un contraste muy alto con el fondo además de no tener un patrón específico para ser medido, esto hace que esta planta prototipo se pueda usar en cualquier ambiente siempre y cuando tenga iluminación pero no una especial, al hacer referencia a una iluminación especial se habla de uno tratamiento exclusivo y particular para cada proceso, como lo es la luz led por su característica de ser continua, luces de disparo que solo se encienden en el momento de toma de la imagen estas vienen acompañadas de un asilamiento del medio ambiente para así no generar perturbaciones.

3. OBTENCIÓN DE LA DINÁMICA DE LA PLANTA MEDIANTE IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA UTILIZANDO MÍNIMOS CUADRADOS RECURSIVOS Y LA RESPUESTA ANTE UNA ENTRADA EN FORMA ESCALÓN.

3.1 MODELO FENOMENOLÓGICO DEL SISTEMA

3.1.1 Ecuaciones para obtener el modelo fenomenológico: Para determinar el modelo fenomenológico de la planta se recurre al diagrama de cuerpo libre (Pineda y vivas 2008), tal como se muestra en la figura 3.1.

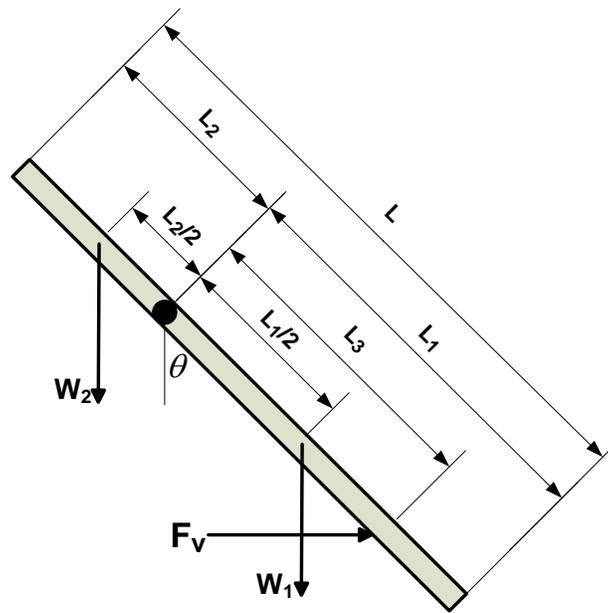


Figura 3.1 Diagrama de cuerpo libre de la compuerta

Donde:

L = longitud de la compuerta.

L_1 = distancia del eje de rotación al extremo inferior.

L_2 = distancia del eje de rotación al extremo superior.

L_3 = distancia del eje de rotación a la fuerza F_v

θ = ángulo de inclinación de la compuerta

F_v = Fuerza producida por el flujo de aire del ventilador

W_1 = Peso de la parte inferior de la compuerta (borde inferior al eje de rotación)

W_2 = Peso de la parte superior de la compuerta (borde superior al eje de rotación)

Se asume que toda la fuerza del flujo de aire F_v se concentra en un punto, situado a la altura a la que se encuentra el eje del ventilador. Aplicando la segunda ley de Newton para sistemas rotacionales y teniendo en cuenta el diagrama de cuerpo libre mostrado en la figura 3.1, resulta:

$$J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = \sum T \quad 3.1$$

Donde:

T = Torque

J = Momento de inercia de la compuerta

Los torques que van en el mismo sentido del movimiento se toman como torques positivos, mientras los que se oponen al movimiento se consideran negativos, por lo tanto:

$$\sum T = -T_1 + T_2 + T_{Fv} \quad 3.2$$

Donde:

T_1 = Torque debido a W_1

T_2 = Torque debido a W_2

T_{Fv} = Torque debido a la fuerza del flujo de aire F_v , es decir debido al actuador.

El torque se define como el producto entre la fuerza que lo produce y la distancia al eje de rotación, donde la fuerza y la distancia deben ser perpendiculares.

Observando la figura 3.1 se resulta:

$$T_1 = W_1 * \frac{L_1}{2} * \text{sen}\theta \quad 3.3$$

$$T_2 = W_2 * \frac{L_2}{2} * \text{sen}\theta \quad 3.4$$

$$T_{Fv} = F_v * L_3 \quad 3.5$$

Reemplazando las ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5 en la ecuación 3.1 se tiene:

$$J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = -W_1 * \frac{L_1}{2} * \text{sen}\theta + W_2 * \frac{L_2}{2} * \text{sen}\theta + T_{Fv} \quad 3.6$$

$$J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = \left(W_2 * \frac{L_2}{2} - W_1 * \frac{L_1}{2} \right) * \text{sen}\theta + T_{Fv} \quad 3.7$$

El término entre paréntesis es constante para la compuerta, es decir:

$$K_L = W_2 * \frac{L_2}{2} - W_1 * \frac{L_1}{2} \quad 3.8$$

Donde:

K_L = Constante de la compuerta que depende del peso y sus dimensiones.

Entonces el modelo matemático general de la planta queda determinado por la ecuación:

$$\frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = \frac{K_L}{J} * \text{sen}\theta + \frac{1}{J} * T_{Fv} \quad 3.9$$

En la ecuación 3.9 es necesario establecer la relación entre el torque que produce el flujo de aire sobre la compuerta (salida del actuador) y el voltaje de entrada al actuador. Para esto se toman mediciones del voltaje aplicado al ventilador y del ángulo de inclinación de la compuerta con el fin de encontrar una relación que permita calcular el torque en función del ángulo.

De la figura 3.1 se deduce que la variable de entrada a la planta es el torque y la variable de salida es el ángulo de inclinación de la compuerta, al igualar la ecuación 3.9 a cero (condición de equilibrio, donde la aceleración angular es cero), se encuentra una relación entre el ángulo de inclinación y el torque. Igualando la ecuación 3.9 a cero resulta:

$$T_{Fv} = -K_L * \text{sen}\theta \quad 3.10$$

Finalmente se determina la expresión matemática, que relacione el torque en función del voltaje de entrada, la cual puede ser de la forma:

$$T_{Fv} = f(V_i) \quad 3.11$$

Donde:

V_i = Voltaje aplicado al ventilador (actuador)

$f(V_i)$ = Relación que expresa a T_{Fv} en función de V_i

La ecuación 3.11 representa el modelo matemático del actuador en condiciones de equilibrio. Reemplazando la ecuación 3.11 en la ecuación 3.10, se obtiene el modelo matemático de la planta:

$$\frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = \frac{K_L}{J} * \text{sen}\theta + \frac{f(V_i)}{J} \quad 3.12$$

La ecuación 3.12 representa un sistema no lineal, en el cual la entrada es el voltaje de alimentación V_i aplicado al ventilador y la salida es el ángulo θ de inclinación de la compuerta.

En la figura 3.2 se muestran las dimensiones de la compuerta y las distancias del punto de apoyo a los extremos inferior y superior de la misma. El peso total de la compuerta es de $W = 0.218 \text{ Kg}$. El peso de la parte inferior al punto de apoyo es de $W_1 = 0.121 \text{ Kg}$ y el de la parte superior es $W_2 = 0.097 \text{ Kg}$. Con los datos anteriores se calcula la constante K_L , con la ecuación 3.8:

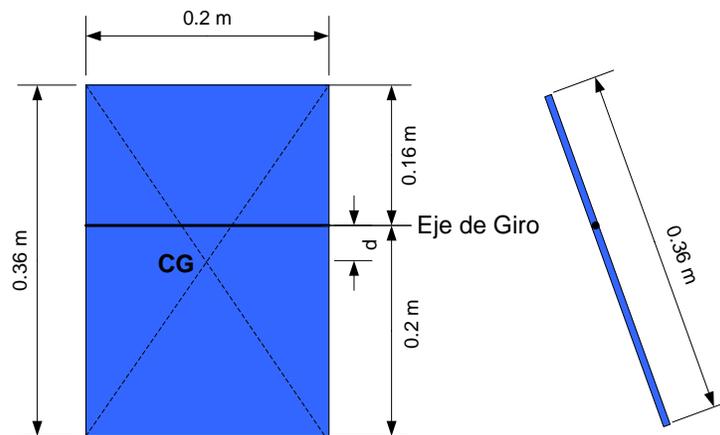


Figura 3.2 Dimensiones de la compuerta

Fuente: Tomada por los autores

$$K_L = W_2 * \frac{L_2}{2} - W_1 * \frac{L_1}{2} = \frac{0.097 \text{ Kg} * 0.16 \text{ m}}{2} - \frac{0.121 \text{ Kg} * 0.2}{2}$$

$$K_L = -4.34 * 10^{-3} \text{ Kg} * \text{m}$$

El momento de inercia J Para una lámina rectangular que gira sobre un eje situado a una distancia d de su centro de gravedad está dado por el teorema de los ejes paralelos o teorema de Steiner:

$$J = J_x + W \cdot d^2 \quad 3.13$$

En donde:

$J_x = \frac{1}{12} * WL^2$: Momento de inercia para una lámina rectangular que gira alrededor de un eje que pasa por el centro de gravedad. $L = 0.36 \text{ m}$

d = Distancia del eje de giro al centro de gravedad

De la figura 3.2 se deduce que $d = 0.02 \text{ m}$, por lo tanto:

$$J = \frac{0.218 * 0.36^2}{12} + 0.218 * 0.02^2$$

$$J = 2.44 * 10^{-3} \text{ Kg.m}^2$$

$f(V_i)$ en la ecuación 3.12 relaciona el torque en función del voltaje de entrada. Este valor se obtiene experimentalmente midiendo el valor del ángulo θ para diferentes valores de entrada del voltaje V_i . En la tabla 3.1 se dan los valores del voltaje aplicado V_i , el ángulo girado por la compuerta y el valor estimado del torque dado por la ecuación 3.10

Tabla 3.1

Relación entre el voltaje, el ángulo y el torque producido por el ventilador

VARIABLES	DATOS OBTENIDOS										
V_i (Volt)	0	1.35	2.63	3.90	5.23	6.56	7.84	9.13	10.46	11.79	13.07
θ (Deg)	0	10.0	13.1	16.3	20.9	25.6	30.0	34.0	37.0	41.5	46.0
T_{Fv} (Kg*m)* 10^{-4}	0	7.53	9.83	12.18	15.48	18.75	21.70	24.26	26.11	28.75	31.22

Para expresar la relación entre el voltaje aplicado y el torque generado por el flujo de aire sobre la compuerta se hace uso de los datos de la tabla 3.1 y mediante un ajuste de regresión a una ecuación de primer orden, se obtiene la siguiente expresión para el torque en función del voltaje:

$$T_{Fv} = 0.0002229 * V_i(t) + 0.000321 \quad 3.14$$

Reemplazando los valores de K_L , J y T_{Fv} en la ecuación 3.12 se obtiene:

$$\frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = -1.778 * \text{sen}\theta + 0.0913 * V_i(t) + 0.131 \quad 3.15$$

La ecuación 3.15 corresponde al modelo matemático del sistema, es no lineal y se debe linealizar alrededor del punto de equilibrio seleccionado.

3.1.2 Linealización del modelo: se toma como punto de equilibrio la posición de la compuerta a un ángulo de $\theta = 30^\circ$

Se definen como variables de estado: $x_1(t) = \theta(t)$, $x_2(t) = \dot{\theta}(t)$ y como variable de entrada $V_i(t)$, entonces:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= -1.778 * \text{sen}x_1 + 0.0913 * V_i(t) + 0.131 \\ y(t) &= x_1(t) \end{aligned} \quad 3.16$$

Para obtener los puntos de equilibrio se igualan las derivadas a cero en la ecuación 3.15 con lo cual se obtiene que:

$$P_0 = [x_1 \quad x_2 \quad V_i] = [30^\circ \quad 0 \quad 8.3]$$

El sistema linealizado toma la forma:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B \cdot V_i(t) \quad 3.17$$

En donde:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix}_{P_0} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial V_i} \\ \frac{\partial f_2}{\partial V_i} \end{bmatrix}_{P_0} \quad 3.18$$

El modelo linealizado es:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1.539 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.0913 \end{bmatrix} V_i(t) \\ y(t) &= [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

La función de transferencia del sistema linealizado es:

$$G_p(S) = \frac{\theta(S)}{V_i(S)} = \frac{0.0913}{S^2 + 1.539} \quad 3.19$$

3.2 IDENTIFICACION UTILIZANDO METODOS EXPERIMENTALES.

3.2.1 Identificación por curva de reacción: Para la Identificación del proceso utilizando el método de curva de reacción es necesario obtener una base de datos conformada por la respuesta de la planta y la señal de entrada que la produce. Para este caso en particular, corresponde a la posición de la compuerta y el voltaje aplicado a los ventiladores axiales para aumentar o disminuir la corriente de aire. Las dos variables expresadas en %. Se tomaron datos aplicando escalones del 10% en el voltaje de alimentación de los ventiladores cubriendo un rango desde 0 a 13 V, esto generó la curva de respuesta que se puede observar en la figura 3.3.

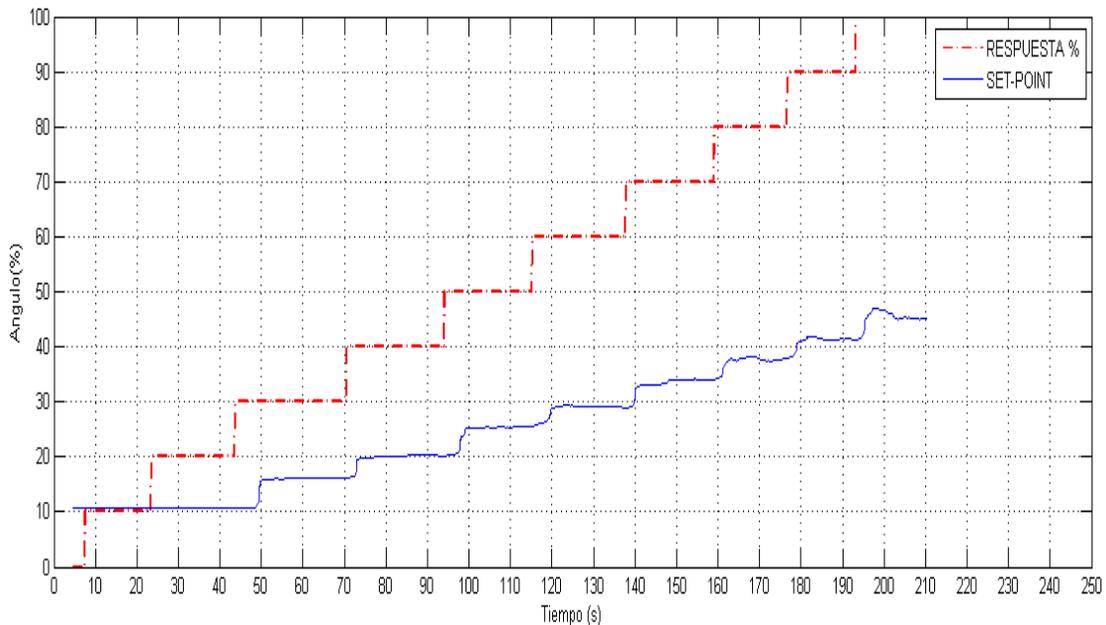


Figura 3.3 Respuesta de la planta ante estímulos tipo escalón.

Fuente: datos tomados por los autores

Continuando con los requerimientos para la realización de la identificación por el método de la curva de reacción, se selecciona de toda la base de datos un escalón cuya respuesta sea representativa del comportamiento de la planta prototipo en el caso que se está desarrollando se seleccionó un cambio de tipo escalón entre el 30% al 40% por ser uno de los más representativos del comportamiento de la

planta, después de esto es necesario recortar y trasladar los datos para que los datos inicien en el origen como se ve en la figura 3.4.

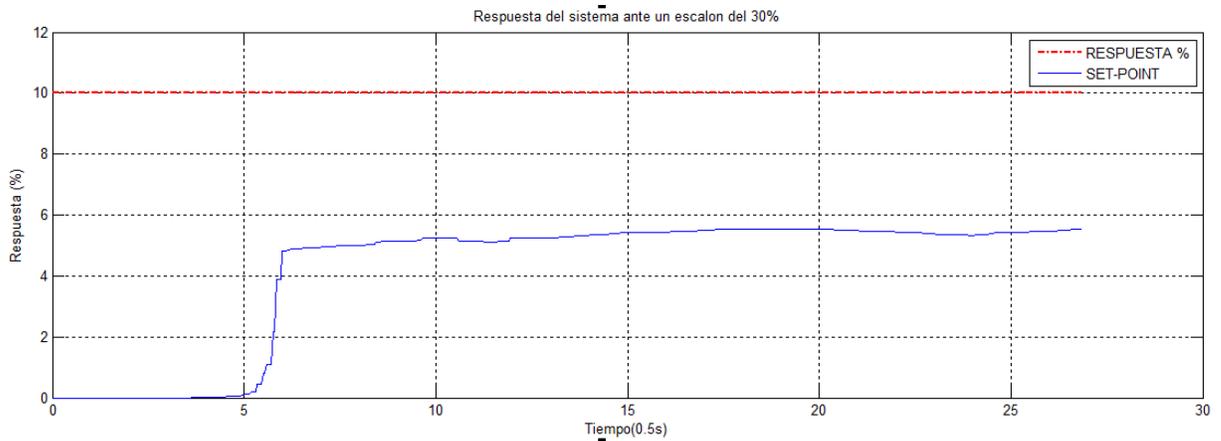


Figura 3.4 Escalón recortado y trasladado.

Fuente: Datos tomados por los autores

Obtenida la curva de reacción, se aproxima el modelo a un sistema de primer orden con retardo (POR), para ello se toman 2 puntos sobre la curva correspondientes al 28.3% y el 63.2% del valor final de la respuesta y se estiman los tiempos t_1 y t_2 transcurridos hasta alcanzar dichos puntos como se ve muestra en la figura 3.5.

Para un sistema de primer orden con retardo, la función de transferencia está dada por:

$$G(S) = \frac{Y(S)}{U(S)} = \frac{K e^{-\theta' s}}{\tau S + 1} \quad 3.20$$

En donde:

K = Ganancia del proceso

τ = Constante de tiempo

θ' = Tiempo muerto o retardo del proceso

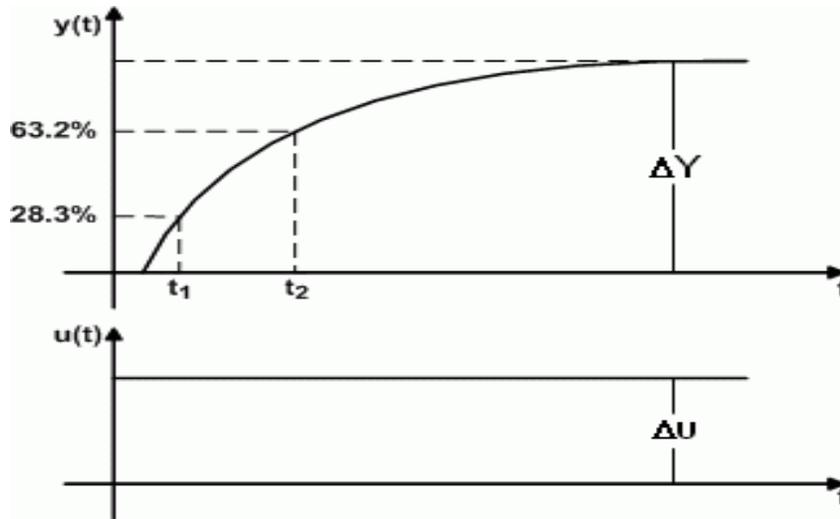


Figura 3.5 Curva de reacción para modelo POR.

Fuente: García (2010)

Los parámetros del proceso se estiman a partir de las ecuaciones:

$$K = \frac{\text{Cambio en la salida}}{\text{Cambio en la entrada}} = \frac{\Delta Y}{\Delta U} \quad 3.21$$

$$\theta' + \tau/3 = t_1 \quad 3.22$$

$$\theta' + \tau = t_2 \quad 3.23$$

Se utilizó un programa en la plataforma LabView® para resolver las ecuaciones anteriores y obtener los parámetros del modelo aproximado a una sistema de primer orden con retardo (POR). Para ejecutar el algoritmo de cálculo se cargan previamente los datos de respuesta de la planta y el programa obtiene automáticamente el valor de los parámetros de la aproximación a una planta POR.

Se aplicaron escalones del 10%, iniciando en el 30%, punto en el cual empieza a responder la planta se obtuvo el modelo de la planta para cada zona y se obtuvo el promedio de los parámetros del proceso (tabla 3.2) con el fin de obtener un sistema representativo del comportamiento real de la planta.

Tabla 3.2

Parámetros obtenidos en la identificación

ESCALÓN (%)	TAO	K	THETA
30	0,15	0,551814	5,75
40	0,15	0,392484	2,3
50	0,45	0,534252	3,6
60	1,65	0,338084	2,55
70	0,3	0,516798	2
80	0,525	0,379615	1,825
90	0,525	0,339068	1,675
100	0,15	0,377346	2,05
PROMEDIO	0,4875	0,42868263	2,71875

De la anterior tabla se obtiene el siguiente modelo POR del proceso identificado

$$G(s) = \frac{0.42868}{0.4875s + 1} * e^{-2.71s} \quad 3.24$$

Además de la identificación por curva de reacción se tomó la base de datos del comportamiento de la planta en desarrollo y se utilizó el programa Matlab® con su herramienta “*indent*” la cual es una software de identificación de sistemas que permite aproximar el sistema a identificar a cualquier modelo matemático. En el desarrollo del trabajo de grado se utilizó esta herramienta para hacer una aproximación del sistema a una planta de primer orden con retardo. Al igual que en la identificación por curva de reacción se tomaron los escalones de 10% en 10% desde el 30% hasta el 100% se ingresaron a la herramienta informática la cual arrojo los parámetros que se calcularon (tabla 3.3) y con estos se obtiene la función de transferencia del mismo.

Tabla 3.3Parámetros obtenidos por el *toolkit*

ESCALÓN (%)	TAO	K	THETA	FIDELIDAD (%)
30	68	0,19394	18	61,54
40	14,17	0,101	18	76,49
50	57,8	0,56	3	63,22
60	46,18	0,061	3	60,51
70	37,04	0,07256	3	68,8
80	10	0,045	1,2624	63,74
90	24,88	0,04	3	66,58
100	18,83	0,044	3	41,45
PROMEDIO	34,576	0,140	6,533	62,791

Además de los parámetros de la función de transferencia de primer orden con retardo se puede observar una columna con nombre “**FIDELIDAD**” esta se refiere a la aproximación del modelo calculado con el modelo real. Existen varios criterios de aceptación del porcentaje de fidelidad pero en este caso se puede considerar el descarte del modelo obtenido por medio de esta herramienta ya que el porcentaje más alto de fidelidad es de un 76,49% y una fidelidad promedio de 62,791%, esto descarta este método por su alto margen de error en comparación con el método de la curva de reacción.

En comparación este tipo de identificación realizada por el *toolbox* arroja parámetros muy lejanos de los correspondientes a la planta real. Los otros dos modelos identificados se pueden tomar como referencia ya que si se observa su función de transferencia con modelos estables y con una cierta similitud entre ambos.

3.2.2 Identificación por mínimos cuadrados recursivos: Se procede a realizar una identificación en línea utilizando el método de “mínimos cuadrados recursivos”, mediante el cual se obtiene un modelo de la forma:

$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_nz^{-n}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n}} \quad 3.25$$

Para realizar la identificación se definen los siguientes elementos:

$$\theta = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n]^T = \text{Vector de parámetros}$$

$$f^T(k) = [-y(k-1) \ -y(k-2) \ \dots \ -y(k-n) \ u(k-1) \ u(k-2) \ \dots \ u(k-n)]$$

$$P(k) = \alpha I = \text{Matriz de covarianza}$$

$$L(k+1) = \text{Factor de corrección de error}$$

$$e(k) = \text{Error en la estimación}$$

El procedimiento para realizar la identificación es el siguiente (García 2012):

1. Seleccionar $\theta(k) = [\mathbf{0}]^T$ y $P(k) = \alpha I$. $1000 \leq \alpha \leq 10000$

2. Conformar el vector de datos : $f^T(k+1)$

3. Calcular $L(k+1)$ mediante la ecuación:

$$L(k+1) = \frac{P(k)f(k+1)}{\lambda + f^T(k+1)P(k)f(k+1)}$$

4. Obtener los nuevos valores de $y(k+1)$ y de $u(k+1)$

5. Calcular el error en la estimación:

$$e(k+1) = y(k+1) - f^T(k+1)\theta(k)$$

6. Calcular los nuevos parámetros estimados:

$$\theta(k+1) = \theta(k) + L(k+1)e(k+1)$$

7. Actualizar la matriz de covarianza:

$$P(k+1) = \frac{1}{\lambda} [I - L(k+1)f^T(k+1)]P(k)$$

8. Actualizar el vector de medidas: $f(k+2)$

9. Hacer $k = k + 1$ y regresar al paso 3.

Para la identificación en línea se utilizó la plataforma Labview® y una librería con el estimador RLS, la cual es la encargada de hacer el desarrollo computacional para dar una estimación de los vectores correspondientes a la identificación del modelo (ver figura 3.6)

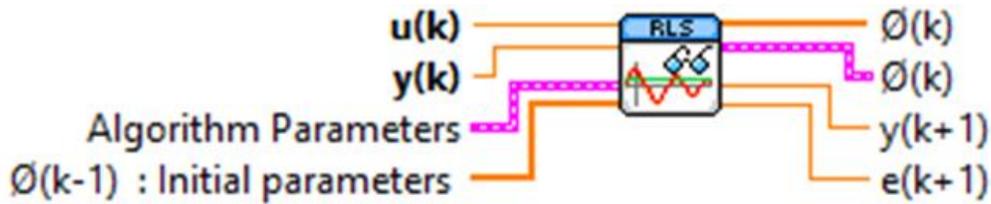


Figura 3.6 Estimador RLS

Fuente: LabView®

3.2.3 Adaptabilidad del control a los cambios del sistema: La adaptación se hace por medio del estimador RLS el cual, al ingresarle los parámetros iniciales (theta inicial, matriz de covarianza, factor de olvido) estima en línea el modelo en tiempo discreto calculando los coeficientes del numerador y del denominador llamados: a_1, a_2, \dots y b_1, b_2 a partir de los datos de entrada-salida. La figura 3.7 muestra el diagrama de bloques del sistema.

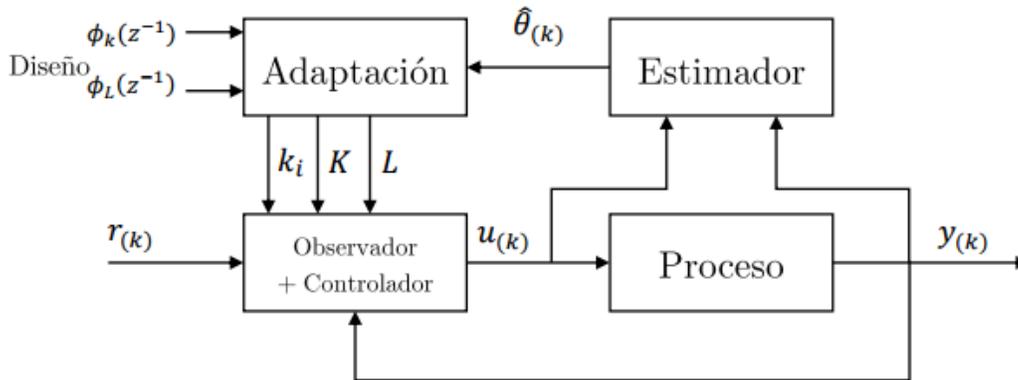


Figura 3.7 Servo integrador adaptativo

Fuente: García (2010)

Para los métodos de control adaptables el identificador de mínimos cuadrados recursivo (RLS) es un estimador *on line* (Figura 3.8), que permite una aproximación a un modelo tipo ARX de un sistema. El cual debe ser un proceso estable, linealizable y que se pueda representar con una sola entrada y una sola salida.

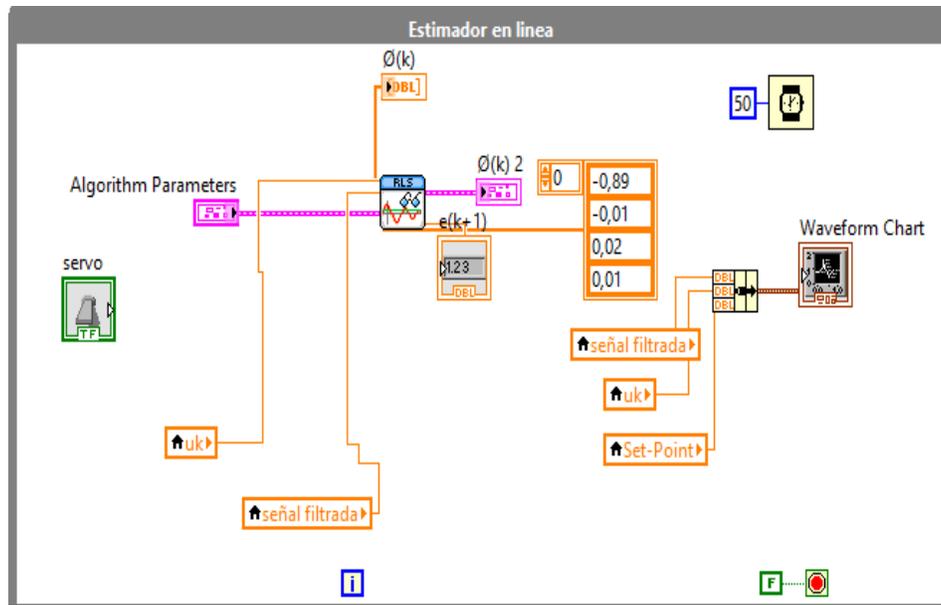


Figura 3.8 Estimación en línea

Fuente: Tomada por los autores

En sistemas de este tipo se requiere que los parámetros del modelo estimado se vayan adaptando en función de algunos cambios del sistema. Para ello es necesario controlar las mediciones anteriores y presentes que influyan en la ley de control, conjugando factores de olvido, de correlación para que los datos converjan más rápido y garanticen un proceso estable.

El vector de parámetros es entregado por el RLS *online* al algoritmo de control (Figura 3.9), es decir si los coeficientes cambian el controlador cambia o se adapta para generar la respuesta deseada.

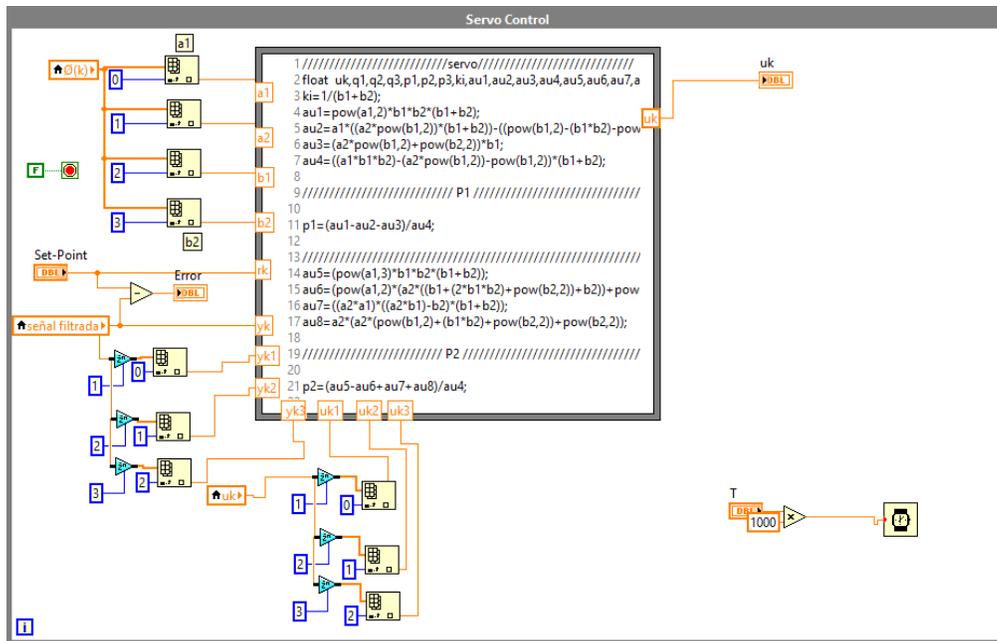


Figura 3.9 Implementación de control tipo Servo

Fuente: Tomada por los autores

4. ALGORITMO DE CONTROL ADAPTATIVO TIPO SERVO-INTEGRADOR PARA CONTROLAR LA POSICIÓN ANGULAR DE LA COMPUERTA AFECTADA POR UNA CORRIENTE DE AIRE GENERADA POR EL VENTILADOR AXIAL

4.1 CONTROLADOR TIPO SERVO CON INTEGRADOR

Sea el sistema discreto definido mediante la ecuación de estado:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad 4.1$$

La figura 4.1 muestra el sistema de control por realimentación del estado observado incluyendo un integrador en la trayectoria directa para estabilizar adecuadamente el sistema y mejorar su exactitud.

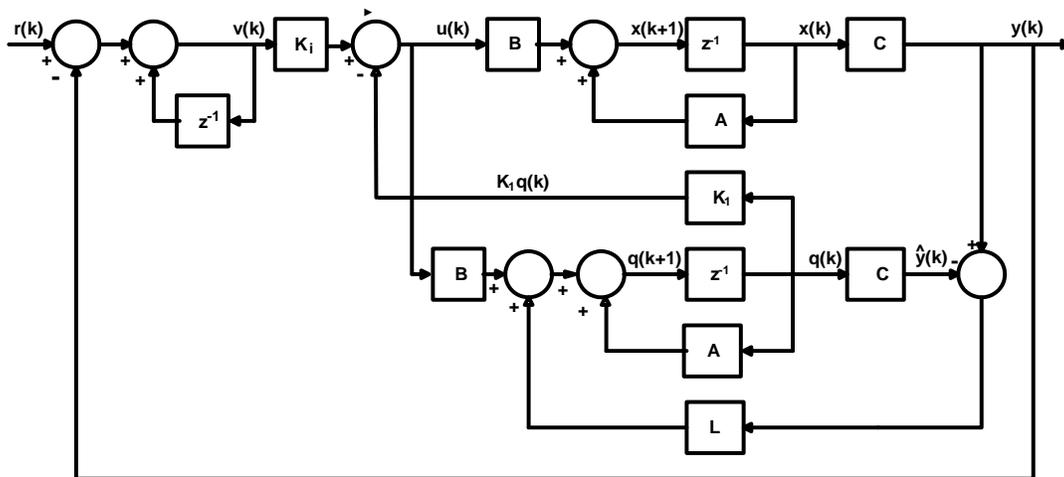


Figura 4.1 Sistema tipo Servo con realimentación del estado observado

Fuente: García (2012)

Para realizar el diseño, utilizando la técnica de asignación de polos, se debe estimar la matriz K_i correspondiente al integrador y la matriz K_1 correspondiente a la matriz de ganancia de realimentación. Se puede demostrar que (Franklin y Powell 1990)

$$[K_1 : K_i] = \left[\hat{K} + [0 : I_m] \right] \left[\begin{array}{c|c} A - I_n & B \\ \hline CA & CB \end{array} \right]^{-1} \quad 4.2$$

En donde:

$$\hat{K} = [0 \ 0 \ \dots \ 1] [\hat{B} \ \hat{A}\hat{B} \ \hat{A}^2\hat{B} \ \dots \ \hat{A}^{n-1}\hat{B}]^{-1} \phi(\hat{A}) \quad 4.3$$

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{(n+m) \times (n+m)} \quad \hat{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix}_{(n+m) \times m} \quad 4.4$$

Ecuación característica deseada:

$$z^n + \alpha_1 z^{n-1} + \alpha_2 z^{n-2} + \dots + \alpha_n = 0$$

Por lo tanto:

$$\phi(\hat{A}) = \hat{A}^n + \alpha_1 \hat{A}^{n-1} + \alpha_2 \hat{A}^{n-2} + \dots + \alpha_n I$$

La ley de control para el sistema está dada por:

$$U(z) = \frac{[1 + K_1[zI - A + LC]^{-1}B]^{-1} [K_i z[R(z) - Y(z)] - K_1(z-1)[zI - A + LC]^{-1}LY(z)]}{z-1} \quad 4.5$$

Las matrices K_i y K_1 se obtienen utilizando las ecuaciones 4.2 y 4.3. La matriz L , correspondiente a la matriz de ganancia del observador, se calcula a partir de la ecuación:

$$L = \phi(A) \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad 4.5$$

Para realizar el control de la posición de la compuerta, se aproxima el sistema a un modelo discreto de la forma:

$$G_p(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad 4.6$$

La ecuación de estado para el sistema en forma canónica controlable (FCC) es:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u(k) \quad 4.7$$

$$y(k) = [b_1 \quad b_2] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix}$$

A partir de la ecuación 4.7 y utilizando las ecuaciones 4.2 a 4.5 se obtiene la ley de control para implementar el controlador adaptativo para el sistema tipo servo con integrador.

Las matrices para el cálculo de la ley de control son:

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \hat{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad 4.8$$

$$\left[\begin{array}{c|c} A - I_n & B \\ \hline CA & CB \end{array} \right] = \left[\begin{array}{ccc|c} -a_1 - 1 & -a_2 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ b_2 - a_1 b_1 & -a_2 b_1 & b_1 & 0 \end{array} \right] \quad 4.9$$

Para obtener las matrices K_1 y K_i se asignan todos los polos de lazo cerrado en el origen, así la ecuación característica es:

$$z^3 = 0$$

$$\phi(\hat{A}) = \hat{A}^3 = \begin{bmatrix} -a_1(a_1^2 - 2a_2) & -(a_1^2 - a_2)a_2 & a_1^2 - a_2 \\ a_1^2 - a_2 & a_1 a_2 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 4.10$$

$$[\hat{B} \quad \hat{A} \cdot \hat{B} \quad \hat{A}^2 \hat{B}] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -a_1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 4.11$$

$$\hat{K} = [0 \quad 0 \quad 1] * \begin{bmatrix} 0 & 1 & -a_1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} -a_1(a_1^2 - 2a_2) & -(a_1^2 - a_2)a_2 & a_1^2 - a_2 \\ a_1^2 - a_2 & a_1 a_2 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 4.12$$

$$\hat{K} = [a_1^2 - a_2 \quad a_1 a_2 \quad -a_1] \quad 4.13$$

$$[K_1 \quad K_i] = [[a_1^2 - a_2 \quad a_1 a_2 \quad -a_1] + [0 \quad 0 \quad 1]] * \begin{bmatrix} -a_1 - 1 & -a_2 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ -a_1 & -a_2 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad 4.13$$

$$[K_1 \quad K_i] = \left[-\frac{a_1(b_1 + b_2) - b_2}{b_1 + b_2} \quad -a_2 \quad \frac{1}{b_1 + b_2} \right] \quad 4.14$$

Es decir:

$$K_1 = \left[-\frac{a_1(b_1 + b_2) - b_2}{b_1 + b_2} \quad -a_2 \right] \quad K_i = \left[\frac{1}{b_1 + b_2} \right] \quad 4.15$$

Para calcular la matriz L del observador, se asignan los polos en el origen, así la ecuación característica el observador es:

$$z^2 = 0 \quad 4.16$$

Por lo tanto:

$$\phi(A) = A^2 = \begin{bmatrix} a_1^2 - a_2 & a_1 \cdot a_2 \\ -a_1 & -a_2 \end{bmatrix} \quad 4.17$$

$$\begin{bmatrix} C \\ C \cdot A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 \\ b_2 - a_1 \cdot b_1 & -a_2 \cdot b_1 \end{bmatrix} \quad 4.18$$

$$L = \begin{bmatrix} a_1^2 - a_2 & a_1 \cdot a_2 \\ -a_1 & -a_2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} b_1 & b_2 \\ b_2 - a_1 \cdot b_1 & -a_2 \cdot b_1 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad 4.19$$

$$L = \begin{bmatrix} -\frac{a_1^2 \cdot b_2 - a_1 \cdot a_2 \cdot b_1 - a_2 \cdot b_2}{a_1 \cdot b_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1^2 - b_2^2} \\ \frac{a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1}{a_1 \cdot b_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1^2 - b_2^2} \end{bmatrix} \quad 4.20$$

La ley de control toma la forma:

$$U(z) = \frac{K_i z^3 R(z) - K_i z^3 Y(z) + q_1 z^2 Y(z) + q_2 z Y(z) + q_3 Y(z)}{z^3 + p_1 z^2 + p_2 z + p_3} \quad 4.21$$

Y en el dominio del tiempo discreto:

$$u(k) = K_i \cdot r(k) - K_i \cdot y(k) + q_1 \cdot y(k-1) + q_2 \cdot y(k-2) + q_3 \cdot y(k-3) - p_1 \cdot u(k-1) - p_2 \cdot u(k-2) - p_3 \cdot u(k-3) \quad 4.22$$

En donde:

$$K_i = \frac{1}{b_1 + b_2} \quad 4.23$$

$$q_1 = \frac{a_1^3(b_1 + b_2)b_2 - a_1^2(a_2 b_1(b_1 + b_2) + b_2^2) - a_1 a_2 b_2(b_1 + 2b_2) + a_2(a_2 b_1(b_1 + b_2) + b_2^2)}{(a_1 b_1 b_2 - a_2 b_1^2 - b_2^2)(b_1 + b_2)} \quad 4.24$$

$$q_2 = -\frac{a_1^3(b_1 + b_2)b_2 - a_1^2(a_2(b_1^2 + 2b_1 b_2 + b_2^2) + b_2^2) + d + a_2(a_2(b_1^2 + b_1 b_2 + b_2^2) + b_2^2)}{(a_1 b_1 b_2 - a_2 b_1^2 - b_2^2)(b_1 + b_2)} \quad 4.25$$

$$q_3 = - \frac{(a_1^2(b_1 + b_2)b_2 - a_1(a_2b_1(b_1 + b_2) + b_2^2) - a_2b_2^2)a_2}{(a_1b_1b_2 - a_2b_1^2 - b_2^2)(b_1 + b_2)} \quad 4.26$$

$$p_1 = \frac{a_1^2b_1(b_1 + b_2)b_2 - a_1(a_2b_1^2(b_1 + b_2) - (b_1^2 - b_1b_2 - b_2^2)b_2) - (a_2b_1^2 + b_2^2)b_1}{(a_1b_1b_2 - a_2b_1^2 - b_2^2)(b_1 + b_2)} \quad 4.27$$

$$p_2 = \frac{a_1^3b_1(b_1 + b_2)b_2 - a_1^2(a_2(b_1 + 2b_1b_2 + b_2^2) + b_2^2) + a_1a_2(a_2b_1 - b_2)(b_1 + b_2) + a_2(a_2(b_1^2 + b_1b_2 + b_2^2) + b_2^2)}{(a_1b_1b_2 - a_2b_1^2 - b_2^2)(b_1 + b_2)} \quad 4.28$$

$$p_3 = \frac{(a_1^2(b_1 + b_2)b_2 - a_1(a_2b_1(b_1 + b_2) + b_2) - a_2b_2^2)b_2}{(a_1b_1b_2 - a_2b_1^2 - b_2^2)(b_1 + b_2)} \quad 4.29$$

Una vez realizada la programación en la plataforma LabView® de la ley de control, donde se tiene en cuenta principalmente los coeficientes entregados por el RLS *online*, la salida de la planta (señal) y la ley de control con sus retardos. Una vez ingresados en la función esta se encarga de calcular la ley de control para el actual instante de muestreo.

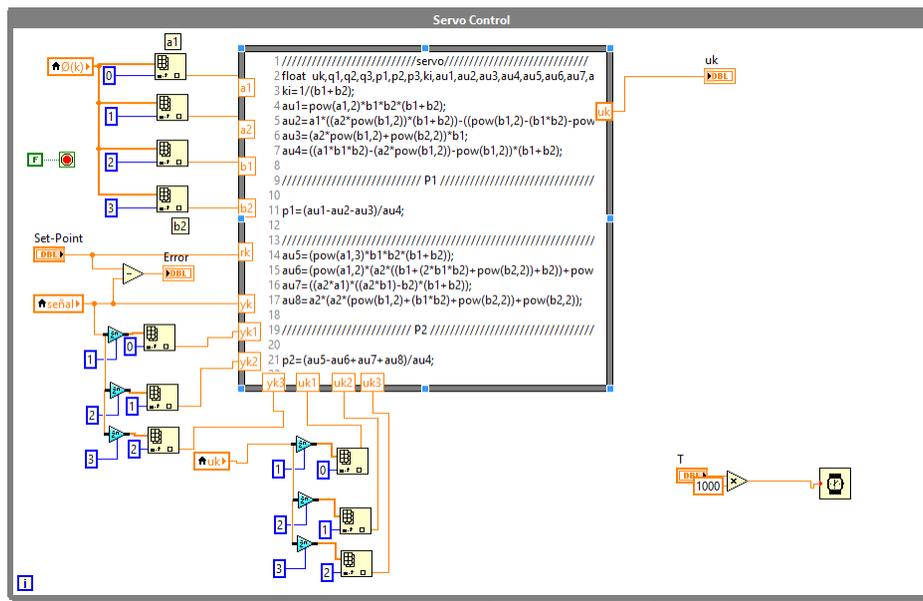


Figura 4.2 Implementación ley de control tipo servo.

Fuente: Tomada por los autores

4.2 CONTROLADOR PID POR CANCELACIÓN DE CEROS Y POLOS

Este método consiste en obtener los parámetros del controlador cancelando ceros del controlador con polos de la planta. Para llevar a cabo el diseño, se asume que las funciones de transferencia de los controladores son:

$$D(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q_0[z + K]}{z - 1} \quad 4.30$$

Para el controlador PI, y:

$$D(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q_0[z^2 + K_1z + K_2]}{z(z - 1)} \quad 4.31$$

Para el controlador PID.

El procedimiento para el diseño del controlador es el siguiente:

- Controlador PI:** se cancela el cero del controlador con un polo de la planta.
- Controlador PID:** Se cancelan los dos ceros del controlador con dos polos de la planta.
- Seleccionar inicialmente un error de estado estable e_{ss} adecuado.

El procedimiento anterior permite establecer las ecuaciones necesarias para calcular los parámetros de los controladores PI y PID.

Los errores de estado estable para entradas escalón, rampa y parábola unitarias, se resumen a continuación:

- Para entrada escalón:

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + K_p} \quad K_p = \lim_{z \rightarrow 1} D(z)G_p(z) \quad 4.32$$

K_p = Coeficiente de error de posición

- Para entrada rampa:

$$e_{ss} = \frac{1}{K_v} \quad K_v = \frac{1}{T} \lim_{z \rightarrow 1} (z - 1)D(z)G_p(z) \quad 4.33$$

K_v = Coeficiente de error de velocidad

- Para entrada parábola:

$$e_{SS} = \frac{1}{K_a} \quad K_a = \frac{1}{T^2} \lim_{z \rightarrow 1} (z-1)^2 D(z) G_P(z) \quad 4.34$$

K_a = Coeficiente de error de aceleración.

La planta correspondiente a la compuerta neumática se aproxima a un modelo de la forma:

$$G_P(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} = \frac{b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z + a_2} \quad 4.35$$

Como es una planta de segundo orden, se diseña un controlador PID. Por lo tanto los dos ceros del controlador deben cancelar los dos polos de la planta. En este caso para lograr lo anterior se debe cumplir que el numerador del controlador sea igual al denominador de la planta, es decir:

$$z^2 + K_1 z + K_2 = z^2 + a_1 z + a_2 \quad 4.36$$

Por lo tanto:

$$K_1 = a_1 \quad K_2 = a_2 \quad 4.37$$

Para calcular el parámetro q_0 se asume un error de estado estable adecuado, e_{SS} en la respuesta del sistema ante una entrada en forma de rampa unitaria, esto porque el sistema resulta de tipo 1 y el error ante una entrada en escalón es cero, entonces:

$$K_v = \frac{1}{T} \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) D(z) G_P(z)$$

$$\frac{1}{e_{SS}} = \frac{1}{T} \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) D(z) G_P(z)$$

Reemplazando las expresiones para $D(z)$ y $G_P(z)$ se obtiene:

$$\frac{1}{e_{SS}} = \frac{1}{T} \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) * \frac{q_0 [z^2 + K_1 z + K_2]}{z(z-1)} * \frac{b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z + a_2}$$

Teniendo en cuenta la ecuación 4.24, se cancelan los ceros del controlador con los polos de la planta, entonces:

$$\frac{1}{e_{SS}} = \frac{1}{T} * q_0(b_1 + b_2)$$

Al despejar q_0 resulta:

$$q_0 = \frac{T}{e_{SS}(b_1 + b_2)} \quad 4.38$$

Si se desea un controlador lento se hace:

$$q_0 = \frac{0.5 * T}{e_{SS}(b_1 + b_2)} \quad 4.39$$

Así, la función de transferencia del controlador PID resulta ser:

$$D(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{0.5 * T}{e_{SS}(b_1 + b_2)} * \frac{[z^2 + a_1z + a_2]}{z(z - 1)} \quad 4.40$$

$$D(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{0.5 * T}{e_{SS}(b_1 + b_2)} + \frac{0.5 * T * a_1}{e_{SS}(b_1 + b_2)} * z^{-1} + \frac{0.5 * T * a_2}{e_{SS}(b_1 + b_2)} * z^{-2} \quad 4.41$$

La ley de control es:

$$u(k) = q_0 * e(k) + q_1 * e(k - 1) + q_2 * e(k - 2) + u(k - 1) \quad 4.42$$

En donde:

$$q_0 = \frac{0.5 * T}{e_{SS}(b_1 + b_2)} \quad q_1 = \frac{0.5 * T * a_1}{e_{SS}(b_1 + b_2)} \quad q_2 = \frac{0.5 * T * a_2}{e_{SS}(b_1 + b_2)} \quad 4.43$$

Para el diseño se selecciona el periodo de muestreo T usando la ecuación 4.44 y el error de estado estable e_{SS} , los demás parámetros se obtienen por identificación en línea del sistema.

$$0,2(\tau_{eq} + \theta') < T < 0,6(\tau_{eq} + \theta') \quad 4.44$$

Implementando el algoritmo de control en la plataforma LabView® se escoge un $e_{SS} = 4$ y se toman los demás datos del estimador en línea (Figura 4.3).

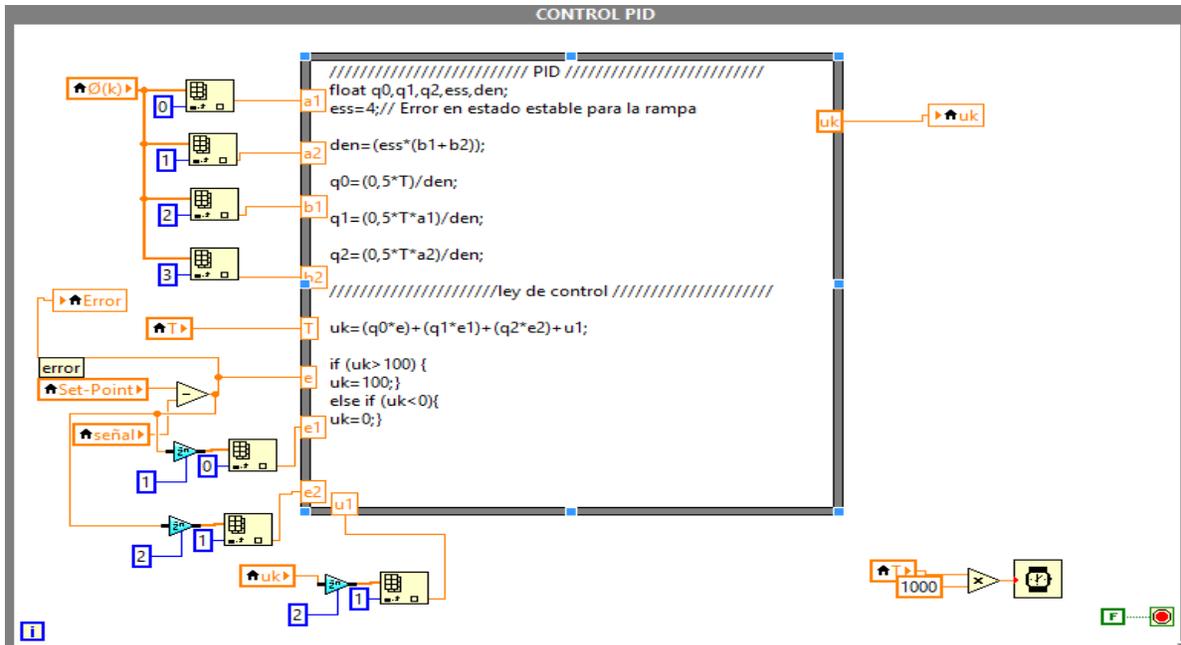


Figura 4.3 Algoritmo control PID

Fuente autores del trabajo.

4.3 COMPARACION POR MEDIO DE LAS METRICAS DEL ERROR ENTRE LOS CONTROLADORES DISEÑADOS.

Tomando como referencia un punto de estabilidad se estimula la planta con un escalón del 10% representado en el cambio de *set-point* del 25% al 35 % durante un periodo de tiempo de 60 segundos, con la respuesta se calcula el error, diferencia instantánea entre el *set-point* y el valor de la variable controlada, en cada periodo de muestreo. El índice de desempeño del controlador se determina aplicando dos de los criterios de error existentes. En este caso son: el IAE y el ICE respectivamente, los cuales se refieren en su orden a la integral del valor absoluto del error (4.44) y a la integral del error al cuadrado (4.45)

$$IAE = \int_{t_1}^{t_2} |e(t)| dt \quad 4.44$$

$$ICE = \int_{t_1}^{t_2} e^2 dt \quad 4.45$$

En la figura 4.4 se observa la gráfica de la respuesta de la planta con el controlador PID diseñado: la salida hacia el EFC es oscilatoria al igual que la respuesta de la variable controlada (posición de la compuerta). En esta grafica se aprecia que, finalmente, la respuesta converge hacia el valor del *set-point* con error de estado estable prácticamente igual a cero. Datos numéricos de respuesta temporal: tiempo de establecimiento: $t_s = 50 s$, Máximo sobreimpulso: $Mp = 12\%$, error de estado estable $e_{ss} = 0$. El error de estado estable se toma como un promedio pues el sistema presenta pequeñas oscilaciones a lado y lado del *set-point*

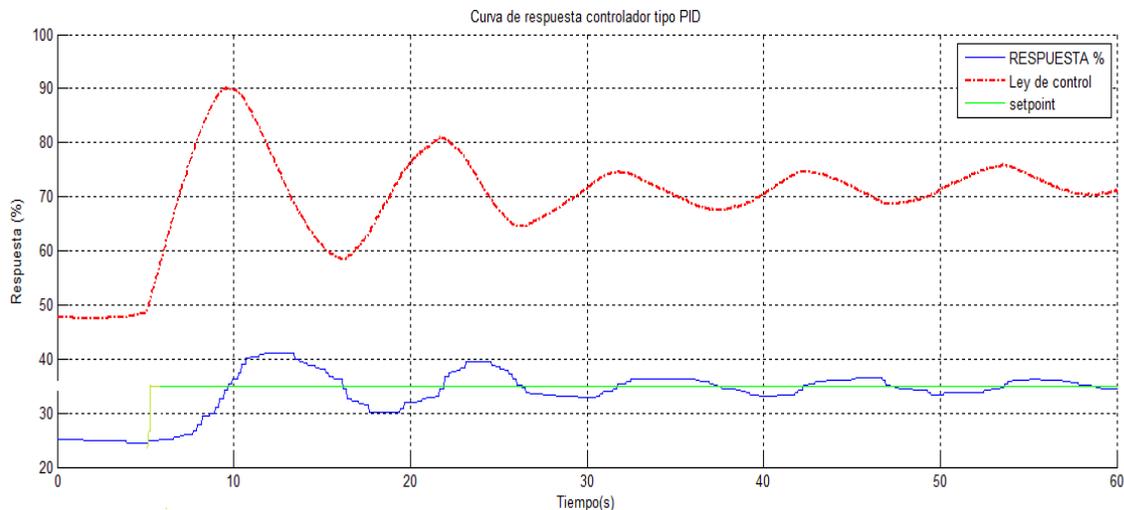


Figura 4.4 Respuesta con controlador PID

Fuente: Tomada por los autores.

En la figura 4.5 se observa la respuesta del sistema con el controlador tipo servo con integrador luego de estimular a la planta con una perturbación tipo escalón del 10% representado en el cambio de *set-point* del 25% al 35 %. Se evidencia que la

respuesta es un poco más rápida y que tiene un tiempo de establecimiento más corto en comparación con el observado con el controlador PI. Además de un error en estado estable cercano a cero lo cual hace que la planta, en este caso, tenga una respuesta más suave ante el estímulo aplicado. Datos numéricos de respuesta temporal: tiempo de establecimiento: $t_s = 30\text{ s}$, Máximo sobreimpulso $M_p = 5\%$, Error de estado estable $e_{ss} = 0$. El error de estado estable se toma como un promedio pues el sistema presenta pequeñas oscilaciones a lado y lado del *setpoint*

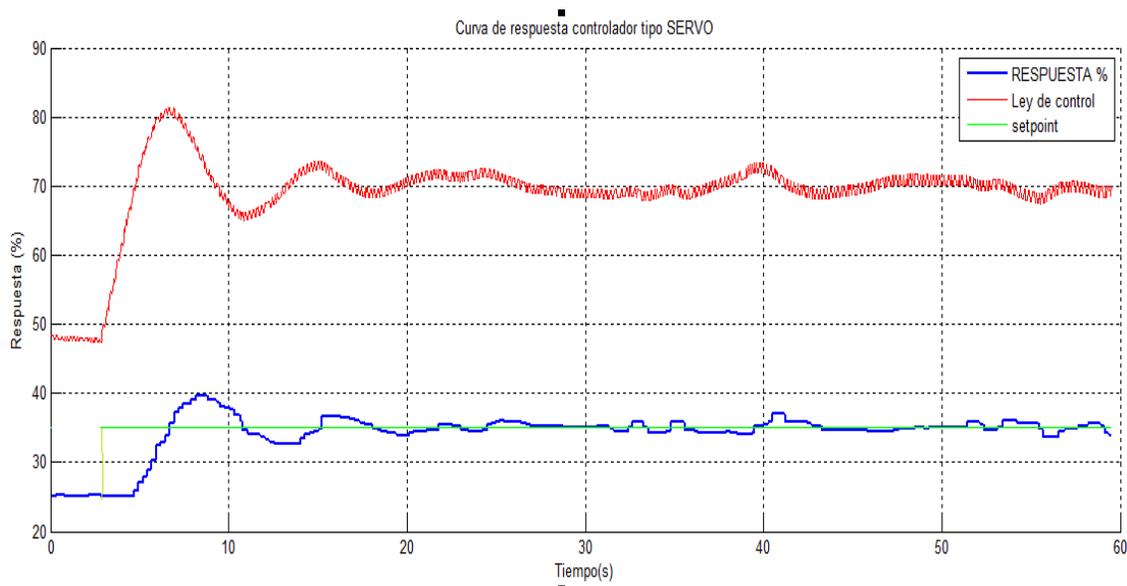


Figura 4.5 Respuesta del controlador tipo SERVO.

Fuente: Tomada por los autores.

En la figura 4.6 se presentan en una misma gráfica, la respuesta del controlador PID y la del controlador tipo servo con integrador. En ella se aprecia con claridad que, en cuanto a características de respuesta temporal, el controlador tipo servo presenta mejor desempeño que el controlador PI: menor tiempo de establecimiento, menor sobreimpulso y una mejor respuesta del elemento final de control.

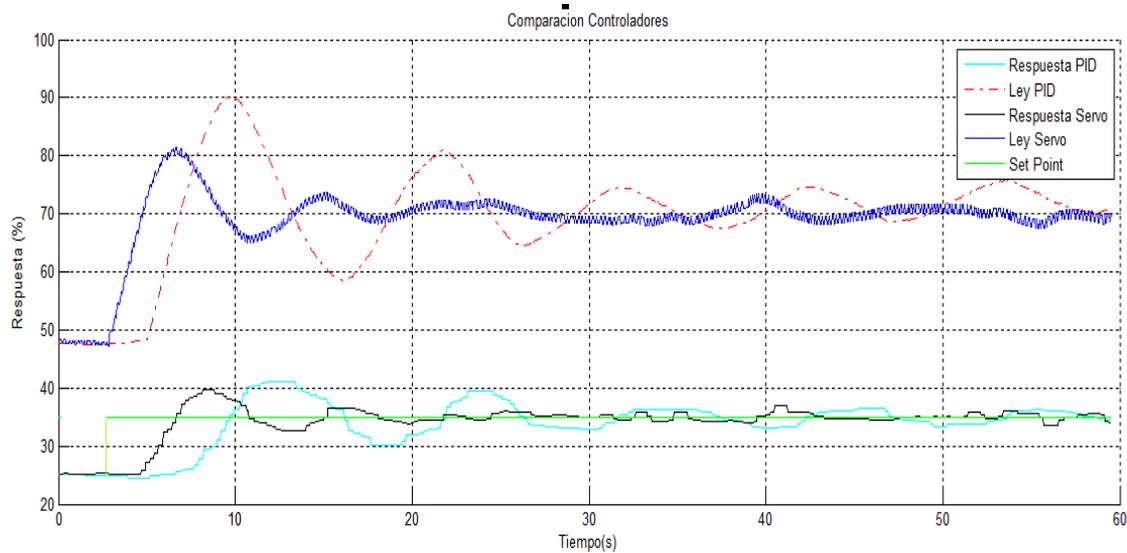


Figura 4.6 Comparación controladores.

Fuente: Tomada por los autores.

Tomando como base los criterios de la integral del error y específicamente los criterios de la integral del valor absoluto del error (IAE) y el de la integral del error al cuadrado (ICE), se obtienen los resultados mostrados en la tabla 4.1. Para estimar el valor de estos índices de comportamiento se consideró para los dos controladores un cambio en escalón del 10% correspondiente al pasar el *set-point* del 25% al 35% y dejó transcurrir un tiempo de 60 s. en la toma de datos, tiempo para el cual se observó que el sistema había alcanzado la estabilidad. Cada muestra contiene 1191 datos.

Tabla 4.1

Valores de los criterios de la integral del error

	SERVO	PID
IAE	1472.4	2633.3
ICE	5639	12016

Fuente: Elaborada por los autores

En la tabla 4.1 se evidencia que al establecer los criterios de la integral del error como métrica de comparación del desempeño de los dos controladores, que el sistema con el controlador tipo servo con integrador presenta mejor comportamiento en comparación con el PID, ya que posee unos índices de error menores, es decir que es más exacto, que la respuesta converge más rápido hacia el *set-point*, con error en estado estable promedio igual a cero y que tiene mejor velocidad de respuesta y estabilidad.

5. CONCLUSIONES

- El controlador tipo servo con integrador adaptativo integrado con el estimador de mínimos cuadrados (RLS) en una planta de respuesta rápida, como la presentada en este trabajo, presenta un mejor desempeño que el controlador PID a la luz de las métricas de respuesta temporal y de las de la integral del error a pesar de que éste controlador tiene un costo computacional más alto que el del controlador PID.
- En el trabajo desarrollado se experimentó con el uso de un método no invasivo para la medición de una variable que en el caso concreto fue la posición angular, este método resultó ser eficiente y confiable ya que se puede tener un elemento de medición aislado de los ambientes de trabajo adversos que puede tener el proceso.
- Se evidencio que la variable a medir, el ángulo de inclinación de la compuerta, es muy sensible a perturbaciones externas como corrientes de aire, debido a las características físicas de la compuerta, como su peso muy bajo y el sistema de suspensión de la misma, esto se minimizó con un filtro implementado por software (filtro de medias), el cual tenía limitantes ya que al aumentar el número de muestras para el promedio ingresaba un retardo considerable al lazo de control.
- Al utilizar aplicaciones de visión artificial en un proceso como en este caso que se usó como elemento de medición, se debe tener en cuenta diferentes factores ya que la obtención y el procesamiento de la imagen es muy sensible y se ve afectada por condiciones de medio ambiente como son: la iluminación, el fondo y la polución. Pero, gracias al alto contraste que tenía la sección transversal de la compuerta con el fondo estos factores de redujeron considerablemente obteniendo resultados homogéneos en diferentes ambientes de medición.

- La planta prototipo desarrollada permite tener un proceso a pequeña escala con comportamiento no lineal, que representa un proceso poco común pero que se puede trabajar como cualquier otro proceso, lo que permite a los estudiantes un acercamiento a variables diferentes a las más comunes como son nivel, presión, flujo etc.
- Se logra la identificación de la planta por tres métodos diferentes, dos de los cuales son de mayor uso por parte de la teoría del control y uno que es exclusivo de la plataforma Matlab®, esto permitió tener una función de transferencia lo más cercana posible al comportamiento real de la planta prototipo. Además de esto se implementa un identificador en línea RLS el cual obtiene una función de transferencia en línea con el proceso por lo cual hace parte del diseño adaptativo del controlador.
- Con el modelo matemático de la planta se diseñaron los algoritmos de control, en primera instancia se experimentó con un controlador tipo servo con integrador obteniendo la ubicación de los polos deseados basados en características de respuesta temporal, esto presento algunos problemas ya que a la hora de puesta en línea con la planta real no se tenían los resultados esperado. Este problema se solucionó ubicando los polos en el origen con lo cual se obtiene una ley de control mas sencilla y de menor costo computacional.
- Tomando como base las métricas de la integral del error, se puede concluir que el desempeño del control tipo servo con integrador es mejor en comparación con el del controlador PID, además si se tiene en cuenta la respuesta temporal de los dos controladores, se observa que es más estable y rápido el tipo servo con integrador.
- Los resultados obtenidos llevan a la conclusión de que el uso de los controladores avanzados constituye una buena opción para controlar procesos a nivel industrial.

6. RECOMENDACIONES

- Implementar otro tipo de controladores avanzados para observar la respuesta de la planta, se recomienda un controlador por ganancia programable, ya que por el comportamiento del sistema lo hacen un buen candidato para su implementación.
- Probar con el controlador PID por cancelación de polos desarrollado en el trabajo haciendo el valor de $q_2 = 0$, lo cual eliminaría la parte derivativa de dicho controlador constituyendo así un control PI.
- Instalación de ventiladores axiales más potentes para aumentar el rango de trabajo de la planta, logrando que la compuerta alcance un ángulo de elevación mayor, sin disminuir el peso de la compuerta ya que esto puede ocasionar una señal con más ruido de la que se tiene.
- El tiempo de cálculo del algoritmo de control es importante en el desempeño del sistema en lazo cerrado, en virtud de que de ser mayor a un periodo de muestreo, la dinámica del cálculo *on-line* es distinta y el desempeño cambia. Se recomienda por tanto, elegir el tiempo de muestreo un tanto mayor al tiempo de procesamiento del lazo de control, es decir, el tiempo de adquisición de datos sumado al tiempo de procesamiento y respuesta del sistema de control y actuador.
- La implementación del algoritmo de control adaptativo tipo servo con integrador, por tener una estructura de operaciones compleja, demanda un elevado coste computacional, condición que debe ser considerada antes de optar por este controlador en procesos de dinámica muy rápida.

- El uso de restricciones para el cálculo de la señal de control, provoca una secuencia de señales de control dentro de los límites de operación evitando saturaciones, lo que es muy recomendable en sistemas que demanden prolongación de vida útil en el elemento final de control y no sean demasiado exigentes en tiempos de respuesta.

REFERENCIAS

García, L y Arroyave, M. (2010). *Controlador tipo servo con observador de orden completo y controlador según Ciancone Marlín para un sistema de flujo*. Revista Politécnica ISSN 1900-2351, Año 6, Número 10, 2010. Politécnico Colombiano J.I.C. Medellín.

Gordillo, E y Yanes, J. (2009). *Aplicación de visión con LabVIEW para la detección de frascos con turbiedades*. Tesis de grado. Escuela politécnica del litoral. Facultad de Ingeniería en electricidad y computación. Guayaquil. Recuperado el 18 de abril de 2016 de: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/16157>

Vargas (2010) *Sistema de visión artificial para el control de calidad en piezas cromadas*. Tesis de grado. Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica unidad Azcapotzalco. Recuperado el 15 de mayo de 2016 de: <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/7250/68.pdf?sequence=1>

Mosquera, V. Bacca, G. Quiñones, O. Díaz; A. (2012). *Control de posición de un sistema de levitación neumático*. Revista Universitaria en Telecomunicaciones Informática y Control. Volumen 1. N° 2. Noviembre 2012. ISSN 2227 – 3735. Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca Popayán, Colombia. Recuperado el 18 de abril de 2016 de: ciclope.unicauca.edu.co/rutic/index.php/rutic/article/download/163/49

Pineda, M y Vivas, A. (2008). *Control de un modelo aerodinámico aplicando sistemas difusos*. Tesis de grado. Escuela Politécnica Nacional Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Quito. Recuperado el 10 de abril de 2016 de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1082/1/CD-1920.pdf>

Tamayo, S (2014). *Construcción y control por variables de estado de una plataforma didáctica de levitación magnética*. Tesis de grado. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Eléctrica y electrónica. Quito. Recuperado el 15 de abril de 2016 de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7280>

García, L (2012). *Control digital. Teoría y práctica*. Politécnico Colombiano JIC. Tercera Edición. ISBN 978-958-9090-25-1

Franklin, G. Powell, D. (1990). *Digital Control of Dynamic Systems*. Addison Wesley, 1990.

Anónimo. (2012). *Visión artificial e interacción sin mandos*. Recuperado en abril del 2016 de: <http://sabia.tic.udc.es/gc/Contenidos%20adicionales/trabajos/3D/VisionArtificial/index.html>

ANEXOS

ANEXO 1: MANUAL TÉCNICO P-TAD S01 BASIC

P-TAD S01 Basic Manual Técnico/ Technical Manual

Manual Técnico

Technical Manual

P-TAD S01 BASIC

USB DAQ Multifunción

Revisión 8

P-TAD S01 BASIC – USB DAQ Multifunción, 10 bits, 25kS/s, 8 Entradas análogas.

Revisión 8 (Rev8) – USB DAQ Multifunción, 10bits, 25kS/s, 8 analog inputs. Review 8 (Rev8)

- 8 entradas análogas de 10 bits hasta 25kS/s
- 2 salidas análogas
- 15 líneas digitales TTL (8 entradas, 7 salidas)
- USB 2.0 Full speed - Serial CDC



Sistemas operativos compatibles

- Windows 7/Vista (32- y 64-bit)/XP/2000
- MAC OS X
- Linux

Soporte para software

- Labview 7.1 - 2009
- MATLAB & Simulink R2007a- R2009b

DESCRIPCIÓN

La tarjeta P-TAD-S01 Basic es un sistema USB de adquisición de datos y control para PC orientado hacia la robótica y el control de procesos, el cual permite digitalizar señales en un rango de 0 a 5 voltios. También cuenta con canales digitales de entrada y salida TTL, que le permite controlar eventos externos como por ejemplo actuadores, control de relés y otros sistemas digitales. El sistema P-TAD-S01 Basic integrado un procesador propio que administra todas sus funciones en forma independiente al PC, ventaja que permite realizar adquisiciones con el sistema sin cargar al equipo de cómputo. Su fácil funcionamiento y sus librerías para su puesta en operación en LABVIEW®, MATLAB® y Simulink® le convierten en una poderosa herramienta para la fines didáctico e investigativo.

1 - Especificaciones Básicas - Basic specifications

Especificaciones - Specifications	
Rango de voltaje de operación - Operating Voltage Range (V)	9 - 12
Corriente de alimentación Min - Min Operating Current Range (mA)	200
Voltaje de salida (E/S) - Output Voltage Range I/O (V)	0 - 5
Corriente de salida (E/S) - Output Current Range I/O (mA)	25 mA
USB (Velocidad, Cumplimiento, CDC) - (speed, compliance, CDC)	Full Speed 12Mbps, USB 2.0, Serial
Temperatura de operación - Temperature Range (C)	-40 to 85
Rendimiento del CPU - CPU Core Performance	48 MHz (12 MIPS)
Canales análogos de entrada - Analog inputs channels	8 (AI0-AI7)
Canales análogos de salida - Analog outputs channels	2 (AO0, AO1)
Canales digitales de entrada - Digital inputs channels	8 (DI0-DI7)
Canales digitales de salida - Digital outputs channels	7 (DO0-DO6)
Resolución de entrada - Input Resolution (bits)	10
Máxima velocidad de muestreo - Max Sampling Rate (kS/s)	25
Tipo de medida	Voltaje (V)
Software objetivo (Windows)	LabVIEW®, MATLAB® & Simulink®
Sistema operativo compatible - Compatible operative system	Windows, Linux, MAC

1.2 - Accesorios Suministrados - Given accessories

USB Cable (→ USB-B Hembra - receptacle)

Adaptador de Voltaje - Voltage adaptor 9v 200mA



2 - Especificaciones Adicionales - Additional specifications

2.1 - CANALES ANALÓGICOS DE ENTRADA – ANALOG INPUT CHANNELS

Característica - Characteristic	Valor - Value	Unidades - Units
Resolución - Resolution	10	Bit
Error de Linealidad Integral - Integral Linearity Error	± 1	LSB
Error de Linealidad Diferencial - Differential Linearity Error	± 1	LSB
Offset Error	± 2	LSB
Error de Ganancia - Gain Error	± 1	LSB
Entrada Analógica Voltaje - Analog Input Voltage	0 - 5v	V
Impedancia recomendada de fuente de voltaje analógico - Recommended impedance of analog voltage source	2.5	K Ω

2.2 - CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS – ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Posiciones Absolutas Máximas – Absolute maximum ratings	Valor - Value
Temperatura ambiente bajo tensión - Ambient temperature under bias	-40°C to +85°C
Temperatura de almacenaje	-65°C to +150°C
Voltaje en cualquier canal con respecto a tierra - Voltage on any channel with respect to ground	0.3V to (5.3V)
Dissipación total de potencia - Total power dissipation	300mA
Corriente de salida máxima hundida por cualquier canal de entrada - salida - Maximum output current sunk by any I/O channel	25mA
Máxima corriente de salida entregada por cualquier canal de E/S - Maximum output current sourced by any I/O channel	25mA
Máxima corriente hundida por todos los canales - Maximum current sunk by all channels	200mA
Máxima corriente suministrada por todos los canales - Maximum current sourced by all channels	200mA

2.3 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS – PHYSICAL CHARACTERISTICS

DAQ Revisión 8 – (Rev 8) para revisiones anteriores ver apéndice 2). DAQ Review 8, for previous reviews, see appendix 2

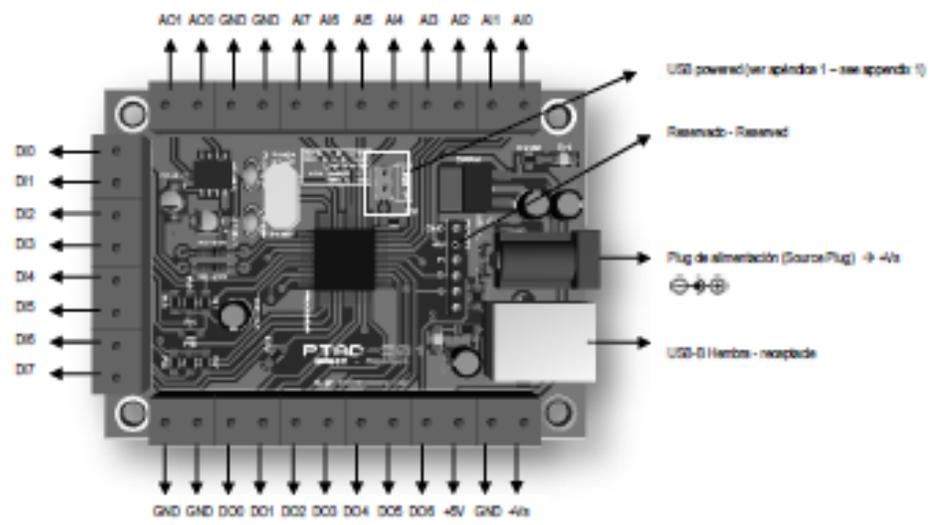
Característica - Characteristic	Valor
Peso - Weight	56g (2.1 oz)
Dimensiones - Dimensions	78.74mm x 57.15mm
Alambrado terminal de tornillo - Screw-terminal wiring	22 - 14 AWG
Torque en la terminal de tornillo - Screw-terminal torque	0.22 to 0.25 N·m (2.0 to 2.2 lbr.in.)
Conectores de E/S - I/O connectors	USB series B receptacle 16 x2 terminales de tornillo - 16 x2 position (screw-terminal) 1 plug de alimentación-1 plug header

Para dimensiones adicionales remitase a 3.1 - Dimensiones Mecánicas.

3 – Información del dispositivo – Device information

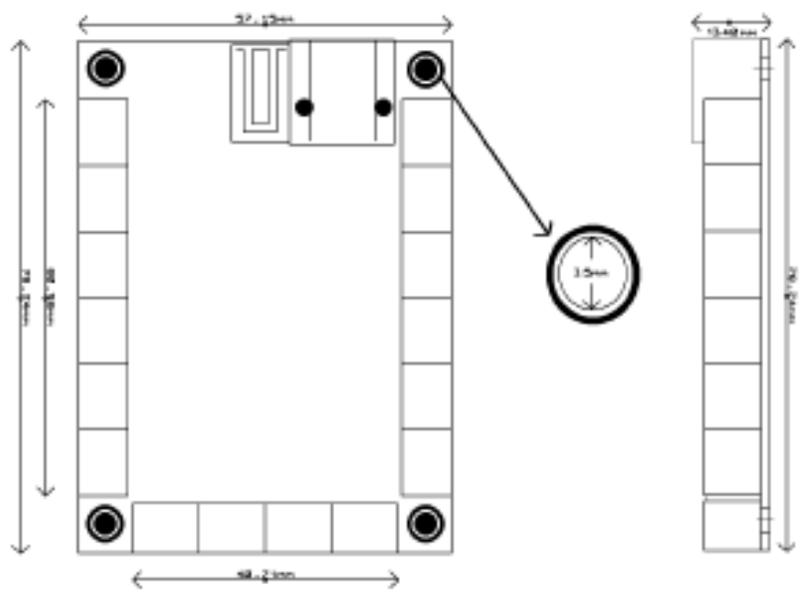
3.1 - Distribución de las líneas E/S – I/O lines Distribution

(DAQ Revisión 8 – (Rev 8) para revisiones anteriores ver apéndice 2). DAQ Review 8, for previous reviews, see appendix 2.



3.2 - Dimensiones mecánicas – Mechanical dimensions

Dimensiones en milímetros – dimensions in millimeters.
 (DAQ Revisión 8 – (Rev 8) para revisiones anteriores ver apéndice 2). DAQ Review 8, for previous reviews, see appendix 2.



DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL ADAPTATIVO TIPO SERVO-INTEGRADOR PARA REGULAR LA POSICIÓN ANGULAR DE UNA COMPUERTA ACCIONADA POR UNA CORRIENTE DE AIRE.

Jorge Ivan Arango Osorio¹, Omar Jimenez Guarin²

¹Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid jorge_arango91072@elpoli.edu.co

²Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid omar_jimenez04103@elpoli.edu.co

RESUMEN

El trabajo consta de la identificación y control para una planta en la cual se interviene la posición angular de una compuerta accionada por aire generado por ventiladores de corriente axial, para medir la posición se tiene una cámara web como método no invasivo de monitoreo. Para la solución del control tipo servo con integrador se toman el vector de parámetros arrojado por el estimador en línea el cual tiene una inicialización obtenida por métodos experimentales como la curva de reacción, con este vector se origina una ley de control en términos de a y b para generar una señal de salida. Los algoritmos de control serán comparados por medio de la integral del error (IAE) y el tiempo de establecimiento. Los algoritmos de control fueron programados en plataforma Labview®

Palabras clave: Cámara web, Compuerta, control adaptativo, desempeño, error.

ABSTRACT

The job is about the identification and control for a plant. In this plant the angular position of a gate is driven by axial flow fans, to measure and control the position it has a web camera as a non-invasive method of monitoring intervene. For Solution of the control servo integrator type it takes vector parameters that is thrown by the estimator Online which is has Initialization obtained by experimental methods As the reaction curve , with this vector makes the control law it using a and b terms to generate an output signal . The control algorithms will be compared by the integral of the error (IAE) and settling time . The control algorithms were programmed in Lab VIEW® platform.

Key words: webcam, Gate, adaptive control, performance, error.

1. INTRODUCCIÓN

La posición, es una variable que debe controlarse en muchos procesos: motores, tornos, fresadoras,

robots y procesos de manufactura entre otros y el control eficaz y exacto de esta variable permite obtener productos de alta calidad y que cumplen con los estándares de producción.

Para realizar el control de posición existen múltiples elementos que permiten la medición adecuada de dicha variable. Dependiendo de la aplicación, se necesita la medida de la posición a partir de un ángulo o de la distancia con respecto a un sistema de referencia para este fin, se utilizan diferentes elementos como potenciómetros, sensores ópticos, sensores infrarrojos o la visión artificial como método de medición no invasivo.

El propósito de este trabajo de grado es implementar un control adaptativo tipo Servo-Integrador para el control de la posición angular de una compuerta afectada por una corriente de aire generada por un ventilador axial, dicha posición será medida mediante un mecanismo de visión artificial utilizando una cámara web.

El control de la posición angular por medio de visión artificial se puede catalogar como un método de control no invasivo, ya que al no tener un contacto físico o directo con la compuerta no está influenciado por los factores del ambiente en el cual se desarrolla la medición.

La ejecución del proyecto de grado se realiza en cuatro fases: la primera se basa en la descripción de la planta, sus características y componentes. La segunda fase se refiere a la modelación matemática de la planta utilizando el método fenomenológico y el método de los mínimos cuadrados recursivos para obtener la dinámica del sistema utilizando la respuesta de la planta ante perturbaciones en forma de escalón.

La tercera fase se basa en el desarrollo del control adaptativo tipo Servo-Integrador para el control de la posición angular de la compuerta teniendo en cuenta los resultados que se obtienen en la fase de identificación por los diferentes métodos y finalmente, en la cuarta fase, se realiza la comparación del desempeño del controlador tipo servo con integrador con el de un control

convencional tipo PI utilizando métricas de la integral del error.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo de grado, tiene como propósito la elaboración de controles adaptativos (Tipo servo con integrador y PI convencional) para controlar la posición angular de una compuerta accionada por dos ventiladores de corriente axial cuya posición es obtenida a través de visión artificial, en donde los parámetros del sistema cambian constantemente de acuerdo a las condiciones del mismo, para esto se usará un estimador de mínimos cuadrados adaptativo con factor de olvido que permita obtener los parámetros del sistema en cualquier instante de tiempo para la sincronización del controlador.

Se establecen cuatro objetivos específicos:

- Describir la planta y los elementos utilizados para su implementación y control.
- Obtener la dinámica de la planta mediante una identificación paramétrica utilizando mínimos cuadrados recursivos.
- Elaborar un algoritmo de control adaptativo tipo servo-integrador
- Analizar el comportamiento del control adaptativo tipo servo-integrador y comparar su desempeño con un control convencional PI utilizando métricas de la integral del error y su respuesta temporal.

2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA Y ELEMENTOS UTILIZADOS PARA SU IMPLEMENTACIÓN Y CONTROL.

El sistema encuentra compuesto básicamente por 3 partes principales a saber: la primera que corresponde al sistema de adquisición de datos que en este caso es una cámara web manejada

mediante el software de LABVIEW®. La segunda parte es la etapa de potencia que genera el voltaje para regular, mediante un PWM, la velocidad del ventilador axial. La tercera parte consiste en la compuerta de acrílico que será posicionada por el flujo de aire proveniente del ventilador.

En la Figura 1 se muestra el diagrama de instrumentación de la planta con cada uno de sus componentes.

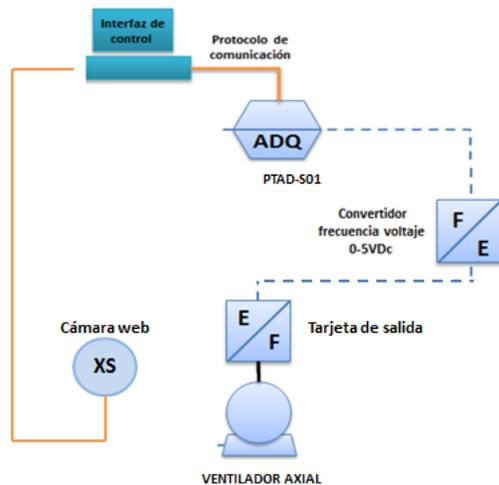


Figura 1. Diagrama de instrumentación del sistema.

2.1 Tarjeta de salida o de potencia:

Se encarga de recibir el voltaje 0 a 5 Vdc para ejecutar la acción de control sobre el motor de los ventiladores amplificándola entre 0 a 12 Vdc.

2.2 Tarjeta de adquisición de datos “P-TAD SO1”.

Es la interface de salida como para generar el PWM, con el fin de controlar el voltaje de entrada al ventilador axial y así controlar la posición angular de la compuerta afectada por la corriente de aire. La tarjeta es programada en la plataforma LABVIEW®.

2.3 Ventilador axial.

El ventilador axial, es un componente utilizado en la mayoría de veces como enfriador de partes

electrónicas, este ventilador recibe un voltaje máximo de 15 VDC con un amperaje de 0.5 A. Por medio de este ventilador se genera el flujo de aire que modifica la posición de la compuerta.

2.4 Cámara web.

En el presente trabajo se realiza la medición de la variable a controlar la cual es la posición angular de la compuerta afectada por la corriente generada por ventiladores axial, la cámara web es una cámara nada especial la cual se puede conseguir en cualquier lugar es una cámara HD de 720p que para el caso en particular cumple con las necesidades.

2.5 Fuente de voltaje:

Se utiliza una fuente de voltaje fija la cual recibe desde 90 hasta 132 VAC y lo convierte y regula a dos salidas de 5 VDC y 15 VDC, estos voltajes de salida se usan para la alimentación de la tarjeta de potencia o de salida. La figura 2.6 muestra la fuente de voltaje.

3. OBTENCIÓN DE LA DINÁMICA DE LA PLANTA MEDIANTE IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA.

Para la identificación de la planta se utilizaron métodos fenomenológicos y métodos experimentales.

3.1 Ecuaciones para obtener el modelo fenomenológico

Para determinar el modelo fenomenológico de la planta se recurre al diagrama de cuerpo libre (Pineda y vivas 2008), tal como se muestra en la figura 2.

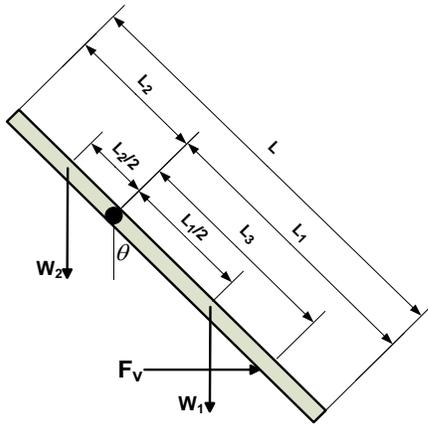


Figura 2. Diagrama de cuerpo libre de la compuerta

Dónde:

L = longitud de la compuerta.

L1=distancia del eje de rotación al extremo inferior.

L2= distancia del eje de rotación al extremo superior.

L3 = distancia del eje de rotación a la fuerza F_v

θ = ángulo de inclinación de la compuerta

F_v = Fuerza producida por el flujo de aire del ventilador

W_1 = Peso de la parte inferior de la compuerta (borde inferior al eje de rotación)

W_2 = Peso de la parte superior de la compuerta (borde superior al eje de rotación)

Después de analizar todas las leyes físicas de fuerza y torque que interactúan con el modelo se llega a la siguiente ecuación.

$$\frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = \frac{K_L}{J} * \text{sen}\theta + \frac{f(V_i)}{J} \quad (1)$$

La ecuación (1) representa un sistema no lineal, en el cual la entrada es el voltaje de alimentación V_i aplicado al ventilador y la salida es el ángulo θ de inclinación de la compuerta.

Luego se procede a linealizar el modelo con los datos obtenidos experimentalmente.

Tabla 1. Relación entre el voltaje, el ángulo y el torque producido por el ventilador

VARIABLES	DATOS OBTENIDOS										
V_i (Volt)	0	1.35	2.63	3.90	5.23	6.56	7.84	9.13	10.46	11.79	13.07
θ (Deg)	0	10.0	13.1	16.3	20.9	25.6	30.0	34.0	37.0	41.5	46.0
T_{Pv} (Kg*m) 10^{-4}	0	7.53	9.83	12.18	15.48	18.75	21.70	24.26	26.11	28.75	31.22

La función de transferencia del sistema linealizado es:

$$G_P(S) = \frac{\theta(S)}{V_i(S)} = \frac{0.0913}{S^2 + 1.539} \quad (2)$$

3.2 Identificación por curva de reacción.

Para la Identificación del proceso utilizando el método de curva de reacción es necesario obtener una base de datos conformada por la respuesta de la planta y la señal de entrada que la produce. Para este caso en particular, corresponde a la posición de la compuerta y el voltaje aplicado a los ventiladores axiales para aumentar o disminuir la corriente de aire.

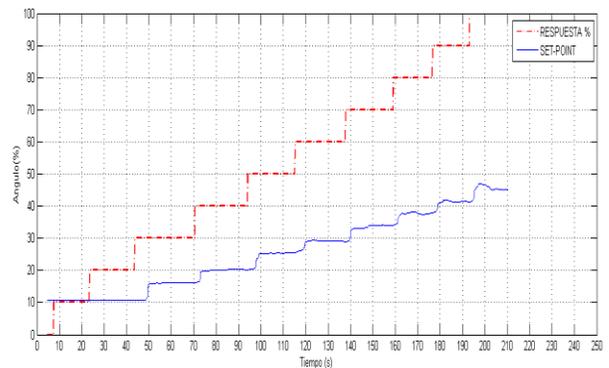


Figura 3. Respuesta de la planta ante estímulos tipo escalón.

Se selecciona de toda la base de datos un escalón cuya respuesta sea representativa del comportamiento de la planta prototipo en el caso que se está desarrollando se seleccionó el escalón del 25% al 35%, después de esto es necesario

recortar y trasladar los datos para que los datos inicien en el origen como se ve en la figura 4.

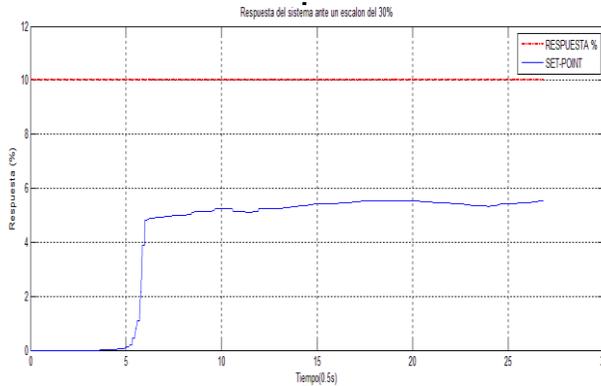


Figura 4. Respuesta de la planta ante estímulos tipo escalón.

Obtenida la curva de reacción, se aproxima el modelo a un sistema de primer orden con retardo (POR), para ello se toman 2 puntos sobre la curva correspondientes al 28.3% y el 63.2% del valor final de la respuesta y se estiman los tiempos t_1 y t_2 .

Para un sistema de primer orden con retardo, la función de transferencia está dada por:

$$G(S) = \frac{Y(S)}{U(S)} = \frac{K e^{-\theta' s}}{\tau S + 1} \quad (3)$$

En donde:

- K= Ganancia del proceso
- τ = Constante de tiempo
- θ' = Tiempo muerto o retardo del proceso

Los parámetros del proceso se estiman a partir de las ecuaciones:

$$K = \frac{\text{Cambio en la salida}}{\text{Cambio en la entrada}} = \frac{\Delta Y}{\Delta U} \quad (4)$$

$$\theta' + \tau/3 = t_1 \quad (5)$$

$$\theta' + \tau = t_2 \quad (6)$$

En la tabla 1 se muestran los parámetros obtenidos en la identificación

Tabla 1. Parámetros obtenidos en la identificación

ESCALÓN (%)	TAO	K	THETA
30	0,15	0,551814	5,75
40	0,15	0,392484	2,3
50	0,45	0,534252	3,6
60	1,65	0,338084	2,55
70	0,3	0,516798	2
80	0,525	0,379615	1,825
90	0,525	0,339068	1,675
100	0,15	0,377346	2,05
PROMEDIO	0,4875	0,4286826	2,71875

De la tabla 1 se obtiene el siguiente modelo POR del proceso identificado

$$G(s) = \frac{0.42868}{0.4875s + 1} * e^{-2.71s} \quad (7)$$

3.3 Identificación por mínimos cuadrados recursivos.

Se procede a realizar una identificación en línea utilizando el método de “mínimos cuadrados recursivos”, mediante el cual se obtiene un modelo de la forma:

$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}} \quad (8)$$

Para la identificación en línea se utilizó la plataforma Labview® y una librería con el estimador RLS, la cual es la encargada de hacer el desarrollo computacional para dar una estimación de los vectores correspondientes a la identificación del modelo (ver figura 6)

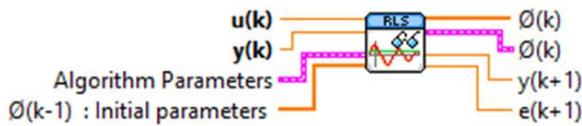


Figura 5. Estimador RLS

3.3.1 Adaptabilidad del control a los cambios del sistema:

La adaptación se hace por medio del estimador RLS el cual, al ingresarle los parámetros iniciales (theta inicial, matriz de covarianza, factor de olvido) estima en línea el modelo en tiempo discreto calculando los coeficientes del numerador y del denominador llamados: a1, a2, y b1, b2....

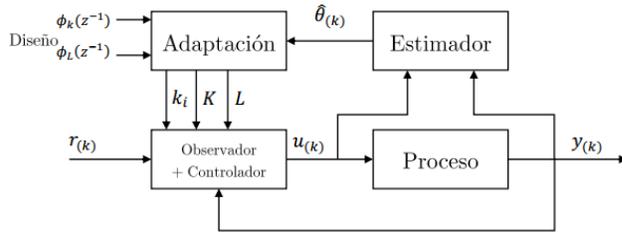


Figura 6. Servo integrador adaptativo
Fuente: García (2010)

Para los métodos de control adaptables el identificador de mínimos cuadrados recursivo (RLS) es un estimador on line (Figura 6), que permite una aproximación a un modelo tipo ARX de un sistema. El cual debe ser un proceso estable, linealizable y que se pueda representar con una sola entrada y una sola salida.

El vector de parámetros es entregado por el RLS *on-line* al algoritmo de control (Figura 7), es decir si los coeficientes cambian el controlador cambia es decir, se adapta para generar la respuesta deseada.

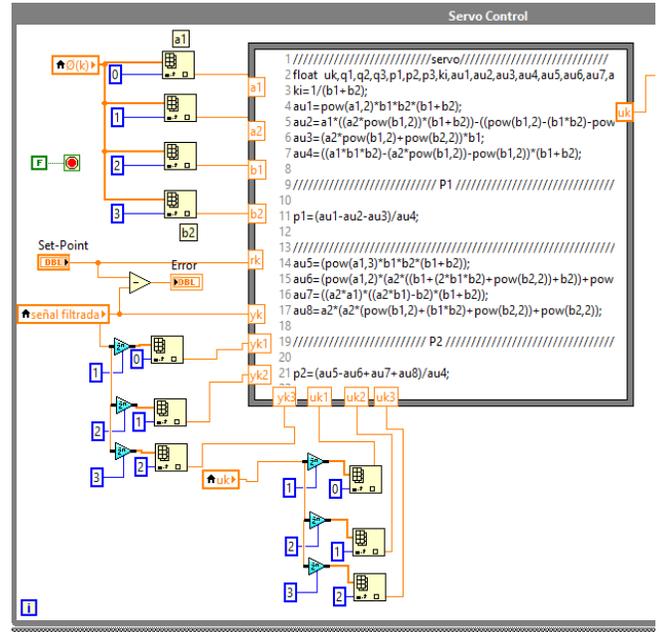


Figura 7. Implementación de control tipo Servo

4 ALGORITMO DE CONTROL ADAPTATIVO TIPO SERVO-INTEGRADOR PARA CONTROLAR LA POSICIÓN ANGULAR DE LA COMPUERTA AFECTADA POR UNA CORRIENTE DE AIRE GENERADA POR EL VENTILADOR AXIAL

4.1 CONTROLADOR TIPO SERVO CON INTEGRADOR

Sea el sistema discreto definido mediante la ecuación de estado

$$x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (9)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (10)$$

La figura 8 muestra el sistema de control por realimentación del estado observado incluyendo un integrador en la trayectoria directa para estabilizar adecuadamente el sistema y mejorar su exactitud.

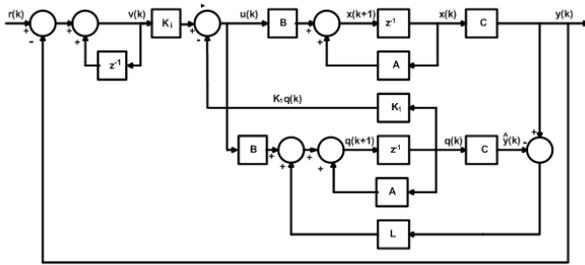


Figura 8 Sistema tipo Servo con realimentación del estado observado
Fuente: García (2012)

Las matrices para el cálculo de la ley de control son:

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Para obtener las matrices K1 y Ki se asignan todos los polos de lazo cerrado en el origen, así la ecuación característica es:

$$z^3 = 0 \quad (13)$$

Entonces las matrices de realimentación en términos de a y b resultan:

$$K_1 = \begin{bmatrix} -\frac{a_1(b_1 + b_2) - b_2}{b_1 + b_2} & -a_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$K_i = \begin{bmatrix} 1 \\ b_1 + b_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Para calcular la matriz L del observador, se asignan los polos en el origen, así la ecuación característica del observador es:

$$z^2 = 0 \quad (16)$$

Entonces la matriz del observador en términos de a y b resulta:

$$L = \begin{bmatrix} \frac{a_1^2 \cdot b_2 - a_1 \cdot a_2 \cdot b_1 - a_2 \cdot b_2}{a_1 \cdot b_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1^2 - b_2^2} \\ \frac{a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1}{a_1 \cdot b_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1^2 - b_2^2} \end{bmatrix} \quad (17)$$

La ley de control toma la forma:

$$U(z) = \frac{K_i z^3 R(z) - K_i z^3 Y(z) + q_1 z^2 Y(z) + q_2 z Y(z) + q_3 Y(z)}{z^3 + p_1 z^2 + p_2 z + p_3} \quad (18)$$

4.2 CONTROLADOR PID POR CANCELACIÓN DE CEROS Y POLOS

Este método consiste en obtener los parámetros del controlador cancelando ceros del controlador con polos de la planta. Para llevar a cabo el diseño, se asume que las funciones de transferencia de los controladores son:

$$D(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q_0 [z + K]}{z - 1} \quad (19)$$

Para el controlador PI, y:

$$D(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q_0 [z^2 + K_1 z + K_2]}{z(z - 1)} \quad (20)$$

Para el controlador PID.

La ley de control es, entonces:

$$u(k) = q_0 * e(k) + q_1 * e(k - 1) + q_2 * e(k - 2) + u(k - 1) \quad (21)$$

En donde:

$$q_0 = \frac{0.5 * T}{e_{SS}(b_1 + b_2)} \quad (22)$$

$$q_1 = \frac{0.5 * T * a_1}{e_{SS}(b_1 + b_2)} \quad (23)$$

$$q_2 = \frac{0.5 * T * a_2}{e_{SS}(b_1 + b_2)} \quad (24)$$

5. COMPARACION POR MEDIO DE LAS METRICAS DEL ERROR ENTRE LOS CONTROLADORES DISEÑADOS.

Tomando como referencia un punto de estabilidad se le estimula a la planta con un escalón del 10% representado en el cambio de *set-point* del 25 al 35 % durante un periodo de tiempo de 60 segundos. El índice de desempeño del controlador se determina aplicando 2 de los criterios de error existentes. En este caso son: el IAE y el ICE respectivamente, los cuales se refieren en su orden a la integral del valor absoluto del error (25) y a la integral del error al cuadrado (26)

$$\int_{t_1}^{t_2} |e(t)| dt \quad (25)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} e^2 dt \quad (26)$$

A continuación se observará la gráfica de la respuesta de la planta con el controlador PID diseñado (Figura 9) en esta gráfica se observa como es la respuesta y su estabilidad.

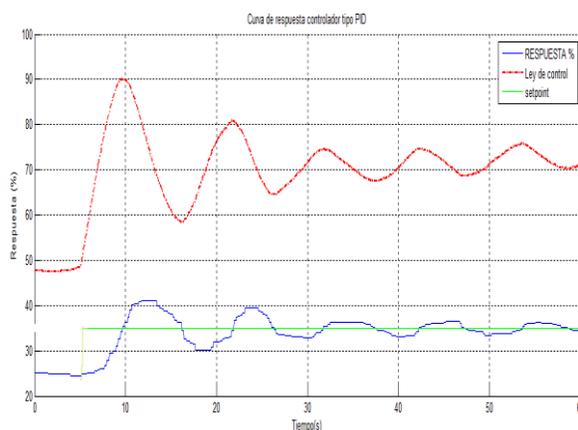


Figura 8. Respuesta con controlador PID

Luego de estimular a la planta con una perturbación tipo escalón del 10% representado en el cambio de *set-point* del 25 al 35 %, en este caso se hace con el controlador tipo servo-integrador. Se puede observar en la Figura 10 como es la respuesta del controlador tipo servo. En esta respuesta se evidencia que es un poco más rápida y tiene un tiempo de establecimiento más corto en comparación con el PID (Figura 10) además de un error en estado estable cercano al cero lo cual hace que la planta en desarrollo tenga una respuesta más suave ante el estímulo.

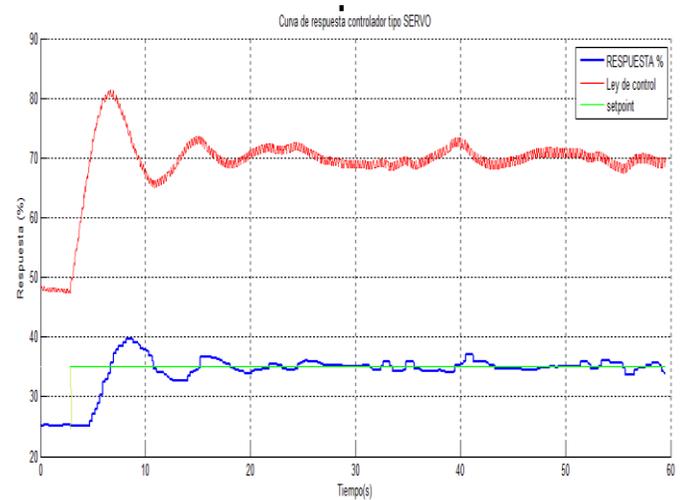


Figura 10. Respuesta del controlador tipo SERVO.

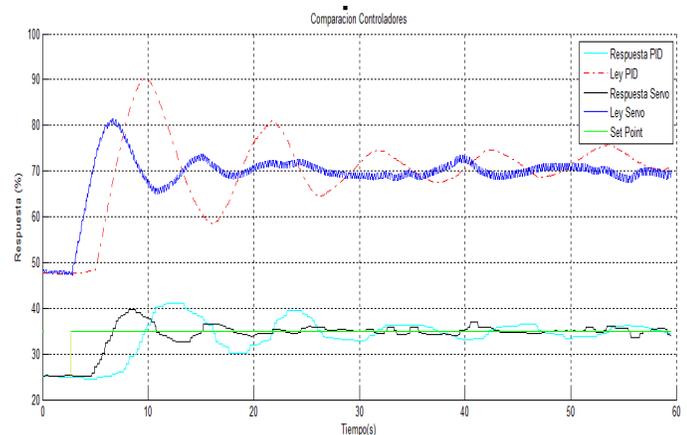


Figura 10. Comparación controladores.

Basándose en la definición matemática de la integral la cual es el área comprendida bajo una curva se halla el resultado de las dos integrales de los dos criterios de error, en un tiempo de toma de datos de 60 s, la cual arroja una cantidad de datos de 1191 datos teniendo esto en cuenta se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 2 Criterios de error

	SERVO	PID
IAE	1472.4	2633.3
ICE	5639	12016

Fuente: Tomada por los autores

En la tabla anterior se puede evidenciar como por los criterios del error se puede concluir que el controlador tipo servo-integrador tiene un mejor desempeño que el controlador PID, ya que posee unos índices de error menores es decir, que es más exacto, con error en estado estable cercano a cero y una estabilidad mucho mejor además de un tiempo de respuesta menor comparado con el PID.

5 CONCLUSIONES

- El controlador tipo servo con integrador adaptativo integrado con el estimador de mínimos cuadrados (RLS) en una planta de respuesta rápida, como la presentada en este trabajo, presenta un mejor desempeño que el controlador PID a la luz de las métricas de respuesta temporal y de las de la integral del error a pesar de que éste controlador tiene un costo computacional más alto que el del controlador PID.
- En el trabajo desarrollado se experimentó con el uso de un método no invasivo para la medición de una variable que en el caso concreto fue la

posición angular, este método resultó ser eficiente y confiable ya que se puede tener un elemento de medición aislado de los ambientes de trabajo adversos que puede tener el proceso.

- Se evidencio que la variable a medir, el ángulo de inclinación de la compuerta, es muy sensible a perturbaciones externas como corrientes de aire, debido a las características físicas de la compuerta, como su peso muy bajo y el sistema de suspensión de la misma, esto se minimizó con un filtro implementado por software (filtro de medias), el cual tenía limitantes ya que al aumentar el número de muestras para el promedio ingresaba un retardo considerable al lazo de control.
- Al utilizar aplicaciones de visión artificial en un proceso como en este caso que se usó como elemento de medición, se debe tener en cuenta diferentes factores ya que la obtención y el procesamiento de la imagen es muy sensible y se ve afectada por condiciones de medio ambiente como son: la iluminación, el fondo y la polución. Pero, gracias al alto contraste que tenía la sección transversal de la compuerta con el fondo estos factores de redujeron considerablemente obteniendo resultados homogéneos en diferentes ambientes de medición.
- La planta prototipo desarrollada permite tener un proceso a pequeña escala con comportamiento no lineal, que representa un proceso poco común pero que se puede trabajar como cualquier otro proceso, lo que permite a los estudiantes un acercamiento a variables diferentes a las más comunes como son nivel, presión, flujo etc.
 - Se logra la identificación de la planta por tres métodos diferentes, dos de los cuales son de mayor uso por parte de la teoría del control y uno que es exclusivo de la plataforma

Matlab®, esto permitió tener una función de transferencia lo más cercana posible al comportamiento real de la planta prototipo. Además de esto se implementa un identificador en línea RLS el cual obtiene una función de transferencia en línea con el proceso por lo cual hace parte del diseño adaptativo del controlador.

- Con el modelo matemático de la planta se diseñaron los algoritmos de control, en primera instancia se experimentó con un controlador tipo servo con integrador obteniendo la ubicación de los polos deseados basados en características de respuesta temporal, esto presento algunos problemas ya que a la hora de puesta en línea con la planta real no se tenían los resultados esperado. Este problema se solucionó ubicando los polos en el origen con lo cual se obtiene una ley de control mas sencilla y de menor costo computacional.
- Tomando como base las métricas de la integral del error, se puede concluir que el desempeño del control tipo servo con integrador es mejor en comparación con el del controlador PID, además si se tiene en cuenta la respuesta temporal de los dos controladores, se observa que es más estable y rápido el tipo servo con integrador.
- Los resultados obtenidos llevan a la conclusión de que el uso de los controladores avanzados constituye una buena opción para controlar procesos a nivel industrial.

REFERENCIAS

García, L y Arroyave, M. (2010). Controlador tipo servo con observador de orden completo y controlador según Ciancone Marlín para un

sistema de flujo. Revista Politécnica ISSN 1900-2351, Año 6, Número 10, 2010. Politécnico Colombiano J.I.C. Medellín.

Gordillo, E y Yanes, J. (2009). Aplicación de visión con LabVIEW para la detección de frascos con turbiedades. Tesis de grado. Escuela politécnica del litoral. Facultad de Ingeniería en electricidad y computación. Guayaquil. Recuperado el 18 de abril de 2016 de: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/16157>

Vargas (2010) Sistema de visión artificial para el control de calidad en piezas cromadas. Tesis de grado. Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica unidad Azcapotzalco. Recuperado el 15 de mayo de 2016 de: <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/7250/68.pdf?sequence=1>

Mosquera, V. Bacca, G. Quiñones, O. Díaz; A. (2012). Control de posición de un sistema de levitación neumático. Revista Universitaria en Telecomunicaciones Informática y Control. Volumen 1. N° 2. Noviembre 2012. ISSN 2227 – 3735. Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca Popayán, Colombia. Recuperado el 18 de abril de 2016 de:

ciclope.unicauca.edu.co/rutic/index.php/rutic/article/download/163/49

Pineda, M y Vivas, A. (2008). Control de un modelo aerodinámico aplicando sistemas difusos. Tesis de grado. Escuela Politécnica Nacional Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Quito. Recuperado el 10 de abril de 2016 de:

<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1082/1/CD-1920.pdf>

Tamayo, S (2014). Construcción y control por variables de estado de una plataforma didáctica de levitación magnética. Tesis de grado.

García, L (2012). Control digital. Teoría y práctica. Politécnico Colombiano JIC. Tercera Edición. ISBN 978-958-9090-25

