

## SISTEMA DE CONTROL EN CASCADA PARA NIVEL Y FLUJO

Cascade control system between level and flow

**Rodolfo Morales**

Universidad Privada Dr. Rafael Bellosó Chacín  
Maestría en Ingeniería de Control y Automatización de Procesos  
Maracaibo-Venezuela  
moralesmeleanrodolfo@gmail.com

### RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo proponer un sistema de control en cascada para las variables de Nivel y Flujo en una planta piloto. El estudio se realizó en una planta piloto que se encuentra en el Laboratorio de Controles e Instrumentación de la Escuela de Mecánica de la Facultad de Ingeniería en la Universidad del Zulia. La misma estuvo sustentada teóricamente por Ogata (2000), Dorf y Bishop (2008), y Murril (2011). La metodología se clasifica como de tipo proyectiva con diseño no experimental. La investigación estuvo compuesta por tres (3) fases. Las cuales abarcan desde el estudio de la planta, la identificación de los procesos, el desarrollo y pruebas con el programa en el software en interface con una tarjeta Arduino UNO. Los resultados muestran que el flujo se comporta como un proceso de segundo orden mientras que el nivel como primer orden, los cuales fueron entonados mediante diferentes métodos para obtener las ganancias de los controladores del lazo interno como Proporcional y el lazo externo como Proporcional-Integral, el control en cascada logro estabilizar el valor medido de nivel dentro del margen de error del 2% del valor deseado más rápido que el control PI Clásico pero de acuerdo al criterio del IAE este último tuvo mayor desempeño al disminuir el error.

**Palabras clave:** PI, Cascada, LabVIEW, Nivel, Flujo.

### ABSTRACT

The objective of the present investigation was to propose a cascade control system for the Level and Flow variables in a pilot plant. The study was conducted in a pilot plant, in the Laboratory of Controls and Instrumentation of the School of Mechanics of the Faculty of Engineering at the Universidad del Zulia. It was theoretically supported by Murril (2011), Dorf and Bishop (2008) and Ogata (2000). The methodology was classified as projective type with a non-experimental design. The research was composed of three (3) phases, which included the study of the plant, the identification of the processes, the development and tests with the program in the software in interface with an Arduino UNO card. Results show that the flow behaved as a second order process; while the level as a first order, which were tuned by different methods to obtain the gains of the controllers of the internal loop as Proportional and the external loop as Proportional-Integral. The cascade control was able to stabilize the measured level value, within the margin of error of 2% of the desired value faster than the PI Classic control, but according to the criteria of the IAE, the latter had greater performance, when the error decreased.

**Keywords:** PI, cascade, LabVIEW, level, flow

### INTRODUCCION

Las plantas piloto son sistemas a menor escala que pueden simular procesos reales, los cuales permiten el estudio del comportamiento de diferentes variables que se pueden encontrar en la industria, así como de problemas que tienden a presentarse en la misma. A su vez da lugar al desarrollo de sis-

temas de control que posteriormente pueden implementarse en las plantas industriales. El Laboratorio de Controles e Instrumentación de la Universidad del Zulia tiene un banco de pruebas de medición de nivel y flujo el cual ha sido ensayado mediante estrategias de control como el PID y derivados como el PID Dual Loop. En el momento que se estudió la planta las variables se manejaban multipunto por lo que había tiempos muertos, con retrasos de más de 4 segundos, esto a causa de los daños en los convertidores IP, válvulas deficientes y acumulación de agua debido a la mala purga del compresor, lo que perjudica la vida útil de los equipos.

El banco de pruebas requiere de una actualización constante en nuevas tecnologías para el uso de nuevas estrategias de control, sino se presentaría un desfase con respecto al progreso en otras instalaciones, para otras estrategias a aplicar se cuenta con el control en cascada que de acuerdo con Murril (2011) es un sistema jerárquico que combina dos o más lazos cerrados, los cuales se denominan como variable esclava y variable maestra, se usa como lazo interno el proceso más rápido posible para corregir el comportamiento de la variable principal, por excelencia se escoge el flujo. El inconveniente de la estrategia es: el aumento del costo de instrumentación más compleja, la complejidad adicional de sintonizar 2 o más lazos de realimentación, y el diseño del programa.

Objetivo general:

- Analizar el desempeño de un sistema de control en cascada para nivel y flujo.

Objetivos específicos:

- Realizar las pruebas en el banco a diferentes condiciones.
- Realizar el programa del Sistema de Control en Cascada para Nivel y Flujo.
- Determinar los modelos matemáticos de los procesos de Nivel y Flujo.
- Implementar el Sistema de Control de Nivel y Flujo.
- Sintonizar los controladores de lazo primario y del lazo secundario.
- Comparar el desempeño con el PID Clásico.

## METODOLOGIA

Inicialmente Hernández (2003), define la investigación no experimental como los “estudios que se realizan sin la manipulación deliberada de variables y en los que solo se observan los fenómenos en su ambiente para después analizarlos”. Dicho esto, la

investigación es de tipo no experimental al no haber manipulaciones en el banco de pruebas ni rediseño de ninguno de sus componentes.

Kelinger (1979) señala que “La investigación no experimental o ex-post-facto es cualquier investigación en la que resulta imposible manipular variables o asignar aleatoriamente a los sujetos o a las condiciones”. Del mismo modo, Paella y Martins (2010), expresan que “el diseño no experimental es el que se realiza sin manipular en forma deliberada ninguna variable. Se observa los hechos tal y como se presentan en su contexto real, para luego analizarlos.

Las muestras fueron recolectadas de manera intencional, mediante la observación directa y documental usando como instrumento la hoja de cálculo y el block de notas para tomar los datos desde el banco de pruebas del Laboratorio de Controles e Instrumentación de la Escuela de Mecánica de La Universidad del Zulia.

El procedimiento de la investigación está dividido en tres (3) fases, estas son:

- Fase I: Describir el estado actual de la planta y determinar los parámetros necesarios para la estrategia de control.
- Fase II: Diseñar el control en cascada para su implementación.
- Fase III: Evaluar el funcionamiento del programa.

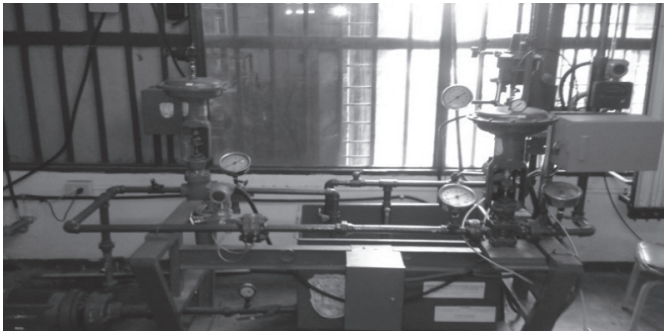
## RESULTADOS

Se presentan de forma secuencial los resultados obtenidos después de haber realizado los estudios de acuerdo a la metodología definida y a las fases establecidas anteriormente.

Fase I: Describir el estado actual de la planta y determinar los parámetros necesarios para la estrategia de control.

Se examinó la planta piloto para determinar si equipos como la válvula neumática, el compresor, los sensores de presión diferencial y la bomba centrífuga estaban en buenas condiciones para su operación. También se determinaron los parámetros de calibración para relacionar los instrumentos con la tarjeta de adquisición de datos.

**Figura 1: Planta piloto para medición de nivel y flujo.**



Fuente: Naranjo y Rosillon (2012)

Fase II: Diseñar el control en cascada para su implementación.

Se tomaron datos a partir de la tarjeta Arduino UNO que fueron guardados en una hoja de Excel y

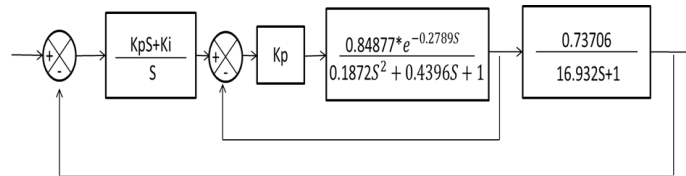
mediante Matlab fueron identificados para conocer el comportamiento de las variables de nivel y flujo, los modelos matemáticos obtenidos se compararon con los datos reales para confirmar su validez con un diagrama en simulink para la implementación de la estrategia de control, por lo tanto, los obtenidos son:

$$\frac{\%Flujo}{\%Av} = \frac{K * e^{-\theta S}}{S^2 + 2 * Tw * Zeta * S + 1} = \frac{0.84877 * e^{-0.2789S}}{0.1872S^2 + 0.4396S + 1}$$

$$\frac{\%Nivel}{\%Av} = \frac{K * e^{-\theta S}}{TpS + 1} = \frac{0.73706}{16.932S + 1}$$

Una vez validados los modelos matemáticos se construyó el diagrama de bloques del sistema de control en cascada para determinar las ganancias de los controladores del lazo interno y el externo.

**Figura 2: Diagrama de bloques del control cascada.**

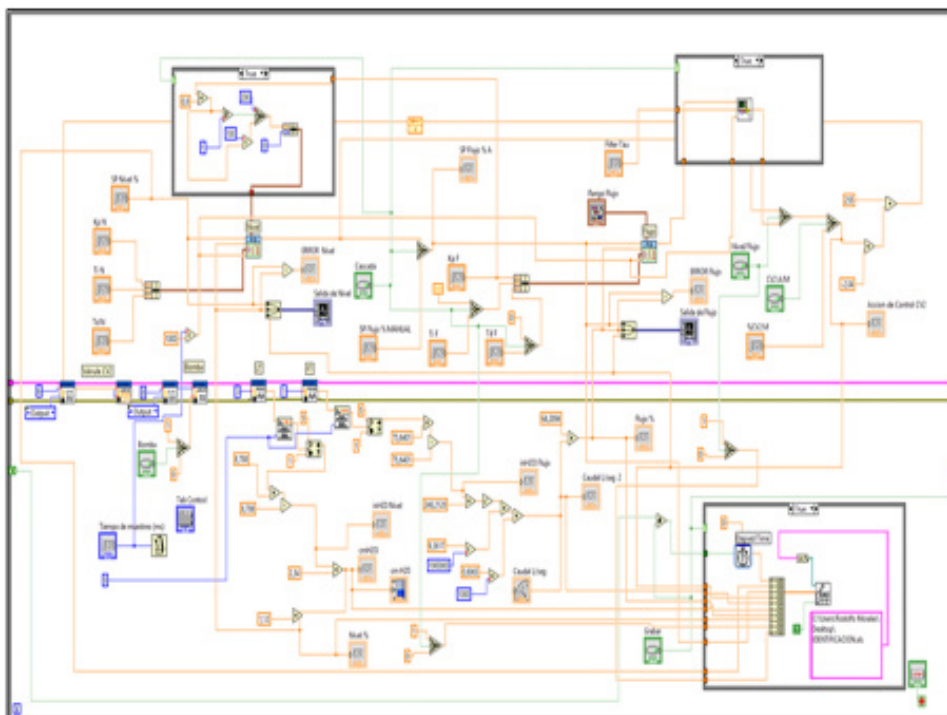


Fuente: Elaboración propia (2016)

Con el diagrama de bloques de la cascada establecido se construye el código fuente en LabVIEW

en interface con la tarjeta Arduino.

**Figura 3: Diagrama de bloques de LabVIEW.**



Fuente: Elaboración propia (2016)

El VI presente en la figura muestra los elementos de los lazos de control, recibe los valores de los transmisores en un rango de 1 a 5 voltios y por medio de los parámetros de calibración los transforma a sus unidades correspondientes para nivel (cm) y flujo (Lt/seg), tanto en marcadores puntuales como gráficos, entre estos están los set-point y el error, estos también se reflejan en las gráficas. Se pueden observar los controladores PID los cuales pueden ser operados como lazos por separado más no al mismo tiempo, y en conjunto como control cascada con las consideraciones necesarias para poder obtener un buen funcionamiento de la estrategia de control en la planta piloto. Por último muestra los switch de la bomba, los controles manuales y automáticos de la válvula neumática y la opción de grabar datos en tiempo real en una hoja de cálculo.

Al obtener los modelos matemáticos se procedió entonces a calcular la ganancia proporcional del lazo interno usando el método de Ziegler y Nichols pero al ser un proceso de segundo orden se tuvo que usar un filtro de primer orden que aumentara la constante de tiempo y realizar una aproximación, este quedó como tercer orden al juntar en serie los bloques de la función de transferencia con el filtro pero al ser muy similar a un proceso de primer orden se pudo desprestigiar esa diferencia. Después de

calcular y ajustar la ganancia proporcional, dado que el método de Ziegler y Nichols produjo muchos sobrepicos, se determinó mediante el método del lugar geométrico de las raíces las ganancias del lazo exterior para reducir el lazo cerrado de la estrategia de control. Entonces se procedió a hacer un ajuste a las ganancias para obtener una mejor respuesta del sistema, los valores obtenidos tanto de los cálculos como del ajuste en la planta piloto son los mostrados en la siguiente tabla:

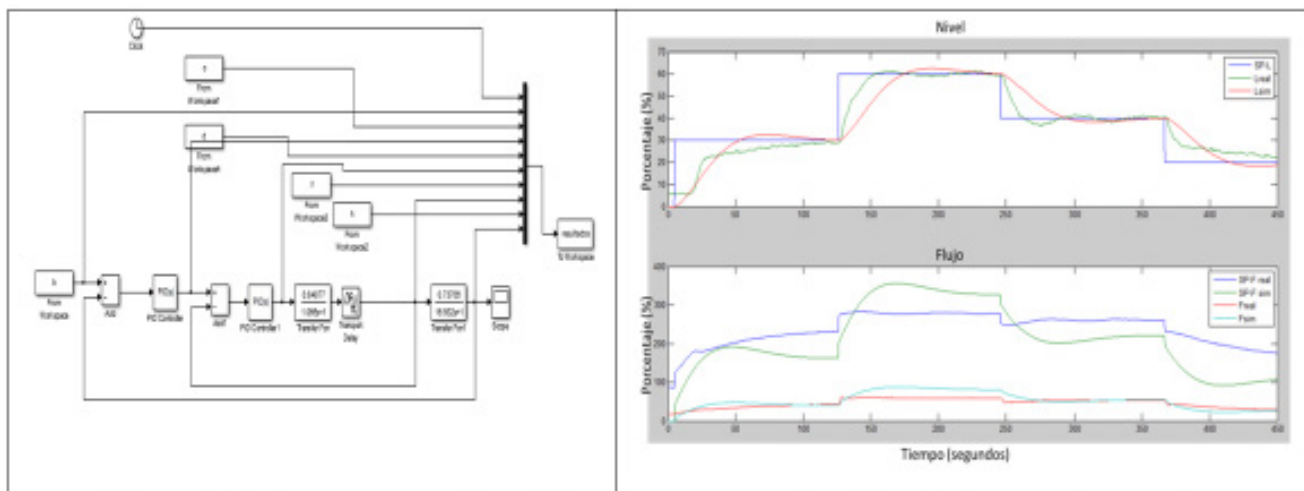
**Tabla 1:** Valores de cálculo y ajuste de las ganancias.

Parámetro	Valor calculado	Valor de ajuste
<b>Kp Nivel</b>	1,08	1,25
<b>Ti Nivel</b>	0,111	0,083
<b>Kp Flujo</b>	0,3868	0,4
<b>Tau Filtro</b>	1,25	0,25

Fuente: Elaboración propia (2016)

Después de comprobar que los valores medidos de la variable principal alcanzaron el 2% del margen del error en estado estacionario, se tomaron datos de la planta en diferentes valores de set-point para realizar un diagrama de simulink donde se comparó el comportamiento del modelo matemático con el proceso real del banco de pruebas.

**Figura 3:** Diagrama en Simulink y respuesta obtenida del control cascada comparando datos reales con simulados.



Fuente: Elaboración propia (2016)

Se pudo observar que los comportamientos del control en cascada fueron muy similares, mostrando intervalos de estabilización parecidos, también es evidente que el proceso de flujo no alcanzó sus valores de referencia debido a que eran muy altos pero no era necesario ya que la variable principal

de nivel pudo estabilizar dentro del margen requerido.

Fase III: Evaluar el funcionamiento del programa.

Para evaluar el desempeño de la cascada se realizó una entonación para un control PI usando

el mismo modelo matemático para el proceso de nivel mediante el método de lugar geométrico de las raíces, la razón de comparar las dos estrategias

usando esta variable se debe a que es el proceso maestro, por lo que su comportamiento fue el principal para el estudio.

**Tabla 2: Ganancias del control PI de nivel.**

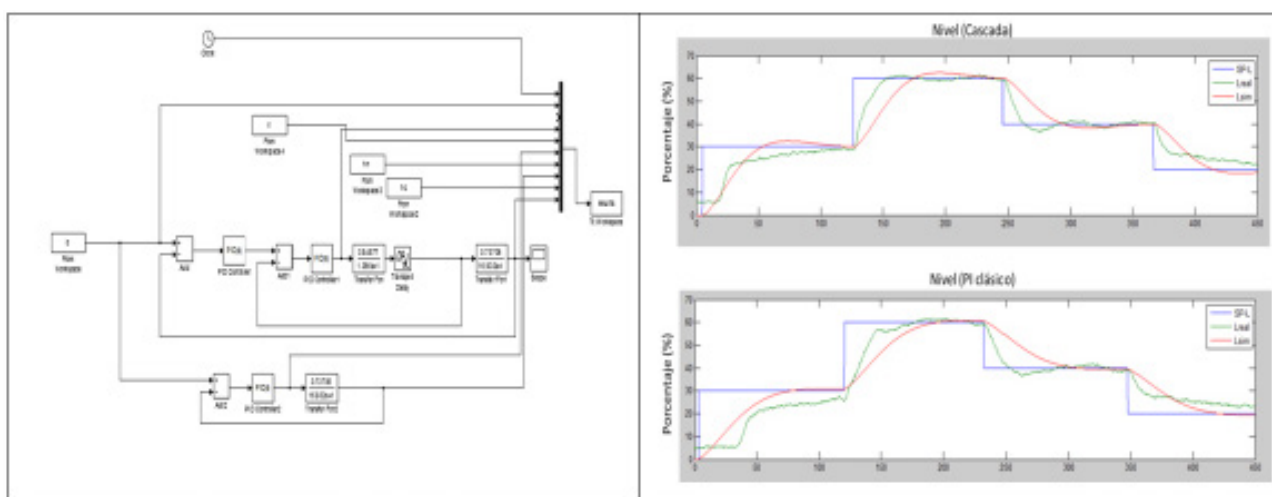
Ganancias de nivel	
<b>Kp=K</b>	0.244
<b>Alfa (iterado)</b>	0.20
<b>Ki=alfa*Kp</b>	0.0488
<b>Ti=Kp/Ki</b>	0.0833

Fuente: Elaboración propia (2016)

Al tomar datos de ambas estrategias se cons-

truyó un diagrama de simulink donde se pudieron comparar los comportamientos con respecto a los

procesos simulados y entre ellas:



**Figura 4: Diagrama de Simulink y comparación entre control cascada y PI Clásico.**

Fuente: Elaboración propia (2016)

Se pudo observar que el control cascada presento mejor respuesta para mantener a la variable en el margen de referencia con el criterio del 2% y mayor velocidad, ambas estrategias lograron la estabilización, pero para determinar el mejor desempeño en la disminución del error acumulado durante la prueba se aplicó el criterio IAE.

El criterio IAE consistió en calcular el error que se tiene entre el valor medido de la variable y el valor de referencia, tanto en el instante donde se realizan las acciones de control para ajustar el proceso como en el margen de estabilización del 2%, para el control en cascada se obtuvo 0.3559 y para el PI Clásico 0.3081, esto quiere decir que el ultimo tuvo mejor precisión y por lo tanto un mejor desempeño.

## DISCUSION

De acuerdo a lo establecido por Murril (2011) el control en cascada presenta el inconveniente de tener una instrumentación e implementación más compleja, en la planta piloto ya se contaba con los elementos sensores y transmisores para los lazos abiertos, pero al definir mediante identificación el orden de los procesos para aplicar los métodos de entonación mencionados por Ogata (2000) y Dorf y Bishop (2008), no se hace referencia en que se debe buscar que el proceso interno del lazo de control tenga el orden más sencillo posible, eso hizo que fuera necesario usar un filtro con una alta constante de tiempo para poder aproximar el proceso a

primer orden y efectuar el cálculo de las ganancias de controlador.

Los métodos de entonación planteados por Ogata (2000) y Dorf y Bishop (2008) fueron aplicados pero no hacían mención de que el método de Ziegler & Nichols causaba muchos picos en la simulación, por lo tanto la ganancia debió reducirse antes de ser implementada en la planta, el método del lugar geométrico de las raíces fue desarrollado de acuerdo a lo establecido sin presentar inconvenientes.

### CONCLUSIONES

La simulación del control en cascada no presentó inconvenientes a diferencia de su implementación en la planta piloto, esta no tuvo problemas para operar en lazo cerrado mediante controles PI o PID tanto para el proceso de flujo como el de nivel, pero al programa en LabVIEW se le tuvieron que hacer varias modificaciones las cuales se reflejan en que la salida del algoritmo del nivel debía ser de valores muy altos para aumentar el set-point del algoritmo de flujo para que este último pudiera realizar las acciones de control por medio de la válvula neumática, esto se pudo observar en la comparación del proceso simulado con el real. También se debe resaltar que las ganancias usadas en la simulación no fueron suficientes para controlar la planta, por esa razón se hizo necesario un ajuste manual en el banco de pruebas.

Finalmente, se observó que a diferencia de los lazos cerrados de control que deben aproximar la variable medida al margen de referencia de acuerdo a Ogata (2000), es que en el control en cascada solo la variable maestra se encuentra dentro de ese margen, dado que la secundaria solo debía llegar a los valores que permitieran estabilizar a la principal, aun si la primera presentaba mucha diferencia con respecto a su valor de set-point.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dorf y Bishop (2008). *Modern Systems*. 11 th Edition Person Education Upeer. Saddle River
- Gil Rodríguez, Manuel. (2003) *Introducción rápida a MATLAB y Simulink para ciencias e ingeniería*. Ediciones Díaz de Santos S.A.
- Hernández Sampieri, Roberto; Fernández Collado, Carlos y Baptista Lucio, Pilar. *Metodología de la Investigación*. Editorial McGraw-Hill. Impreso en Colombia, 1994 / 505p.
- Katsuhiko, Ogata. (2000). *Ingeniería de control moderna*. Editorial Prentice Hall. Tercera edición.
- Kerlinger, Fred N., (1975): "Investigación del Comportamiento. Técnicas y Metodología". Editorial Interamericana. 1ª edición 1975. México./ 773pp.
- Molina Martínez, José Miguel. Jiménez Buendía, Manuel. (2012). *Programación grafica para ingenieros*. Ediciones Marcombo S.A. Alfaomega.
- Parella et al (2010) *Metología de la Investigación Cualitativa*. Edición 2010. Editorial FEDEUPEL.
- Murril, Paul (2011). *Process control theory*. p.p 131
- Nava, Alexis. (2004). *Diseño de un controlador de flujo basado en modo deslizantes en un banco de pruebas piloto para válvulas neumáticas*. La Universidad del Zulia. Facultad de Ingeniería. Escuela de Mecánica. Estado Zulia.
- Naranjo D, Rosillon K. (2012). *Diseño de un sistema de control digital de presión y nivel en planta piloto*. La Universidad del Zulia. Facultad de Ingeniería. Escuela de Mecánica. Estado Zulia.
- Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. *Modern Control Systems*. Eleventh Edition. p.p 407.