

Desarrollo de un sistema de control adaptativo tipo programador de ganancia para la regulación del nivel en un tanque esférico

Aída R. Pérez R.^{*}, Antonieta A. De Conno C., Álvaro D. Enriquez P.

Universidad de Carabobo. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Departamento de Sistemas y Automática.

Resumen.-

Un tanque esférico representa un sistema con fuertes cambios de ganancia respecto a diferenciales de nivel en cualquier punto del rango que se establezca para su regulación. En este trabajo se realiza el control de nivel en un tanque esférico utilizando un algoritmo proporcional-integral (PI) adaptativo tipo programador de ganancia. Para ello, se obtuvo la curva de ganancia del proceso, se determinó la ley de control y se aplicó el método de oscilaciones continuas de Ziegler-Nichols en lazo cerrado. Se determinaron las curvas polinómicas para representar cómo deben variar los parámetros de control. Se obtuvo una ley de control proporcional-integral (PI) adaptativa con acción inversa, para cualquier punto de ajuste entre 1 y 28 cm. La variable manipulada fue el caudal de entrada al tanque, suministrado por una bomba centrífuga con falla cerrada. El controlador permitió seguir los cambios del nivel del tanque, reflejado en un error máximo de 3,4 % para los extremos del tanque (1 y 28 cm), y en un error de máximo de 1,78 % para los demás puntos de ajustes.

Palabras clave: Control adaptativo, tanque esférico, ganancia no lineal, oscilaciones continuas

Development of an adaptative control system type programmer of gain for regulation of level in spherical tank

Abstract.-

Spherical tank represents a system with strong changes of gain with respect to level differentials in any point of range established for its regulation. In this work level control in a spherical tank is performed using adaptive proportional-integral (PI), algorithm type gain scheduling. For this work, process gain curve was obtained, control law was determined and continuous oscillations method of Ziegler and Nichols was applied. Polynomials curves were calculated in order to represent the way of variation of control parameters. An adaptive proportional-integral (PI) control law with reverse action was derived, for any set point between 1cm and 28 cm. The manipulated variable was input flow for tank, supplied by a centrifugal pump with close fault. The controller followed changes of level in the tank, getting one maximum error of 3,4 % in extreme of tank (1 cm and 28 cm), and one maximum error of 1,78 % for others set points.

Keywords: Adaptative control, Spherical Tank, Non-linear gain, continuous oscillations

1. Introducción

Una de los variables más comunes a controlar en un proceso industrial lo constituye el nivel en tanques. Dichos tanques pueden ser abiertos o cerrados y generalmente tienen forma rectangular, cónica o esférica, siendo los más utilizados los rectangulares y los esféricos. En los tanques rectangulares, el área transversal es constante en todo el rango de variación del nivel, esto no ocurre en los esféricos o cónicos

cuya sección transversal cambia con la altura del líquido dentro del tanque, ocasionando cambios en la ganancia total del proceso. Esta característica resulta de interés para la aplicación de sistemas de control que se adapten a un proceso no lineal. Un tanque esférico representa un sistema con fuertes cambios de ganancia respecto a diferenciales de nivel en cualquier punto del rango, el comportamiento de la ganancia del proceso se observa en la Figura 1, y tiene una forma parabólica [1]. Tratar de controlar al sistema, con las características que introduce dicho tanque, por métodos convencionales conlleva a ejercer control en un intervalo muy reducido de puntos de ajustes para el cual no se vea significativamente afectado el valor de la

^{*}Autor para correspondencia

Correos-e: aperezr@uc.edu.ve (Aída R. Pérez R.),
a_deconno@yahoo.com (Antonieta A. De Conno C.),
alvaropanzer@yahoo.es (Álvaro D. Enriquez P.)

ganancia.

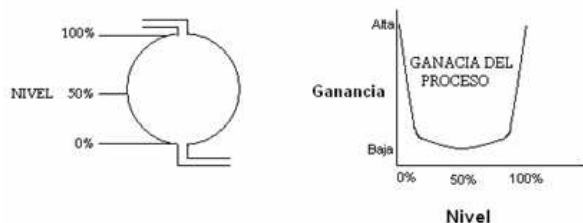


Figura 1: Tanque esférico y comportamiento de su ganancia[1]

En la mayoría de los casos se trata de compensar la variación de ganancia, mediante colocación de válvulas adecuadas, de forma tal que la respuesta efectiva del sistema sea la apropiada. Cuando esta compensación no es suficiente, se necesitan realizar cambios constantemente al controlador a fines de realizar el control requerido. En la investigación realizada por Buio [1] se indica que cuando se intenta hacer un control de un proceso es común el considerar que las propiedades de éste se mantengan constantes, ya sea en el tiempo o en los diferentes puntos de su recorrido, lo cual no concuerda con la gran mayoría de los procesos reales, donde lo normal es que por lo menos la ganancia del proceso se modifique para diferentes valores de la variable. Por otra parte, Fernández [3] señala que la parte derivativa no aporta control al proceso, y la estrategia de control adaptativa es capaz de ajustar los parámetros del PID en línea.

De acuerdo a lo anterior, se plantea entonces la aplicación de un sistema de control adaptativo utilizando un controlador lógico programable (PLC), donde se puedan variar la ganancia proporcional y el tiempo integral del controlador. Con ello se podrá variar la ganancia del sistema a lo largo del recorrido de la variable logrando ejercer un control adecuado para cualquier valor de punto de ajuste dentro del rango de la variable (0 % – 100 %) así como también para cambios en la carga mejorando sustancialmente el sistema en lazo cerrado.

2. Fundamentos teóricos

2.1. Método de ganancia última para ajuste de controladores

El método de campo de ganancia última o de período final para ajustar controladores utiliza pruebas de circuito cerrado, también llamado Método de Ziegler y Nichols para ajuste de línea. El primer paso de este

método consiste en obtener datos del proceso y los de la respuesta dinámica del sistema de control en circuito cerrado[4]. El método de ganancia última se basa en aumentar gradualmente la ganancia con la velocidad de reajuste y tiempo diferencial en su valor más bajo, a medida que se crean pequeños cambios en el punto de ajuste, hasta que el proceso empieza a oscilar en modo continuo, esta ganancia se denomina ganancia límite o ganancia última (K_u). En función de dicha ganancia límite y del periodo de las oscilaciones, pueden conocer los parámetros de ajuste de control: ganancia (K), velocidad de reajuste (T_i^r) y tiempo derivativo (T_d), mediante las siguientes expresiones [1,5]:

$$K = 0,6K_u \quad (1)$$

$$T_i^r = \frac{2}{T_u} \quad (2)$$

$$T_d = \frac{T_u}{8}, \quad (3)$$

donde T_d es el período de ciclo de las oscilaciones en minutos.

2.2. Esquema de control adaptativo tipo programador de ganancia

Un controlador adaptativo, según la definición apoyada en el comité IEEE en 1973 es «un controlador con parámetros ajustables y un mecanismo para ajuste de parámetros» [2]. Un sistema de control adaptativo puede ser atravesado por dos lazos: uno de realimentación normal formado por el proceso y el controlador y otro que es el de ajuste de parámetros. Existen cuatro tipos de sistemas adaptativos: cambio o programador de ganancia, control adaptativo de modelo referencia, reguladores de sintonización automática (self-tuning) y control dual. El control adaptativo por programador de ganancia, es denominado así debido a que el esquema fue originalmente usado para desarrollar la ganancia y luego de un cambio, que es el programador o «Schedule», el controlador es capaz de compensar cambios en la ganancia del proceso [2].

En la Figura 2 se muestra un diagrama de bloques de un sistema de programador de ganancia. El sistema puede ser visto como si tuviera dos lazos. Hay un lazo interno formado por el proceso y el controlador y un lazo externo que ajusta los parámetros del controlador en la base de las condiciones de operación. El controlador de ganancia puede ser considerado como un mapa desde los parámetros del proceso a los parámetros del controlador y puede ser implementado como una función o una tabla cerrada.

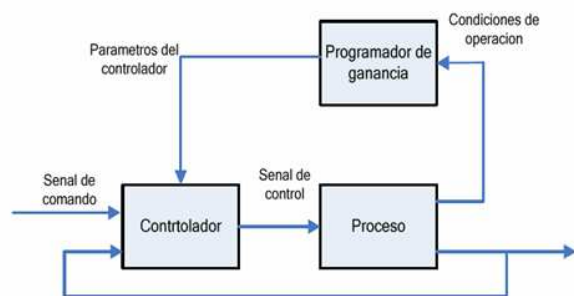


Figura 2: Diagrama de bloques de un sistema con programador de ganancia



Figura 3: Tanque esférico

3. Estudio del proceso de nivel

3.1. Características del tanque esférico

El tanque esférico a utilizar en este trabajo (Figura 3) está realizado en fibra de vidrio, es abierto al ambiente, con una base de hierro. Los diámetros de las tuberías que se conectan con el tanque, son de 15 mm. Sus características finales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Error porcentual del punto de ajuste (SP)

Característica	Valor
Altura de la base	64 cm
Diámetro	28 cm
Capacidad	11.4354 l
Peso	1.3 Kg l
Color del tanque	Blanco
Color de la base	Plateado

El volumen total del tanque y su perímetro se calcula en función de su radio con las siguientes ecuaciones:

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (4)$$

$$P = 2\pi r. \quad (5)$$

A partir del radio de 14 cm, se tiene, $V = 11435,1 \text{ cm}^3$ (11,43 l) y $P = 87,96 \text{ cm}$. Se utilizaron dos tanques rectangulares que se conectan entre sí, los cuales sirven como reservorio de agua para que la bomba suministre dicho fluido al tanque esférico por efecto de succión; y por medio de la gravedad al abrir una válvula manual se realiza la descarga de agua del tanque superior hacia los inferiores. Además se emplearon tres sensores capacitivos: dos sensores para el tanque de reserva n° 1 y uno para el tanque de reserva n° 2, estos sensores proporcionarán una señal de alarma en caso de bajo nivel de agua en dichos tanques.

3.2. Calibración del transmisor de nivel

Para lograr la calibración del transmisor de nivel se hicieron los cálculos de la presión de la columna de líquido detectada por el transmisor para diferentes intervalos de nivel. Se verificó que para un nivel de agua de 0 cm en el tanque el transmisor arrojará un valor de 4 mA; para lograrlo se realizó la supresión del cero, debido a que la base del transmisor se encuentra a 38 cm por debajo del nivel 0 cm del tanque que es conocido como LRV (*Lower Range Value*) o valor de rango inferior del transmisor. Con respecto a la calibración del Span del instrumento, se debe determinar el valor máximo en pulgadas de agua detectado por el transmisor cuando el tanque esté lleno, tomando como referencia cero la base del transmisor. Cuando el tanque está lleno su nivel de agua es de 28 cm, lo que corresponde a una altura de 66 cm respecto a la base del transmisor, dicho valor se conoce como URV (*Upper Range Value*) o valor de rango superior del transmisor. Con esta información se determina la presión de la columna de líquido detectada por el transmisor con las siguientes ecuaciones:

$$\Delta P = P_H - P_L = (P_{\text{atm}} + G_S \gamma_{H_2O} h) - P_{\text{atm}}, \quad (6)$$

$$\Delta P = G_S \gamma_{H_2O} h, \quad (7)$$

donde, G_S es la gravedad específica del agua, ($G_S = 1$); $\gamma_{H_2O} h$, es la densidad del agua ($\gamma_{H_2O} h = 1 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$), y $h = 66 \text{ cm}$.

A partir de la ecuación 7, la presión de la columna de líquido detectada por el transmisor para el máximo nivel del tanque es $\Delta P = 25,98 \text{ "H}_2\text{O}$.

Con esta presión diferencial de $25,98 \text{ "H}_2\text{O}$ se obtuvo que para el 100 % del nivel, el instrumento alcanzará un

valor de 16,88 mA, quedando la calibración del Span en un valor menor a 20 mA.

Se realizó la conexión del transmisor de nivel con la cámara de baja presión al punto más bajo del tanque y la cámara de alta presión al ambiente. Se conectó la salida del transmisor con el módulo analógico TSX AEZ 414 del PLC TSX Micro 3722 (Figura 4.) En la Tabla 2 se muestra el rango de operación del módulo analógico y del transmisor.

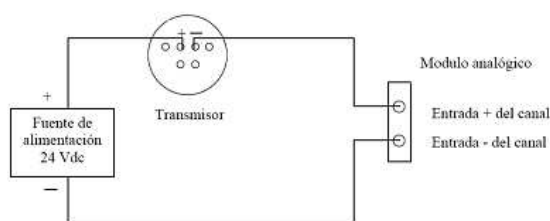


Figura 4: Conexión del transmisor al módulo analógico del PLC[6]

Tabla 2: Rango de operación del módulo analógico y del transmisor [7, 8]

Equipo	Rango de entrada	Rango de salida
Transmisor Rosemount	0 – 150 "H ₂ O	4-20 mA
Modulo analógico a digital	0-20 mA	0-10000 (adimensional)
modelo TSX AEZ 414	4-20 mA	0-10000 (adimensional)
Telemechanique	0-10 V	0-10000 (adimensional)

Para la obtención de la curva de calibración del transmisor de nivel, se realizó el llenado y vaciado del tanque para cada centímetro de nivel. Debido a que las curvas de llenado y vaciado obtenidas fueron idénticas, se muestra solamente la información de llenado (ver figuras 5-a y 5-b). En las figuras 5-a y 5-b se muestra la curva de calibración: la primera figura es la salida del transmisor en función del nivel del líquido, y la segunda corresponde a la palabra digitalizada en función de la corriente del transmisor. La palabra digitalizada corresponde al valor numérico generado por el conversor analógico-digital en el módulo de entrada del PLC TSX Micro 3722. Dicho módulo recibe el valor de corriente desde el transmisor de presión diferencial y lo convierte en un

número digitalizado, expresado en 16 bits, de allí su denominación de palabra.

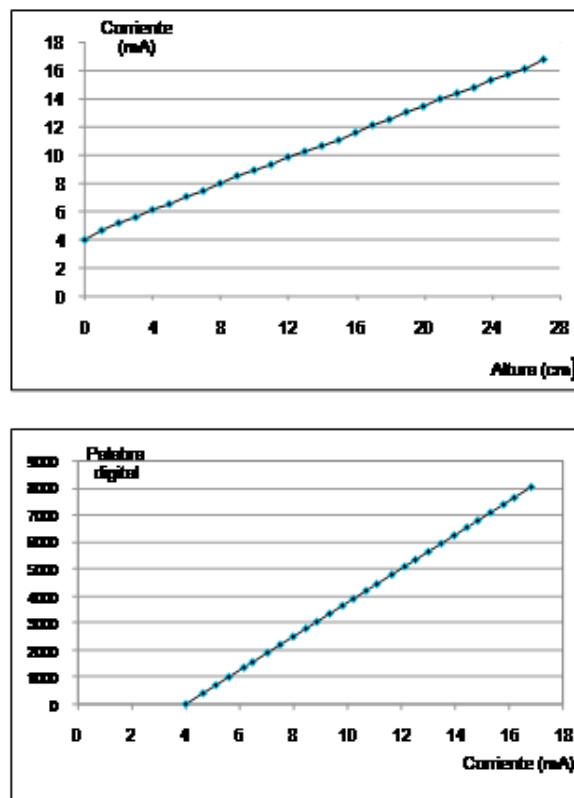


Figura 5: 5(a) Curva de calibración del transmisor de nivel, 5(b) Valores de entrada digitalizados en el PLC para la curva de calibración del transmisor

De las Figuras 5-a y 5-b se obtiene la relación matemática que representa el comportamiento de la palabra digitalizada recibida por el PLC en función del nivel (Ec. 8).

$$y = 287,5x \quad (8)$$

Donde, y es una palabra % IW, de 16 bits, correspondiente a una entrada analógica del PLC, convertida a valor digital; x es la altura h en centímetros. Definiendo a y como una palabra digital % IW y x como h se tiene entonces:

$$\%IW = 287,5h. \quad (9)$$

3.3. Determinación de las entradas y salidas del tanque

El proceso consiste en la variación de nivel durante el llenado dentro del tanque esférico. La entrada del proceso de llenado del tanque esférico es el caudal

volumétrico que permite llenar el tanque (cm^3/min). Las salidas del proceso de llenado del tanque esférico son: el nivel y la descarga del tanque, como caudal volumétrico de salida. La variable controlada será el nivel y la variable manipulada será el caudal volumétrico de entrada suministrado por una bomba centrífuga. Por limitaciones de equipos, el caudal de salida es contante y se fija por medio de una válvula manual. La manipulación del caudal de entrada se logra a través de una ley de control aplicada desde el PLC. La salida del PLC es llevada a un equipo variocompact y de este a la bomba tal como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 6.

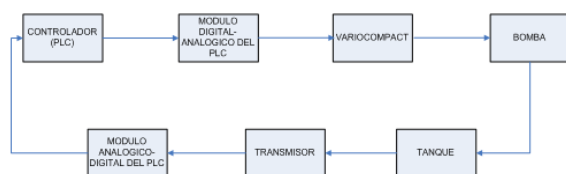


Figura 6: Diagrama de bloques de los elementos del proceso

El nivel es medido con un transmisor de presión diferencial, el control del nivel se logra mediante la variación de tensión en la bomba por medio del variocompact, lo que conlleva a una variación en el flujo de agua entrante en dicho tanque. El caudal entregado por la bomba es proporcional al voltaje aplicado a su entrada, el cual proviene de un variocompact. El variocompact se encarga de aumentar el voltaje aplicado en su entrada. La tensión de entrada al variocompact proviene de una señal analógica de voltaje proveniente del PLC (% QW4.1). En la Tabla 3 se muestran las entradas y salidas para: la bomba, el variocompact y el módulo para conversión de Valores digitales del PLC a señales analógicas.

Tabla 3: Rango de operación de la bomba, variocompact y módulo digital-analógico [8]

Equipo	Rango de entrada	Rango de salida
Bomba	0 – 24 V	0 – 10 l/min
variocompact	0 – 10 V	0 – 24 V
Modulo digital a analógico modelo	± 10000	± 10 V
TSX ASZ 200	0 – 10000	0 – 20 mA
Telemechanique	0 – 10000	4 – 20 mA

3.4. Curva de ganancia del proceso

El proceso de control de nivel en el tanque esférico consiste en la regulación del nivel de agua en dicho tanque mediante un PLC, durante la etapa de llenado. Para determinar los parámetros del controlador, inicialmente se obtiene la curva de ganancia del proceso, a fin de conocer la ganancia en función del nivel de líquido presente en el tanque, debido a las características no lineales del proceso. Para obtener la curva de ganancia del proceso, se realizó una revisión documental y se siguió el procedimiento descrito en [1]. Para determinar la ganancia del tanque se utiliza la siguiente expresión [4,9,10]:

$$k = \frac{\Delta \text{Variable Controlada}}{\Delta \text{Variable Manipulada}} = \frac{\Delta \% \text{Nivel}}{\Delta \% \text{Volumen}} \quad (10)$$

Donde:

Δ Variable Controlada: cambio en % del valor final – valor inicial del nivel

Δ Variable Manipulada: cambio en % del valor final – valor inicial del volumen

La Ec. (10) indica que la ganancia del proceso viene dada por el cambio en la variable de salida que viene a ser el nivel, entre el cambio en la variable de entrada, que en este caso es la variable manipulada (volumen) de forma indirecta a través del caudal de entrada. La ganancia del proceso será utilizada en las formulas de ajuste del controlador y deberá estar expresada en unidades adimensionales [5]. Los cálculos de la ganancia son teóricos, ya que aun cuando se puede medir el nivel con el transmisor, no se dispone de un dispositivo para realizar las mediciones de caudal para diferentes valores de nivel en todo el rango de variación de la altura en el tanque. Para cada valor de $h(t)$, en separaciones de un centímetro, se calculó el volumen y radio interno según las Ecs. (10 a 14):

$$R(t) = \sqrt{r_o^2 - (h(t) - r_o)^2} \quad (11)$$

$$V(t) = \frac{\pi h(t)(3a^2 + 3b^2 + h(t)^2)}{6} \quad (12)$$

Donde:

a : radio interno inferior (cm),

b : radio interno superior (cm)

$h(t)$: altura (cm), r_o : radio de diseño(cm)

$V(t)$: volumen (cm^3), $R(t)$: radio interno (cm)

Por ejemplo para $h(t) = 1$ se obtiene:

$$R(t) = \sqrt{14^2 - (1 - 14)^2} = 5,19 \text{ cm} \quad (13)$$

Con radio interno inferior de 0 cm

$$V(t) = \frac{\pi(3(0)^2 + 3(5,19)^2 + (1)^2)}{6} = 42,83 \text{ cm}^2$$

Estos cálculos se repitieron para todos los Valores de altura hasta 28 cm. También se determinó el porcentaje de volumen y nivel que representa el llenado del tanque para cada centímetro de nivel. Una vez obtenidos los Valores de ganancia para diferentes alturas, se procedió a levantar la curva de ganancia del proceso (Figura 7).

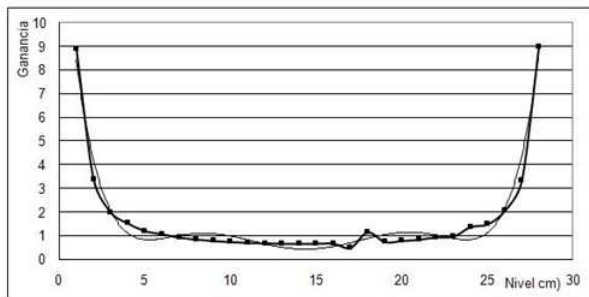


Figura 7: Ganancia real del tanque esférico

La ecuación de tendencia del comportamiento de la ganancia del proceso con respecto a la Figura 7 es:

$$Y = 0,000005x^6 - 0,000417x^5 + 0,014212x^4 - 0,240549x^3 + 2,107803x^2 - 9,005703x + 15,579491 \quad (14)$$

Donde:

Y: ganancia adimensional (K)

X : altura en centímetros (h)

Denominando a K como ganancia y h como la altura, queda entonces:

$$K = 0,000005h^6 - 0,000417h^5 + 0,014212h^4 - 0,240549h^3 + 2,107803h^2 - 9,005703h + 15,579491 \quad (15)$$

En las Ecs. 14 y se aprecia que la tendencia polinómica que mejor representa a la ganancia del proceso es un polinomio de sexto orden, esto refleja la necesidad de un controlador cuya ganancia sea no lineal y cambiante a medida que varíe el punto de control.

4. Determinación de los parámetros del controlador

4.1. Acción del controlador

Cuando el nivel disminuye, para aumentarlo el flujo de entrada al tanque debe aumentar, y como el elemento

final de control es de falla cerrada entonces la salida del controlador debe aumentar, por lo tanto la acción del controlador es inversa. El elemento final de control es la bomba y es de falla cerrada: cuando la bomba no recibe tensión de alimentación el caudal entregado es de cero litros por minuto, de esta forma se evita que el tanque se desborde cuando no exista control.

4.2. Determinación de la ley de control

La ley de control a utilizar para regular el nivel del tanque se basa en un algoritmo con acciones proporcional e integral (PI), no se agrega acción derivativa debido a que ésta acción introduce ruido al sistema definido como proceso de ganancia rápida [10]. Para determinar los parámetros del controlador del proceso se aplicó el método de ganancia última de Ziegler-Nichols en lazo cerrado, explicado en la sección 2.1. Con la acción proporcional pura, se procede a excitar el proceso aumentando la ganancia hasta que la señal de nivel entre en oscilación tras haber aplicado un escalón sobre la consigna del corrector PID.

Se colocó el controlador en automático y tras sucesivos intentos de ajustes empíricos se variaron los Valores de ganancia proporcional (Kp) en pequeños intervalos, hasta encontrar el valor con el cual el sistema oscilara, para un determinado punto de ajuste del proceso. Este procedimiento se repitió, para obtener el Kp correspondiente a cada punto de ajuste del span del proceso de 0 a 28 cm, en intervalos de 1 cm. Por ejemplo para un cambio escalón en el punto ajuste de 0 a 2 cm, se obtuvo una Ku (ganancia última) de 1100, para la cual se consiguió una respuesta en la variable controlada tal como se muestra en la figura 8, el punto de ajuste corresponde a la señal constante (línea horizontal más gruesa) y la otra curva representa la salida del controlador. El punto de ajuste y la salida del controlador están expresados en la gráfica en función de palabras digitalizadas del autómata programable usado como controlador.

Según sea el tipo de regulador (PID o PI), el ajuste de los coeficientes se efectuará de acuerdo a las formulas presentadas en la Tabla 4. Estas fórmulas corresponden a las descritas en el método de Ziegler Nichols en la sección 2.1. En dicha sección sólo se presentó el caso de un control PID (Ecs. 1 a 3); donde Kp es la ganancia proporcional, Ti: tiempo de integración, y Td es el tiempo de derivación, Ku es la ganancia última, Tu es el período de oscilación o Tu. En forma práctica se trabaja con 1/Ti (constante de integración) en lugar de Ti. Luego de haber aplicado el método de Ziegler Nichols

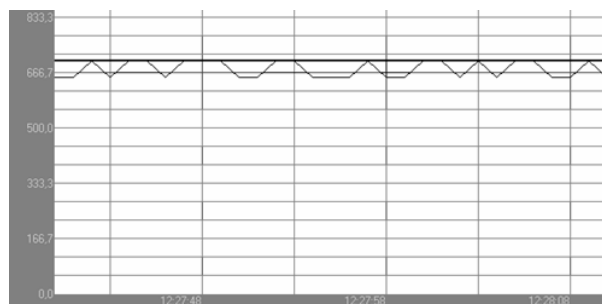


Figura 8: Respuesta del nivel al realizar el método de Ziegler Nichols en línea

Tabla 4: Ajustes de los parámetros PID en función de la ganancia última (K_u) y periodo último (T_u)[11]

	K_p	T_i	T_d
PID	$K_u/1.7$	$T_u/2$	$T_u/8$
PI	$K_u/2.22$	$0.83T_u$	

para el rango de nivel entre 0 cm y 28 cm, y una vez aplicadas las fórmulas, se obtuvieron los Valores para los parámetros de un controlador proporcional–integral mostrados en la Tabla 5.

La Figura 9 muestra el comportamiento de la ganancia (K_p) en función del nivel, obtenida a partir de los Valores de la Tabla 5. La ecuación que representa la línea de tendencia de Figura 9 es la siguiente:

$$Y = -0,00245X^6 + 0,020701X^5 - 0,682787X^4 + 11,106982X^3 - 94,149198X^2 + 413,836414X + 20,808513, \quad (16)$$

donde Y : es la ganancia del controlador y X : la altura. Denominando a K_p (adimensional) como ganancia del controlador y h (centímetros) como la altura, queda entonces:

$$K_p = -0,00245h^6 + 0,020701h^5 - 0,682787h^4 + 11,106982h^3 - 94,149198h^2 + 413,836414h + 20,808513 \quad (17)$$

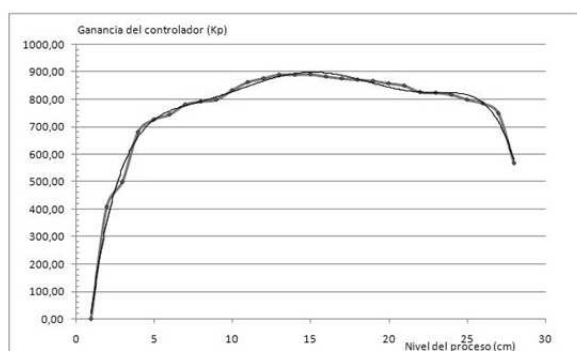
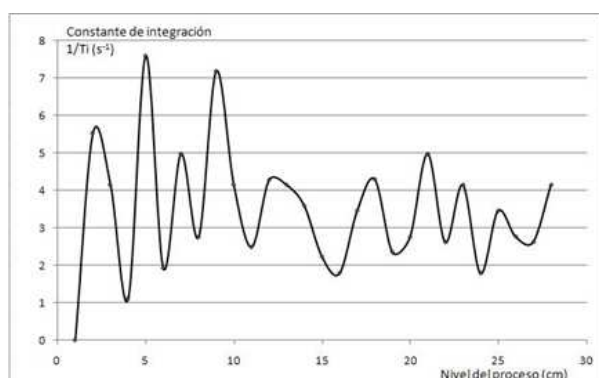
En la Ec. 17 se aprecia que la tendencia que mejor representa a la ganancia del controlador es un polinomio de sexto orden, donde a pesar de obtener coeficientes cercanos a cero, no es conveniente despreciarlos, pues permitirán representar con mayor fidelidad el comportamiento no lineal de la ganancia. Para el caso de la constante de integración se graficaron

Tabla 5: Valores de ganancia y constante de integración para los diferentes puntos de ajuste de nivel, SP, punto de ajuste (cm); PP, Palabra del proceso (adimensional)

SP	PP	K_u	$T_u(s)$	K_p	$1/T_i s^{-1}$
0	0	0	0.00	0.00	0.00
1	250	900	6.66	409.09	5.53
2	500	1100	5.00	500.00	4.15
3	800	1500	1.34	681.82	1.11
4	1100	1600	9.15	727.27	7.60
5	1400	1640	2.32	745.45	1.93
6	1700	1720	6.00	781.82	4.98
7	2000	1745	3.33	793.18	2.76
8	2250	1760	8.66	800.00	7.19
9	2550	1835	5.00	834.09	4.15
10	2800	1900	3.00	863.64	2.49
11	3100	1930	5.15	877.27	4.28
12	3400	1960	5.00	890.91	4.15
13	3700	1960	4.32	890.91	3.59
14	4000	1963	2.70	892.27	2.24
15	4300	1945	2.15	884.09	1.79
16	4550	1930	4.16	877.27	3.46
17	4850	1920	5.18	872.73	4.30
18	5150	1910	2.83	868.18	2.35
19	5400	1890	3.32	859.09	2.76
20	5700	1872	6.00	850.91	4.98
21	6000	1820	3.15	827.27	2.62
22	6300	1815	5.00	825.00	4.15
23	6570	1800	2.15	818.18	1.79
24	6900	1760	4.16	800.00	3.46
25	7150	1730	3.32	786.36	2.76
26	7450	1650	3.17	750.00	2.63
27	7700	1250	5.00	568.18	4.15
28	8050	1000	6.26	454.55	5.20

los Valores de $1/T_i$ provenientes de la Tabla 5, en función del nivel, la curva se muestra en la Figura .

A partir del comportamiento de la constante de integración mostrado en la Figura 10, se observa que tiene una tendencia altamente no lineal. Debido a este comportamiento se hace muy difícil encontrar una sola tendencia matemática que represente la variación del parámetro $1/T_i$ en función del nivel. Por lo tanto el procedimiento a seguir fue descomponer la curva de la Figura en varios segmentos donde se pudiera determinar una expresión matemática para cada intervalo, con el fin de usar estas tendencias en la programación del algoritmo de control adaptativo. En la Tabla 6 se especifican todas las tendencias matemáticas de la constante de integración ($1/T_i$) expresada en s^{-1} , para cada intervalo de punto de ajuste, expresado en

Figura 9: Ganancia del controlador (K_p) en función del nivelFigura 10: Valores que representan la constante de integración ($1/T_i$) en función del nivel

centímetros.

5. Aplicación del algoritmo adaptativo

5.1. Función de operación PID

La función PID del PLC TSXMicro 3722 utilizado como controlador, realiza una corrección PID a partir de una medida y de un valor de ajuste analógico convertido a valor digital en el formato [0 – 10000] y proporciona un control digital en el formato [0 – 10000] que puede ser convertido posteriormente a un valor equivalente de corriente o voltaje por medio de una conversión digital–analógica. Para este caso, se programó con acción proporcional–integral, en modo automático, teniendo también la posibilidad de pasar a modo manual. La Figura 11 ilustra las funciones de la acción PID en el autómata o PLC TSX Micro 3722.

5.2. Diagrama descriptivo del algoritmo empleado

El diagrama de flujo que describe al algoritmo de control PI adaptativo obtenido se muestra en la Figuras 12 y 13. El punto de ajuste se indica como «Set Point» (SP) en el diagrama de flujo. En la Tabla 7 se

Tabla 6: Expresiones matemáticas de la constante de integración ($1/T_i$)

Rango de Nivel (cm)	Ecuación de constante de integración $1/T_i (s^{-1})$
$0 \leq h \leq 3$	$1/T_i = -0,83h^2 + 1,11h + 5,25$
$3 \leq h \leq 7$	$1/T_i = -2,331h^3 + 39,33h^2 - 2,17,4h + 397,2$
$7 \leq h \leq 11$	$1/T_i = 0,345h^3 - 8,625h^2 + 68,720h - 167,210$
$11 \leq h \leq 14$	$1/T_i = -0,395h^2 + 9,315h - 50,750$
$14 \leq h \leq 17$	$1/T_i = -0,415h^2 + 14,53h - 122,8$
$17 \leq h \leq 21$	$1/T_i = -1,065h^3 + 61,610h^2 - 1185405h + 7589080$
$21 \leq h \leq 23$	$1/T_i = -1,945h^2 + 85,165h - 928100$
$23 \leq h \leq 28$	$1/T_i = -0,109h^4 + 11,29h^3 - 438,2h^2 + 7541h - 48553$

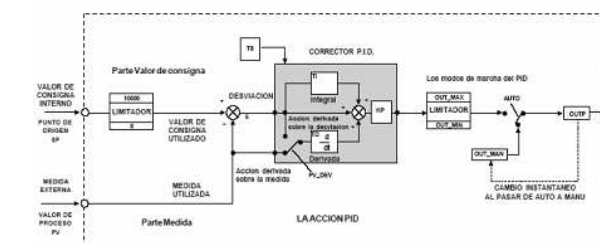


Figura 11: Descripción de la acción PID en el autómata TSX Micro[12]

indica la asignación de entradas y salidas del proceso para su conexión con el PLC.

Tabla 7: Expresiones matemáticas de la constante de integración ($1/T_i$)

Señal	Conexión al PLC
PROCESO ENCENDIDO: Interruptor	Entrada % I1.7
SENSOR S1 Sensor de bajo nivel del tanque de reserva 1	Entrada % I1.2
SENSOR S2: Sensor de nivel crítico del tanque de reserva 1,	Entrada % I1.3
SENSOR S3: Sensor de bajo nivel del tanque de reserva 2,	Entrada % I1.1
BOMBA: tensión de entrada para el variocompact, para variar el caudal de entrada al tanque esférico	Salida analógica % QW4.1
TRANSMISOR DE NIVEL	Entrada analógica % IW0.2

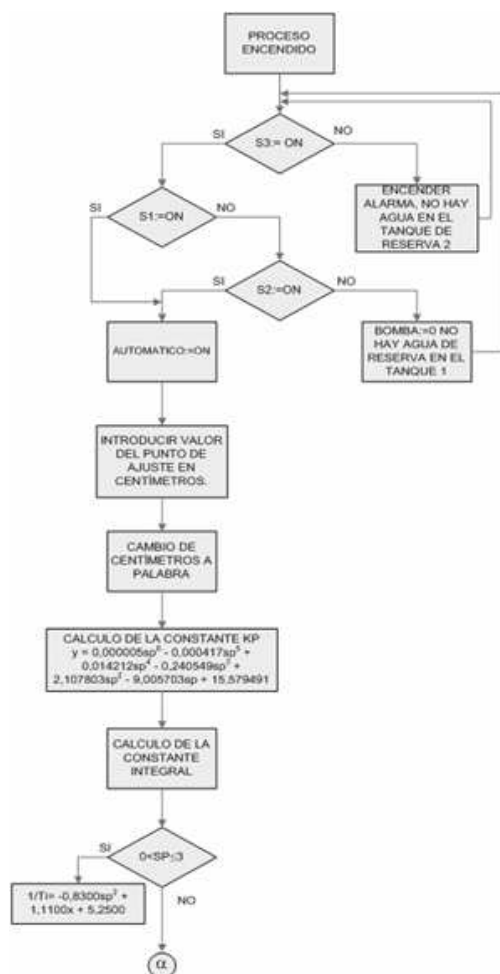


Figura 12: Diagrama de flujo del algoritmo adaptativo (parte a)

6. Resultados

Luego de realizar el algoritmo en lenguaje estructurado en el PLC se hicieron las pruebas del punto de ajuste y cálculo del error. Para los diferentes puntos de ajuste, se obtuvieron respuestas donde el controlador pudo seguir el punto de ajuste con un error máximo menor al 4 %. Debido al hecho de tener una descarga manual, cuando el nivel final sobrepasa el punto de ajuste, queda siempre un error positivo que sólo puede eliminarse abriendo más la descarga del tanque, ya que la acción de la bomba es sólo para el llenado del tanque. Para el cálculo del error se utilizó la ecuación 14, ya que es un proceso de acción inversa:

$$e\% = \frac{SP - VP}{Span} 100, \quad (18)$$

donde, VP es variable de proceso (nivel), SP: punto de ajuste, Span: rango de operación. El Span fue de 28 cm.

En la determinación del error se varió el punto de ajuste de manera que se pudiera observar para diferentes niveles la respuesta del sistema de control. En la Tabla 8 se muestra el error porcentual del punto de ajuste donde el máximo es 3,57 %. Esto indica que los resultados son aceptables, cumpliéndose con la capacidad de adaptación de los parámetros del controlador en función del punto de ajuste. En los extremos (1cm y 28 cm) el error es mayor, ya que por ser el sistema de ganancia rápida, la respuesta del controlador es limitada para lograr un caudal de entrada que mantenga el punto de regulación cuando el tanque tiene muy poco líquido ($h = 1\text{cm}$) o cuando está casi lleno (h cercano a 28 cm). En dichos extremos se observa un error negativo, pues el controlador intenta mantener una salida que genera un caudal de entrada con el cual no se sobrepase al punto de ajuste. En el resto de los puntos de ajuste se observan errores menores, el mínimo expresado en 0,00 % para dos cifras decimales significativas. Cuando el nivel está al 50 % ($h = 14\text{cm}$), el error es prácticamente cero, indicando un comportamiento adecuado para el máximo radio del tanque.

Tabla 8: Error porcentual del punto de ajuste (sp)

Valor del SP (cm)	Salida (cm)	Error (%)	Valor del SP (cm)	Salida (cm)	Error (%)
1	2,0	-3,57	15	14,5	1,78
2	2,2	-0,71	16	16,0	0,00
3	3,3	-1,07	17	16,9	0,35
4	4,0	0,00	18	17,5	-1,78
5	5,0	0,00	19	18,4	1,42
6	6,0	0,00	20	19,5	1,78
7	7,0	0,00	21	21,0	0,00
8	8,0	0,00	22	21,9	0,35
9	8,6	1,42	23	22,8	0,71
10	9,8	-0,71	24	24,0	0,00
11	11,0	0,00	25	25,0	0,00
12	11,6	1,42	26	25,9	0,35
13	12,7	1,07	27	27,0	0,00
14	14,0	0,00	28	28,9	-3,21

7. Conclusiones

Se logró identificar el proceso de llenado del tanque esférico estudiado como un sistema de ganancia rápida,

donde la variable regulada es el nivel de agua en el tanque y la variable manipulada es el caudal enviado por la bomba. Por medio de los datos experimentales de la curva de calibración, se obtuvo una representación lineal con una pendiente de 287.5 que indica la relación entre la entrada digital recibida por el PLC y los diferentes Valores de nivel del tanque medidos por el transmisor.

El caudal de entrada se fijó en el rango de 0 a 10 l/min, este caudal varía por medio de la salida de tensión enviada por el variocompact de la consigna Proporcional-Integral (PI) en el PLC. La descarga se estableció de forma manual por lo que el caudal de salida no se reguló, por lo tanto, cuando el llenado del tanque supera el punto de ajuste no es posible disminuir el nivel hasta el valor deseado. La ecuación de tendencia del comportamiento de la ganancia resultó un polinomio de sexto orden; lo que implica que el proceso del tanque esférico exhibe una característica altamente no lineal, requiriendo entonces de un controlador adaptativo.

Luego de aplicar el método de Ziegler-Nichols se obtuvo la ganancia del controlador, dando como resultado un polinomio de sexto orden, con esto se logró compensación entre la curva de ganancia del proceso y la curva de ganancia del controlador, ya que las mismas son geométricamente opuestas. Con ello se obtiene la regulación del nivel según el punto de ajuste, para todo el rango de la variable.

La variación de la constante de integración ($\frac{1}{T_i}$) en función del nivel se realizó dividiendo la curva en segmentos, obteniéndose polinomios de orden 2, 3 y 4. A partir de las ecuaciones obtenidas para la variación de la ganancia proporcional y el tiempo integral, se realizó el control del nivel mediante un algoritmo PI adaptativo de tipo programador de ganancia.

Los puntos críticos para el cálculo del error se encuentran en los extremos inmediatos del tanque con un error porcentual aproximado de 3,4 %, para el resto del proceso el error porcentual estuvo en el rango de 0,00 % – 1,78 %, con un error promedio de 0,78 %.

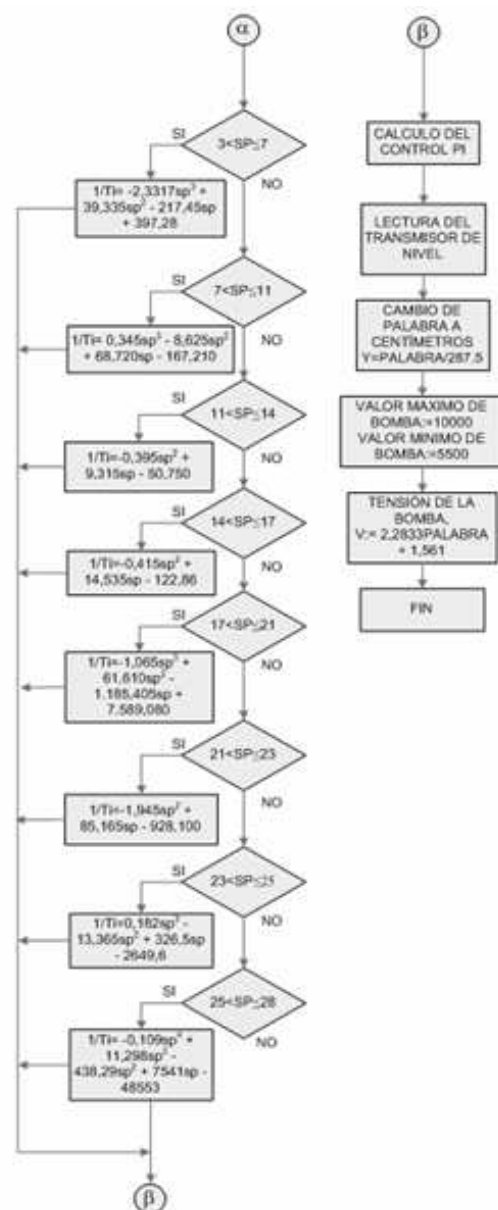


Figura 13: Diagrama de flujo del algoritmo adaptativo (parte b)

Referencias

- [1] Buio, D. y Piña, N. (1996): «Rediseño de la planta de nivel SLC-100 del Laboratorio de Control de la Universidad de Carabobo». Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Carabobo. Valencia- Venezuela.
- [2] Aström, K y Wittenmark, B. (1995): «Adaptive Control». Second edition. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. United States of America.
- [3] Fernández, Eva. (2004): «Identificación y Control adaptativo de la pérdida de carga en una columna de absorción empacada». Trabajo Especial de Grado. Post-Grado. Universidad de Carabobo. Valencia- Venezuela
- [4] Creus, Antonio. (1997): «Instrumentación Industrial». 6ta. Edición. Global Ediciones, S.A. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. México, D.F. 1997.
- [5] Corripio, Armando. (1990): «Tuning of industrial control systems». Instrument Society of America. United States of America.
- [6] De Conno, A. y Enríquez, A. (2007): «Diseño e implementación de un control adaptativo para un tanque esférico utilizando un autómata programable». Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Carabobo. Valencia- Venezuela.
- [7] «Manual de especificación técnica del transmisor diferencial presión Rosemount». Modelo: 1151 DP ALPHALINE. (s.f.)
- [8] «Manual de puesta en marcha. Tomo 3». TSX DM 37XX en español. Autómatas TSX Micro. TSX 3705/ 3708/ 3710/ 3720. 2000.
- [9] González, Napoleón. (2000): «Manual de Instrumentación Industrial». Escuela de Ingeniería. Eléctrica. Universidad de Carabobo. Valencia- Venezuela.
- [10] Wade, Harold. (1994): «Regulatory and Advanced Regulatory Control System Development». Instrument Society of America. United States of America.
- [11] Cursos Autómatas Programables. Introducción a los autómatas Programables. <http://www.cursos.femz.es/Automatas/default.htm>. Zaragoza. España. Fecha de consulta: julio 2007.
- [12] «Manual de referencia TSX Micro. Descripción detallada de las instrucciones y funciones». Descripción del software PL7. 200.