



## ESTUDIO Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TENSIÓN PARA EL SECTOR TEXTIL

(Study and design of a strain control system for the textile sector)

Recibido: 05/02/2013 Aceptado: 11/12/2013

**Berrío, Luis Humberto**

Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia.

[berrio77@yahoo.com](mailto:berrio77@yahoo.com)

### RESUMEN

Este artículo realiza un análisis de un sistema de tensión para un proceso textil, con el fin de diseñar controladores PID, control prealimentado, control con anti-windup y las combinaciones entre éstos. Además, se comparan los resultados obtenidos de manera teórica y simulada respecto a los resultados obtenidos experimentalmente y luego se procede a mostrar el resultado de la sintonía manual del sistema real en su conjunto. Cada uno de los experimentos realizados sobre el sistema de tensión para el proceso textil, se realizaron con base en simulaciones previas con parámetros calculados teóricamente por medio de diferentes métodos, tales como el método del lugar de las raíces y de Ziegler-Nichols. En cada uno de los métodos empleados se obtuvieron las gráficas de la señal de salida o controlada, luego de aplicar las acciones adecuadas de control, que además permiten generar las conclusiones respectivas del proceso y de los controladores.

**Palabras clave:** Anti-windup, controlador, lugar de las raíces, Método de Ziegler-Nichols, metroalimentación.

### ABSTRACT

This paper analyzes a strain system for a textile process, in order to design PID controllers, feedforward control, control with anti-windup and combinations between them. Furthermore, it compares the results obtained theoretically and simulated respect to the experimental results, and then it shows the results of the manual tuning of the real system as a whole. Each experiment done on the strain system for the textile process is performed based on previous simulations with data and parameters calculated theoretically with different methods such as the method of root locus and Ziegler-Nichols. In each one of the methods employed were obtained graphics of the output and controlled signal after applying the appropriate control actions, and it allows generating the respective conclusions about the process and the controllers.

**Keywords:** Anti-windup, Controller, Root locus, Ziegler-Nichols Method, Feedforward.

### INTRODUCCIÓN

Hoy en día, a pesar de la abundancia de sofisticadas herramientas y métodos avanzados de control, el controlador PID es aún el más ampliamente utilizado en la

industria moderna, regulando más del 95% de los procesos industriales en lazo cerrado. Históricamente, ya las primeras estructuras de control usaban las ideas del control PID. Sin embargo, no fue hasta el trabajo de Minorsky, en 1922, sobre conducción de barcos, que el control PID tomó gran importancia teórica (Pinto, 2006).

Los controladores automáticos comparan el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia o el valor deseado, además de determinar la desviación y producir una señal de control que reducirá el error a cero o a un valor pequeño. La manera en la cual el controlador produce una señal de control se denomina acción de control.

Por otra parte, explica Rivero (2011) que la “identificación de un sistema consiste en la determinación de la función de transferencia de la misma o de sus parámetros fundamentales, a partir de mediciones experimentales”.

Existe en la actualidad una gran cantidad de métodos de diseño de distinto origen, que permiten desarrollar sistemas de control dentro de una amplia gama de características y posibilidades (Kim et al., 1994).

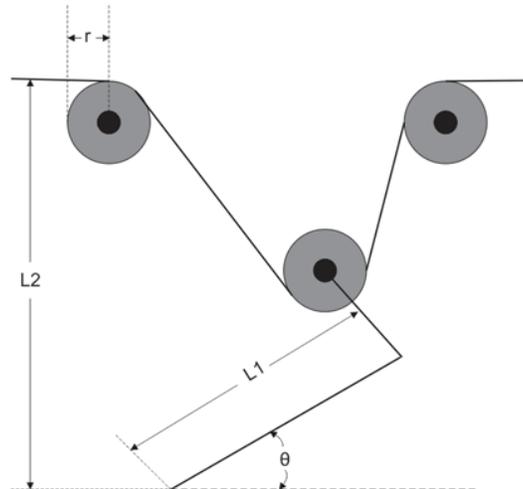
Colombia, tradicionalmente ha sido un país que presenta grandes fortalezas en el negocio de los textiles y las confecciones. “En 2011, la producción del sector textil en Colombia representó el 2,5% del PIB manufacturero y el 0,3% del PIB nacional” (PROEXPORT, 2012). Además, “la industria textil ha construido una compleja y diversificada cadena productiva, que ha generado una importante contribución al crecimiento económico, a las exportaciones y al empleo del país durante más de 80 años” (UPME, 2002), esto exige un creciente uso de tecnologías blandas y duras que faciliten el mejoramiento de los estándares de calidad en el sector, incrementando los niveles de productividad y competitividad.

En las secciones siguientes se muestran los resultados obtenidos experimental y teóricamente con los modelos de control encontrados, de acuerdo a los métodos de Ziegler-Nichols y del lugar de las raíces. Además, se muestran los resultados de emplear un control con retroalimentación y los conseguidos con una sintonía manual, el efecto de usar anti-windup en el control, la respuesta del sistema al utilizar un controlador PID con pre-alimentación y, finalmente, se presentan las conclusiones.

## RESULTADOS EN SIMULACIÓN Y EXPERIMENTALES CON ZIEGLER Y NICHOLS

El sistema de control completo está conformado por un PLC Unitronics (Vision 280), además de un computador con software de control implementado en Labview y con comunicación Modbus al PLC (UNITRONICS, 2004). El sistema cuenta con dos interfaces para el monitoreo y control del sistema: interfaz por computador o interfaz en el tablero de control. En la Figura 1 se muestra el diagrama que representa la geometría del acumulador. Cuando el ángulo  $\theta$  de la Figura 1 aumenta, es decir que se mueve en sentido anti-horario, la tela acumulada se hace menor. Por su parte, si el ángulo  $\theta$  disminuye, es decir, la polea móvil se desplaza hacia abajo o  $\theta$  varía en sentido horario, entonces la tela acumulada aumenta, por lo que hay una relación inversa entre el ángulo del brazo pivotado y la cantidad de tela acumulada.

**Figura 1. Geometría del cabezote textil**



**Fuente:** elaboración propia.

Ziegler y Nichols propusieron unas reglas para determinar los valores de la ganancia proporcional ( $K_p$ ), del tiempo integral ( $T_i$ ) y del tiempo derivativo ( $T_d$ ), con base en las características de respuesta transitoria de una planta específica. La determinación de los parámetros de los controladores PID o de la sintonización de los mismos se realiza por medio de experimentación directa con la planta.

Existen dos métodos denominados reglas de sintonización de Ziegler-Nichols, en los cuáles se pretende obtener un 25% de sobrepaso máximo en la respuesta de la planta frente a una señal escalón. El primer método se aplica cuando dicha respuesta no presenta oscilaciones, porque de lo contrario se utiliza el segundo método (Ogata, 2003). La Tabla 1 muestra la respuesta del método de sintonía de los parámetros del controlador para respuesta oscilatoria ante una señal tipo escalón.  $K_{CR}$  es la ganancia que produce la oscilación y  $T_{CR}$  es el período de la oscilación.

**Tabla1. Método de sintonía de los parámetros del controlador con el método de Ziegler-Nichols para respuesta oscilatoria**

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_{CR}$	$\infty$	0
PI	$0.45K_{CR}$	$0.5T_{CR}$	
PID	$0.6K_{CR}$	$0.5T_{CR}$	$0.125T_{CR}$

**Fuente:** elaboración propia.

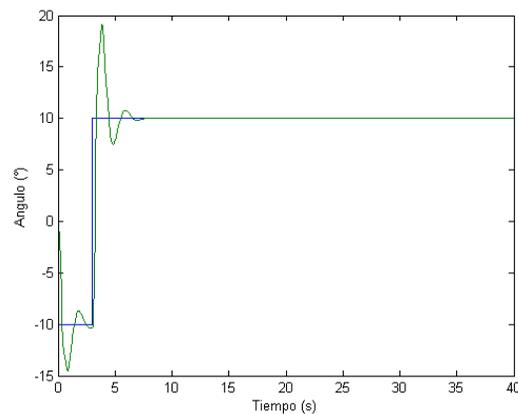
Si se usan las relaciones dadas en la Tabla 1, se calculan los parámetros del controlador PID y que se muestran en la Tabla 2, donde  $K_d$  es la ganancia derivativa y  $K_i$  es la ganancia del integrador. En la Figura 2 se muestra la respuesta en simulación del sistema empleando los parámetros obtenidos con Ziegler-Nichols.

**Tabla 2. Valores obtenidos con el método de Ziegler-Nichols**

$K_i$	$K_p$	$K_d$
5.88	1.5	0.09

Fuente: elaboración propia.

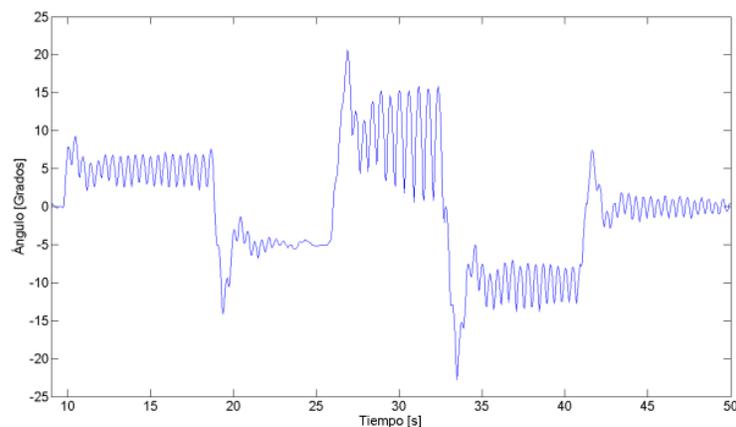
**Figura 2. Respuesta en simulación del sistema empleando los parámetros obtenidos con Ziegler-Nichols**



Fuente: elaboración propia.

Si se introducen los valores de la Tabla 1 al PLC para el control de tensión del proceso textil, se obtiene la respuesta que se ilustra en la Figura 3 para señales de entrada de diferente amplitud y dentro de la zona de operación definida entre  $[-16,16]^\circ$ . Como se puede observar de la Figura 3, la respuesta después de un tiempo logra estabilizarse con cierto error en estado estacionario, pero tiene oscilaciones al momento de aplicar un flanco de subida o bajada para una señal tipo escalón.

**Figura 3. Respuesta experimental con los datos obtenidos con el método de Ziegler-Nichols**



Fuente: elaboración propia.

En concordancia con Gutiérrez et al. (2011),

“Las reglas de sintonización de Ziegler-Nichols se han usado, junto con otras reglas, ampliamente para sintonizar controladores PID en los sistemas de control de procesos en los que no se conoce con precisión la dinámica de la planta. Tales reglas de sintonización han demostrado ser muy útiles durante muchos años. Por supuesto, las reglas de sintonización de Ziegler-Nichols se aplican a las plantas cuya dinámica se conoce. Si se conoce la función de transferencia de la planta, se calcula la respuesta escalón unitario, o  $K_{CR}$  y  $T_{CR}$ ”.

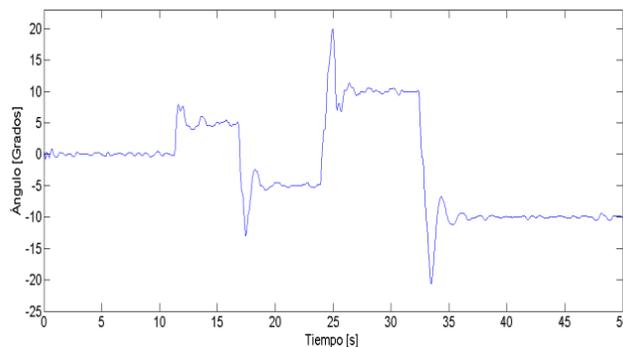
Si se sintoniza manualmente el controlador, teniendo como semillas de valores los calculados con el método de Ziegler-Nichols, se obtiene la respuesta ilustrada en la Figura 4. La Tabla 3 muestra los valores de los parámetros del controlador empleados, donde sólo se modificó  $K_d$ .

**Tabla 3. Valores obtenidos al sintonizar manualmente a partir de los resultados del método de Ziegler-Nichols**

$K_i$	$K_p$	$K_d$
5.88	1.5	0.01

Fuente: elaboración propia.

**Figura 4. Respuesta al sintonizar manualmente a partir de los resultados obtenidos con el método de Ziegler-Nichols ( $K_d$ )**



Fuente: elaboración propia.

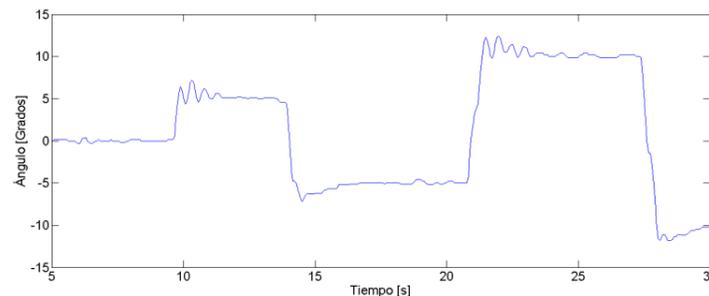
De la Figura 4 se puede observar que al disminuir  $K_d$ , el error de estado estable disminuye, pero hay un mayor sobrepaso al momento de hacer el flanco de subida o bajada del escalón de referencia. Si se modifica tanto el  $K_p$  como el  $K_i$ , se obtiene la respuesta que se ilustra en la Figura 5, en la que el sobrepaso inicial es mucho menor al de la Figura 4. La Tabla 4 muestra los valores hallados en la sintonización manual.

**Tabla 4. Valores obtenidos al sintonizar manualmente a partir de los resultados del método de Ziegler-Nichols ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ )**

$K_i$	$K_p$	$K_d$
2	2	0.01

Fuente: elaboración propia.

**Figura 5. Respuesta al sintonizar manualmente a partir de los resultados obtenidos con el método de Ziegler-Nichols ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ )**



Fuente: elaboración propia.

## MÉTODO DEL LUGAR DE LAS RAÍCES

De acuerdo a la Universidad Politécnica de Madrid:

“El Lugar de las Raíces (LDR) es un conjunto de reglas mediante las cuales se pueden determinar la posición de las soluciones de la ecuación características en el plano complejo, cuando uno o varios parámetros de la función de transferencia del sistema, en bucle abierto, varían en su rango (Flores, 2004). Normalmente este parámetro suele ser la ganancia estática de la cadena abierta. El LDR da una idea sobre la estabilidad, la precisión y la naturaleza de la respuesta transitoria”.

Para calcular los datos del controlador con un tiempo de estabilización ( $t_s$ ) de 1 s, se tiene que:

$$t_s = 4\tau = \frac{4}{\zeta\omega_n}, \quad (1)$$

Y con un sobrepaso ( $M_p$ ) igual a 5%:

$$M_p = e^{-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}}, \quad (2)$$

Si se resuelven (1) y (2) se obtienen los parámetros de amortiguación ( $\zeta$ ) y frecuencia natural ( $\omega_n$ ), por lo que los polos del controlador PID están dados por:

$$s_d = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} = -4 \pm j4.19, \quad (3)$$

Donde  $Sd$  representa el valor de los polos. Los ángulos del controlador y del sistema controlado, evaluados en (3), deben ser iguales a  $\pm 180^\circ$ , por lo que:

$$\theta = \angle \left( K \frac{s^2 + K_p/K_D s + K_I/K_D}{s} \right), \quad (4)$$

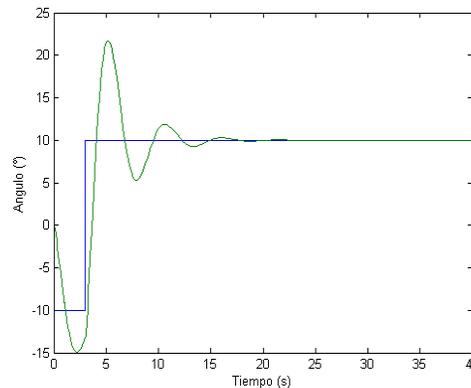
Donde  $\theta$  representa el ángulo del sistema. Con (4) y conociendo los polos del sistema se encuentran los valores de  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ . Dichos valores se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5. Valores obtenidos con el método del lugar de las raíces**

$K_i$	$K_p$	$K_d$
0.84	0.42	0.052

Fuente: elaboración propia.

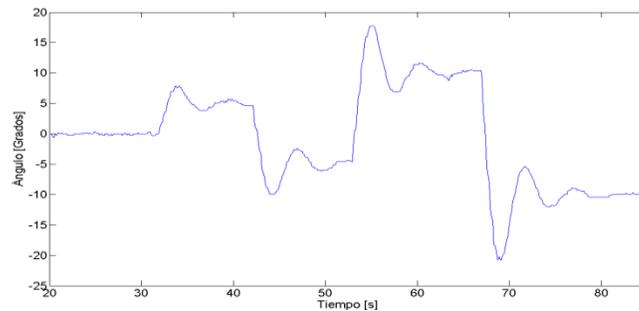
**Figura 6. Respuesta en simulación del sistema con los parámetros obtenidos con el método del lugar de las raíces**



Fuente: elaboración propia.

Empleando los valores de la Tabla 5, e ingresándolos al controlador del sistema real (PLC), se obtiene la respuesta que se muestra en la Figura 7.

**Figura 7. Respuesta del sistema con los parámetros obtenidos con el método del lugar de las raíces**



Fuente: elaboración propia.

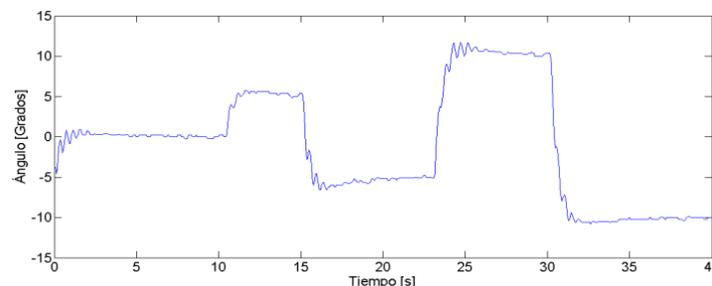
Al sintonizar manualmente el controlador a partir de los resultados obtenidos por éste método, se obtiene la respuesta que se ilustra en la Figura 8. La Tabla 6 muestra los valores obtenidos con la sintonización manual, a partir de los valores arrojados por el método del lugar de las raíces.

**Tabla 6. Valores obtenidos con la sintonización manual, a partir de los valores obtenidos con el método del lugar de las raíces**

$K_i$	$K_p$	$K_d$
0.5	1.3	0.04

Fuente: elaboración propia.

**Figura 8. Respuesta sintonizada manualmente, a partir de los resultados obtenidos con el método del lugar de las raíces**



Fuente: elaboración propia.

El sistema mejora mucho con la sintonización manual, ya que el sobrepaso que se muestra en la Figura 8 es mucho menor al que se muestra en la Figura 7. Además, los datos en estado estable tienen un error mucho menor cuando se sintoniza manualmente.

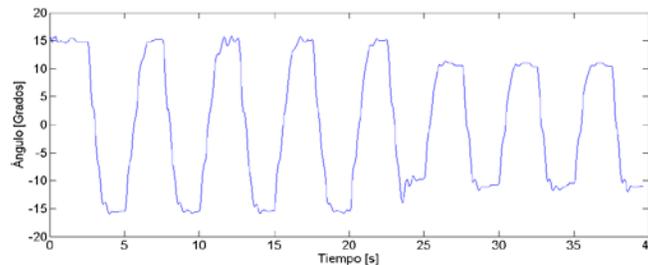
En un segundo intento, al variar los parámetros sintonizados manualmente se obtienen los valores de la Tabla 7 y la respuesta obtenida se muestra en la Figura 9, en la que la frecuencia de la señal de referencia aumentó considerablemente.

**Tabla 7. Valores obtenidos con la sintonización manual, a partir de los valores obtenidos con el método del lugar de las raíces**

$K_i$	$K_p$	$K_d$
1.5	1.8	0.02

Fuente: elaboración propia.

**Figura 9. Segunda respuesta al sintonizar manualmente, a partir de los resultados obtenidos con el método del lugar de las raíces**



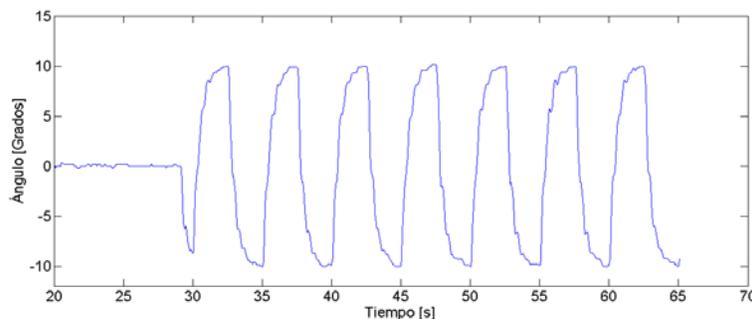
Fuente: elaboración propia.

Se puede observar de la Figura 9 que el sistema de control para esa frecuencia de la señal de referencia hace más evidente el retardo de respuesta del sistema de control, pero aun así el sistema llega al valor de estado estable con un error pequeño.

### FEEDFORWARD

La respuesta del sistema para el sistema con sólo el control proporcional,  $K_p=1$ , y con polarización igual a 16,3 se muestra en la Figura 10.

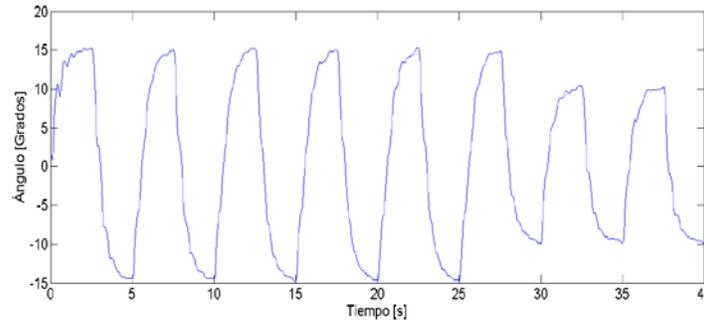
**Figura 10. Respuesta del sistema con polarización y con  $K_p=1$**



Fuente: elaboración propia.

La respuesta del sistema con una ganancia para el bloque feedforward de 1,1 y sin polarización se muestra en la Figura 11.

**Figura 11. Respuesta del sistema con ganancia del feedforward de 1,1 y sin polarización**



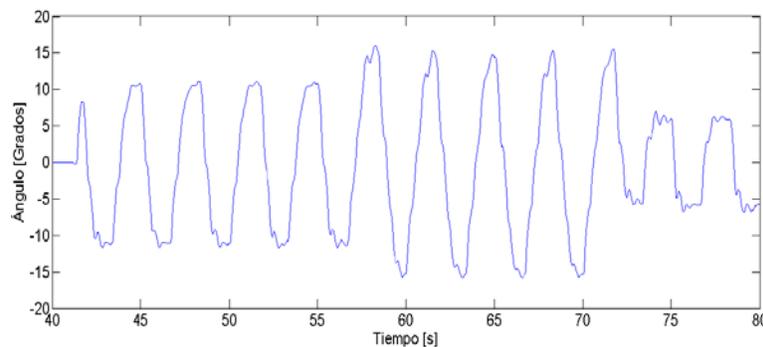
**Fuente:** elaboración propia.

Se puede observar que el feedforward tiene una muy buena respuesta a la señal de referencia a esa frecuencia y tiene un error de estado estable pequeño, como se muestra en la Figura 11.

### CONTROL PID CON FEEDFORWARD

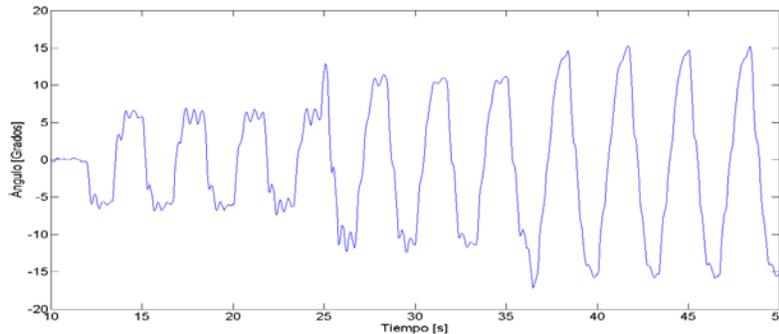
Si se emplea el controlador PID con los parámetros de la Tabla 6, con el valor de la ganancia de 1,1 y con polarización, se obtiene la respuesta que se muestra en la Figura 12. Mientras que si se emplea el controlador PID anterior, pero sin polarización, se tiene la respuesta de la Figura 13.

**Figura 12. Respuesta del sistema con un PID más un feedforward y con polarización**



**Fuente:** elaboración propia.

**Figura 13. Respuesta del sistema con un PID más un feedforward y sin polarización**



**Fuente:** elaboración propia.

En las Figuras 8-11 se puede observar que la mejor respuesta se obtuvo empleando un controlador PID más un feedforward, pero con polarización del sistema, ya que es mejor para todo el rango de operación. Por su parte, el feedforward operando solo a pequeños cambios de la referencia oscila más, y cuando no hay polarización la respuesta difiere más de la referencia.

### ANTI-WINDUP

Según la web Micro-Designs (2010),

“El efecto windup aparece al arrancar el sistema o en cualquier otra situación, donde aparece un error muy grande durante un tiempo prolongado. Esto hará que el término integral aumente para reducir el error. Si el actuador es limitado, se saturará, pero el término integral seguirá creciendo. Cuando el error se reduce, la parte integral también comenzará a reducirse, pero desde un valor muy alto, llevando mucho tiempo hasta que logre la estabilidad, generando fluctuaciones exageradamente grandes”.

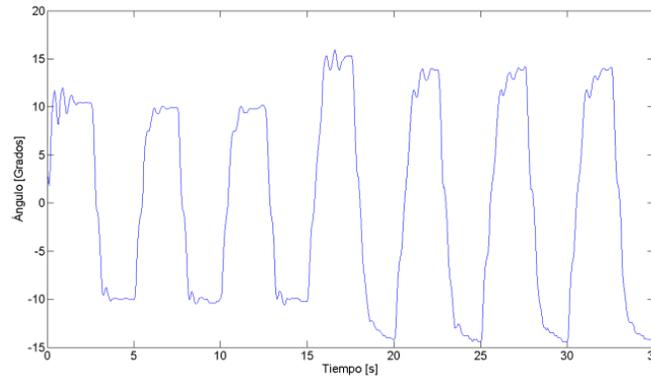
Sin embargo, hay dos formas para evitar que ocurra este fenómeno (UPM, 2008):

“Introducir limitadores en las variaciones de la referencia, tal que la salida del controlador nunca alcance los límites del actuador. Lo anterior, a menudo, produce límites en el funcionamiento del controlador y no evita el windup causado por las perturbaciones.

Otra forma es el recálculo de la integral. Cuando la salida se satura, la integral es recalculada, de tal forma que su nuevo valor proporciona una salida en el límite de la saturación”.

Un controlador PI que permita un error en estado estable pequeño y una buena respuesta frente a un tren de pulsos de una frecuencia relativamente alta para el sistema se muestra en la Figura 14. La Tabla 8 muestra los valores de los parámetros del controlador PI con anti-windup.

**Figura 14. Respuesta del sistema con un controlador PI con *anti-windup***



Fuente: elaboración propia.

**Tabla 8. Valores para el controlador PI**

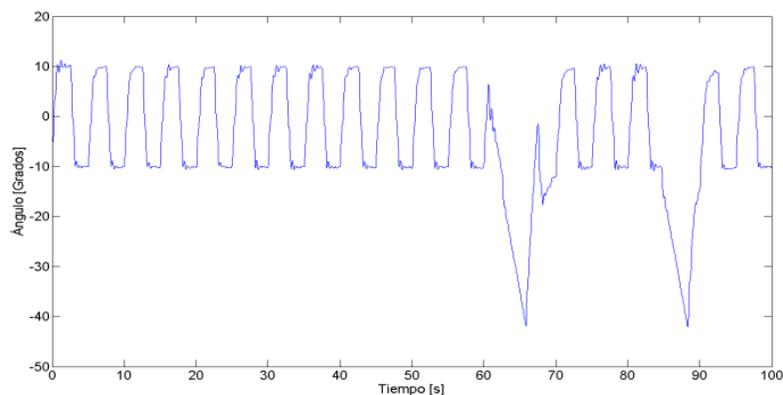
$K_i$	$K_p$
1.3	2

Fuente: elaboración propia.

La Figura 15 muestra la respuesta del sistema con un controlador PI y sin anti-windup cuando se le aplica un freno del 60%. Se observa que la señal se sale del rango esperado de trabajo por la energía acumulada, llevando al actuador a saturarse.

La diferencia de aplicar o no anti-windup está en la señal que manda el controlador al actuador. Cuando hay anti-windup, que es un mecanismo también de seguridad, este ayuda a contrarrestar la energía acumulada y evita que el integrador multiplique estos valores, mientras que si no lo hay, el integrador debe asumir esta responsabilidad para que luego de cierto tiempo se logre estabilizar el sistema.

**Figura 15. Respuesta del sistema sin anti-windup cuando se aplica un freno del 60%**



Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

Se ratifica lo expuesto por Gutiérrez et al. (2011),

“las reglas desarrolladas por Ziegler y Nichols son las reglas más usadas en la sintonización de PID, cuando es difícil obtener el modelo matemático de alguna planta a la cual se le requiere hacer algún tipo de control. Estas reglas de sintonización requieren inicialmente una etapa experimental, en donde los ingenieros a cargo del desarrollo del controlador PID, deben detallar la respuesta que genera la planta y con ésta determinar el controlador apropiado”.

Además, es importante identificar cada una de las señales y variables que intervienen en el proceso, ya que se logra un mejor entendimiento del mismo y permite identificar posteriormente un modelo apto para el proceso.

El anti-windup es un tipo de controlador que se implementa para que la parte integral de un controlador PI deje de funcionar a cierto valor, y permitir que el porcentaje de sobrepaso disminuya. Todo lo anterior, con el fin de obtener la mejor respuesta posible a la salida de la planta.

También se reconoce lo dicho por (Cerrada, 2009) en cuanto a que,

“el control proporcional tiende a producir grandes sobrepasos y oscilaciones debido a la magnitud del error, que genera acciones de control positivas muy elevadas y sucesivas acciones de control negativas poco adecuadas, en relación al sobrepaso que se está generando.

La incorporación de la acción derivativa compensa el efecto del control proporcional disminuyendo la magnitud de la acción de control positiva y aumentando las acciones de control negativas cuando es necesario a fin de reducir los sobrepasos”.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cerrada, M. (2009). Diseño de controladores PID. Documento en línea. Disponible en: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/clauidiag/DocuC2/Diseno%20PID%201.pdf>. Consulta: 14/08/2013.
- Flores, A. (2004). El método del lugar de las raíces. Documento en línea. Disponible en: <http://xa.yimg.com/kq/groups/28772846/2042094291/name/rootlocus.pdf>. Consulta: 16/09/2013.
- Gutiérrez, J.; Herrera, J. y Orozco, C. (2011). Reglas de sintonización para controladores PID. Universidad de San Buenaventura, Colombia.
- Kim, S.; Kumar, A.; Dorrity, J.L. y Vachtsevanos, G. (1994). Fuzzy modeling, control and optimization of textile processes. Fuzzy Information Processing Society Biannual



Conference, Industrial Fuzzy Control and Intelligent Systems Conference, and the NASA Joint Technology Workshop on Neural Networks and Fuzzy Logic. (Pp.32-38).

Ogata, K. (2003). Ingeniería de control moderna. España. Editorial Pearson.

Pinto, M. (2006). Sintonización de controladores PID utilizando Algoritmos Evolutivos. Ingeniería electrónica. Universidad de Pamplona. Colombia.

PROEXPORT COLOMBIA (2012). Sector Textil y Confección. Promoción de Turismo, Inversión y Exportaciones. Colombia. Documento en línea. Disponible en: [http://www.inviertaencolombia.com.co/images/Perfil%20textil%20y%20confecci%C3%B3n\\_2012.pdf](http://www.inviertaencolombia.com.co/images/Perfil%20textil%20y%20confecci%C3%B3n_2012.pdf) consulta: 19/02/2014.

Rivero, R. (2011). Identificación de Sistemas de Segundo Orden. Argentina. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional.

UNITRONICS (2004). VisiLogic–Software Manual. Documento en línea. Disponible en: <http://www.unitronics.com/docs/technical-library/visilogic-utilities.pdf?sfvrsn=0>. Consulta: 12/03/2014.

Universidad Politécnica de Madrid (UPM). (2008). Controlador PID con anti-windup. Procesos Industriales. Documento en línea. Disponible en: <http://www.elai.upm.es/moodle/mod/resource/view.php?id=825>. Consulta: 16/03/2014.

Universidad Politécnica de Madrid (UPM). (2010). Lugar de las Raíces. Documento en línea. Disponible en: [http://www.elai.upm.es/webantigua/spain/Asignaturas/Servos/practicas/prac7\\_ldr.pdf](http://www.elai.upm.es/webantigua/spain/Asignaturas/Servos/practicas/prac7_ldr.pdf). Consulta: 11/04/2014.

Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2002). Determinación del Potencial Técnico y Económico de URE en el Subsector Industrial de Textiles. Colombia. Ministerio de Minas y Energía.