

# DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR CON GANANCIA PROGRAMABLE PARA UNA AUTOCLAVE

Luís Eduardo García Jaimes<sup>1</sup>, Maribel Arroyave Giraldo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Luís Eduardo García Jaimes. Magister en educación, Especialista en automatización Industrial. Docente Investigador, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. Medellín, Colombia. legarcia47@une.net.co

<sup>2</sup> Maribel Arroyave Giraldo. MSc(c) en Automatización y Control Industrial, Instituto Tecnológico Metropolitano. Especialista en automatización Industrial Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia. maryarri@gmail.com

## RESUMEN

En el artículo se aborda la automatización de una autoclave utilizada en el proceso de esterilización. Se diseñaron algoritmos de control para la temperatura, la presión y el nivel del agua. Para realizar el control de la misma se trabajó inicialmente con un controlador PI diseñado con el método Ciancone-Marlin y luego se planteó una solución basada en la implementación de un controlador PI con ganancia programable sintonizado con la misma técnica y utilizando ecuaciones de regresión para el cálculo de sus parámetros. El método de ganancia programable se puede considerar un control adaptativo no lineal, en el sentido que se realiza con un controlador lineal cuyos parámetros cambian en función de las condiciones de operación según una ecuación o una tabla precalculada. Los algoritmos de control fueron programados en plataforma Labview

**Palabras clave:** Autoclave, esterilización, automatización, ganancia programable.

Recibido: 5 de Octubre de 2009. Aceptado: 4 de Noviembre de 2009  
*Received: October 5, 2009. Accepted: November 4, 2009*

## DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A GAIN SCHEDULING CONTROLLER TO AN AUTOCLAVE

### ABSTRACT

*This article presents the controllers design for the operation of an autoclave used in the sterilization process. Control algorithms were estimated for temperature, pressure and the water level. To perform the control is initially worked with a PI driver designed with the Ciancone-Marlin method and then a solution based on the implementation of a PI controller with gain scheduling tuned with the same technique was raised and using regression equations for the calculation of its parameters. The gain scheduling method may be a non-linear adaptive control in the sense that performs linear controller whose parameters change depending on the conditions of operation according to an equation or a precalculated table. Control algorithms were scheduled on Labview platform.*

**Keywords:** autoclave, sterilization, automation, gain scheduling.

## 1. INTRODUCCIÓN

Una autoclave es un aparato diseñado para esterilizar alimentos y material médico o de laboratorio, utilizando vapor de agua a alta temperatura y alta presión. La autoclave diseñada funciona permitiendo la entrada de vapor de agua pero restringiendo su salida, hasta obtener una presión interna de 29.7 PSI, lo cual permite que la temperatura en el interior de ella alcance 121 °C.

Existen otras aplicaciones para las autoclaves, como en el cocimiento y esterilización de conservas y alimentos enlatados que requieren un tratamiento por encima de los 100 grados centígrados.

Para hacer más eficiente el proceso de esterilización, la autoclave se dotó de la instrumentación necesaria para controlar y monitorear las variables fundamentales que intervienen en dicho proceso: temperatura, presión y nivel de agua. Para controlar el proceso se implementaron inicialmente controladores PI de parámetros fijos diseñados por el método Ciancone-Marlin y luego se trabajó con controladores PI de ganancia programable diseñados tomando como base diferentes puntos de operación de la autoclave y el mismo método de sintonía de Ciancone-Marlin.

El método de sintonía de Ciancone-Marlin, para controladores PI y PID, se aplica a procesos con dinámica de primer orden con retardo (Sistema POR). Los parámetros para la sintonía se obtienen mediante procedimientos de optimización basados en criterios de la integral del error como el IAE o el ICE, teniendo en cuenta, entre otros aspectos, el desempeño del algoritmo de control. Los controladores obtenidos con este método muestran un mejor desempeño que los estimados utilizando el método de Ziegler Nichols y el de ganancia límite y presentan buena estabilidad, bajo sobreimpulso y velocidad de respuesta adecuada [1].

## 2. ESTERILIZACIÓN

La esterilización consiste en la destrucción o eliminación de cualquier tipo de vida microbiana de los objetos inanimados, incluyendo las formas esporuladas de hongos y bacterias. La esterilización se puede realizar utilizando agentes físicos o agentes químicos [2].

### 2.1 Agentes Físicos

Se consideran los siguientes métodos:

*Calor Seco:* Puede suministrarse por:

*Flameado:* exposición del objeto a la llama hasta la incandescencia.

*Incineración:* utilizado para esterilizar todos aquellos productos en los que no es problema su destrucción.

*Estufa:* se somete el objeto a 180°C durante aproximadamente 20 minutos.

*Calor Húmedo:* Esterilización con vapor de agua. A este grupo pertenecen:

*Esterilización en autoclave:* se trata el objeto con vapor de agua a alta temperatura y alta presión.

*Tindalización:* se somete el producto a calentamientos intermitentes entre 60 y 100°C durante 20 o 30 minutos garantizando la eliminación de las formas vegetativas.

*Radiaciones:* Se utilizan varios métodos así:

*Luz ultra violeta:* aplicada en la preparación de vacunas, cabinas de seguridad biológica y lugares de trabajo como mesas de laboratorios.

*Radiaciones ionizantes:* utilizada sobre todo para esterilizar dispositivos quirúrgicos, guantes, jeringas, etc.

### 2.2 Agentes Químicos

Estos reaccionan con gran facilidad con diferentes grupos funcionales de los ácidos nucleicos y proteínas alquilando estos radicales esenciales. Entre ellos se encuentran:

*Óxido de etileno:* es un gas que inactiva microorganismos sustituyendo átomos de hidrógeno lábiles por otros grupos como hidroxilos, carboxilos, etc.

*Glutaraldehído:* se utiliza sumergiendo el material limpio en una solución de este elemento al 2%.

*Formol o formaldehído.* Es un gas fácilmente soluble en agua que se utiliza al 40% (formalina). Se emplea en la esterilización hospitalaria y en la industria farmacéutica.

### 3. AUTOCLAVES

Una autoclave es un recipiente horizontal o vertical herméticamente cerrado que soporta altas presiones, para lograr temperaturas mayores a las que se obtienen en la ebullición [3].

Cada microorganismo tiene una temperatura de crecimiento adecuada. Hay una temperatura mínima por debajo de la cual no hay crecimiento; una *temperatura óptima* a la cual la velocidad de crecimiento es máxima. Por encima de esta temperatura óptima, la velocidad de crecimiento decae bruscamente y se produce la muerte celular.

La temperatura que debe alcanzarse dentro de la autoclave oscila entre 121°C y 131 °C con presiones entre 29.7 PSIA y 41.3 PSIA respectivamente. Para lograr un efecto esterilizante se debe mantener la presión y la temperatura mencionadas aproximadamente durante 20-30 minutos, después de este período, la autoclave debe dejarse enfriar hasta que la presión interna alcance el valor de presión atmosférica [4].

La autoclave diseñada y construida para la ejecución del proyecto tiene las siguientes especificaciones de diseño:

- Tipo de autoclave: Vertical
- Capacidad: 40 l
- Forma de la cámara: Cilíndrica
- Origen del vapor: Externo
- Flujo máximo de vapor: 44 lb/h
- Temperatura de trabajo: 130°C (Máx.)
- Presión interna: 55 PSI (Máx.)
- Presión dentro de la camisa: 120 PSI (Máx.)
- Material de construcción: Acero inoxidable
- Aislante térmico: En área caliente
- Tapa: Basculante
- Método de carga: Superior
- Vacío: Opcional

La Fig. 1 muestra el sistema de instrumentación y control con el que se dotó a la autoclave. La Fig. 2 muestra la autoclave físicamente.

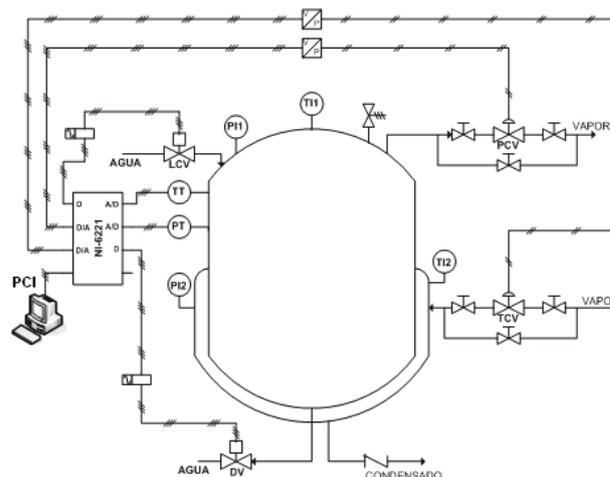


Fig. 1. Diagrama de instrumentación



Fig.2. Autoclave diseñada

#### 3.1 Parámetros programables

Para lograr un proceso óptimo de esterilización, la autoclave se dotó de un sistema de control que permite regular la temperatura, la presión y el nivel de agua dentro de la cámara.

El software de control permite la programación de los valores específicos de las variables que

intervienen en el proceso de esterilización, es decir, al inicio del ciclo se dan las especificaciones para:

- Nivel de agua en la cámara de esterilización.
- Temperatura de esterilización.
- Presión de trabajo. (El software la calcula una vez entrado el dato de temperatura)
- Tiempo de esterilización.
- Impresión de parámetros.

Cuando se ejecuta el programa de control, se visualizan en la pantalla del computador los valores deseados para la temperatura y la presión así como los valores actuales de dichas variables.

### 3.2 Secuencia de control

El ciclo completo de esterilización comprende las siguientes fases:

*Llenado automático cámara de esterilización:* con agua hasta el nivel deseado.

*Expulsión del aire de la cámara:* se realiza calentando hasta 80 °C sin presurizar la cámara pero controlando la tasa de aumento de la temperatura.

*Calentamiento:* a partir de 80° C, se realiza controlando la presión y la temperatura.

*Esterilización:* durante el tiempo programado a la temperatura seleccionada.

*Enfriamiento:* al terminar la esterilización, la autoclave se deja enfriar hasta alcanzar temperatura ambiente.

*Descarga:* salida automática del agua y del vapor de la cámara de esterilización.

*Fin del Proceso:* Aviso del fin del ciclo de esterilización.

## 4. ALGORITMOS DE CONTROL

### 4.1 Control Convencional

Se trabajó con controladores PI sintonizados con el método gráfico desarrollado por Ciancone (1993) y reportado por Marlín [5], método de sintonía utilizado para controladores PI y PID, cuando el modelo del proceso se aproxima a un sistema de primer orden con retardo (Sistema POR). Los parámetros para la sintonía se obtienen utilizando procedimientos de optimización basados en criterios de la integral del error como el IAE o el ICE, teniendo en cuenta el desempeño y la robustez del algoritmo de control y los problemas de saturación de la variable manipulada.

Sea el sistema de primer orden con retardo definido por la ecuación (1):

$$G_p(s) = \frac{K e^{-\theta' s}}{\tau s + 1} \quad (1)$$

En donde,  $K$  es la ganancia del proceso,  $\tau$  la constante de tiempo y  $\theta'$  es el retardo.

Para obtener los parámetros del controlador mediante la técnica de Ciancone -Marlín se utiliza como parámetro la relación:

$$F = \frac{\theta'}{\theta' + \tau} \quad (2)$$

A partir de la cual se estiman los valores de la ganancia  $K_c$  y del tiempo integral  $\tau_i$  del controlador, así:

$$X = K_c K \quad Y = \frac{\tau_i}{\theta' + \tau} \quad (3)$$

Para sistemas discretos se toma:

$$\theta = \theta' + \frac{T}{2} \quad (4)$$

En la tabla 1 se dan los valores de F y los correspondientes valores de X y Y que permiten obtener los parámetros del controlador:  $K_c$  y  $\tau_i$  [6], [7]

Tabla 1. Método de Ciancone-Marlín

F	PI (Perturbac.)		PI (Set-Point)	
	X	Y	X	Y
0.0	1.259	0.241	1.417	0.748
0.1	1.259	0.250	1.417	0.748
0.2	1.626	0.518	1.193	0.964
0.3	1.377	0.789	1.032	0.881
0.4	1.000	0.746	0.918	0.818
0.5	0.858	0.702	0.861	0.756
0.6	0.599	0.659	0.722	0.693
0.7	0.464	0.615	0.648	0.631
0.8	0.383	0.572	0.608	0.568
0.9	0.359	0.528	0.594	0.506
1.0	0.316	0.485	0.558	0.443

Se trabajó con un controlador PI discreto con función de transferencia dada por: [8]

$$D(z) = \frac{q_0 z + q_1}{z - 1} \quad (5)$$

En donde:

$$q_0 = K_c \left( 1 + \frac{T}{2T_i} \right) \quad q_1 = -K_c \left( 1 - \frac{T}{2T_i} \right) \quad (6)$$

Se diseñaron algoritmos de control convencional para cada variable así:

- Temperatura: control PI
- Presión: control PI
- Nivel: control on-off

#### 4.2 Control adaptivo con ganancia programable

Un controlador adaptativo es aquel que puede modificar su comportamiento en respuesta a cambios en la dinámica del proceso y en las perturbaciones.

El control adaptativo puede controlar sistemas con parámetros constantes ó sistemas con parámetros variables. La idea básica del control adaptativo es estimar on-line las variaciones de los parámetros de la planta, basándose en la medida de las señales de entrada – salida de la planta, y en el uso de los parámetros estimados.

El control por ganancia programable se refiere a un sistema donde los parámetros del controlador varían dependiendo de las condiciones de operación medidas. La variable programable puede ser el set-point, la variable controlada ó una señal externa.

La técnica de la ganancia programable es un acercamiento al control de sistemas no lineales que utiliza una familia de controladores lineales, para proporcionar el control adecuado en diversos puntos de funcionamiento del sistema. Para sintonizar el controlador se utilizan una o más variables llamadas variables a programar o variables de ajuste.

La clave para el buen diseño del control está en la selección de dichas variables pues con ellas se toma la decisión para el cambio o para el cálculo de los parámetros del controlador. Esta selección debe estar basada en el conocimiento de la dinámica del sistema [9], [10]

Una vez seleccionadas las variables, se calculan los parámetros del regulador para varios puntos de operación tomando como base a una adecuada estrategia de control. El comportamiento dinámico y

la estabilidad del sistema se deben evaluar inicialmente por simulación, debido a la complejidad propia de las no linealidades involucradas en los cambios de zonas de operación.

La literatura no documenta reglas generales para el diseño de controladores con ganancia programable. Sin embargo, se pueden establecer los siguientes pasos:

- Determinar las variables de ajuste: Estas variables deben reflejar las condiciones de operación de la planta y permitir establecer expresiones simples que relacionen los parámetros del controlador con las variables de ajuste. Esto se hace normalmente mediante la identificación física del sistema.
- Cálculo de los parámetros del controlador en diferentes zonas de operación: Se calculan los parámetros del controlador para un determinado número de condiciones de trabajo, en función de las variables de ajuste, empleando algún método de diseño apropiado. El controlador se ajusta para cada condición de operación. No existe una norma que precise el número de zonas o de puntos de operación en que debe dividirse el rango de operación de la planta, el diseñador decide al respecto.
- Determinar el valor de los parámetros del controlador para cada cambio en la variable: con los valores de los parámetros obtenidos en el paso anterior se puede obtener una ecuación de regresión que relacione los parámetros del controlador con la variable de ajuste.

Para este trabajo se tomaron como variables de ajuste la temperatura y la presión dentro de la cámara de la autoclave ya que estas dos variables determinan la dinámica del proceso y las características del proceso de esterilización.

La Fig. 3 muestra un diagrama básico de la técnica de control por ganancia programable.

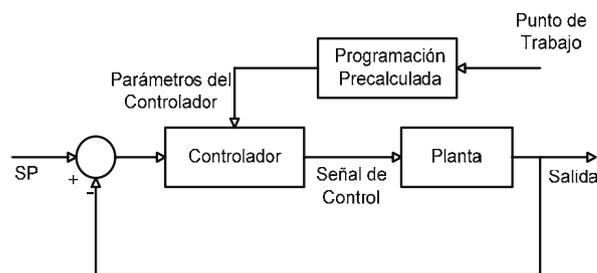


Fig. 3. Control con ganancia programable.

### 5. IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA

La identificación tiene por objeto obtener el modelo matemático de un sistema dinámico a partir de datos experimentales.

Para obtener el modelo de las plantas correspondientes a la temperatura y la presión de la autoclave en diferentes puntos de operación, se utilizó el método de la curva de reacción. Para el efecto se aplicaron varios escalones que cubrieron diferentes zonas de trabajo de la autoclave. Estos escalones tuvieron una magnitud del 5% y se aplicaron con aperturas de la válvula de entrada de vapor a la camisa de la autoclave correspondientes al 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%, 70% y 75%. El transmisor de temperatura se calibró de 0 a 200°C y el transmisor de presión se calibró de 0 a 60 PSI. Las variables se graficaron en %.

Para cada escalón se obtuvo la dinámica de la temperatura y de la presión aproximándola a un sistema de primer orden con retardo, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2. Los tiempos están en segundos.

La Fig. 4 muestra la curva de reacción del sistema ante los escalones aplicados a la válvula de control.

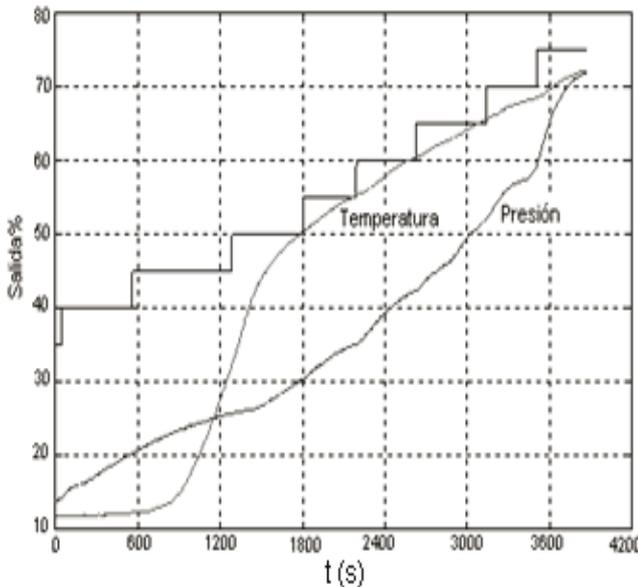


Fig. 4. Curva de reacción para diferentes zonas de operación de la autoclave

Tabla 2. Modelos para temperatura y presión

ESC	TEMPERATURA	PRESIÓN
	$G_T(S)$	$G_P(S)$
50%	$\frac{3.57e^{-32.85S}}{321.45 + 1}$	$\frac{0.94e^{-50S}}{754.35 + 1}$
55%	$\frac{0.96e^{-59.5S}}{289.95 + 1}$	$\frac{0.93e^{-37.85S}}{300S + 1}$
60%	$\frac{1.04e^{-62.55S}}{367.55 + 1}$	$\frac{1.427e^{-81.2S}}{288.75 + 1}$
65%	$\frac{1.02e^{-89.55S}}{463.25 + 1}$	$\frac{1.92e^{-107.1S}}{441.45 + 1}$
70%	$\frac{0.58e^{-50S}}{249.65 + 1}$	$\frac{1.56e^{-50S}}{356.75 + 1}$
75%	$\frac{0.704e^{-72.65S}}{206.55 + 1}$	$\frac{2.4e^{-20.75S}}{198.15 + 1}$

### 6. DISEÑO DE CONTROLADORES

#### 6.1 Controlador PI por Ciancone-Marlin

Para obtener los parámetros del controlador PI utilizando el método de Ciancone-Marlin se calculó inicialmente el parámetro de relación F ecuación (2) con los diferentes modelos obtenidos para la temperatura y la presión. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 3:

Tabla 3. Factor F

TEMPERAT (°C)	F	PRESIÓN (PSI)	F
100	0.0926	25.0	0.0621
110	0.1691	27.5	0.1119
120	0.1453	30.0	0.2195
130	0.1619	32.5	0.1952
140	0.1668	35.0	0.1229
150	0.2601	37.5	0.0946

Los valores de los parámetros X y Y para el diseño del controlador PI, obtenidos a partir de la tabla 3 y previa interpolación, para los valores de F calculados y cambios en el set-point, se dan en la tabla 4.

Tabla 4. Valores de los factores X e Y

TEMPERAT.		PRESIÓN	
X	Y	X	Y
1.417	0.748	1.417	0.748
1.2586	0.8969	1.3888	0.7737
1.3097	0.8458	1.1571	0.9436
1.2734	0.8817	1.2029	0.9539
1.2631	0.8923	1.3627	0.7974
1.0851	0.9158	1.417	0.7480

Con los datos obtenidos para X y Y se calculan los valores de  $K_c$  y  $\tau_i$  a partir de las ecuaciones 3 y 4 y con estos se estiman los parámetros del controlador PI:  $q_0$  y  $q_1$  mediante la ecuación 6. Los resultados de los controladores estimados se dan en la tabla 5. Estos controladores se simularon previamente para determinar el desempeño de los mismos en el control de la autoclave.

Tabla 5. Controladores diseñados

TEMP °C	CONTROL D(z)	PRES PSI	CONTROL D(z)
100	$\frac{0.4622z - 0.3310}{z - 1}$	25	$\frac{1.6216z - 1.3862}{z - 1}$
110	$\frac{1.4854z - 1.1212}{z - 1}$	27.5	$\frac{1.7435z - 1.2454}{z - 1}$
120	$\frac{1.4121z - 1.1024}{z - 1}$	30	$\frac{0.9128z - 0.7083}{z - 1}$
130	$\frac{1.3607z - 1.1266}{z - 1}$	32.5	$\frac{0.681z - 0.5714}{z - 1}$
140	$\frac{2.5097z - 1.8163}{z - 1}$	35	$\frac{0.9981z - 0.7523}{z - 1}$
150	$\frac{1.7958z - 1.2848}{z - 1}$	37.5	$\frac{0.7343z - 0.4419}{z - 1}$

### 6.2 Controlador por Ganancia Programable

Como se anotó anteriormente, la técnica de la ganancia programable (Gain scheduling) es un acercamiento al control de sistemas no lineales que utiliza una familia de controladores lineales, para proporcionar el control satisfactorio en diversos puntos de operación del sistema.

Para obtener la familia de reguladores, adicional a los controladores mostrados en la tabla 5, se calcularon otros controladores PI por el método de Ciancone-Marlin para nuevos valores de la temperatura y la presión y se relacionaron sus parámetros con los valores de estas variables mediante una ecuación de regresión polinomial, con el fin de evitar los inconvenientes que presenta la conmutación de un controlador a otro cuando se experimenta el cambio de una zona de trabajo a otra.

La relación entre las variables temperatura y presión dentro de la autoclave y los parámetros para los controladores encargados de regular dichas variables se definió mediante una ecuación de la forma:

$$P(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0 \quad (7)$$

En donde  $x$  es la variable de ajuste.

Se ensayaron polinomios de diferentes grados, al final el mejor ajuste de los parámetros se dio con polinomios de orden seis como se relaciona en las ecuaciones 8 a la 11.

Los datos con los cuales se ajustaron los polinomios se consignan en la tabla 6.

Tabla 6. Temperatura y Presión vs  $q_0$  y  $q_1$

°C	TEMPERATURA (T)		PRESIÓN (P)	
	$q_0$	$q_1$	PSI	$q_0$ $q_1$
30	1.1245	-0.8636		
40	1.1836	-0.8433		
50	1.2254	-0.9345		
60	1.2565	-0.9145	15	1.2854 -0.9524
70	1.1967	-0.8033	17.5	1.3478 -0.8756
80	0.9656	-0.7846	20	1.2356 -0.8247
90	0.7147	-0.5237	22.5	1.4323 -1.0548
100	0.4622	-0.3310	25	1.6216 -1.3862
110	1.4854	-1.1212	27.5	1.7435 -1.2454
120	1.4121	-1.1024	30	0.9128 -0.7083
130	1.3607	-1.1266	32.5	0.6810 -0.5714
140	2.5097	-1.8163	35	0.9918 -0.7523
150	1.7958	-1.2848	37.5	0.7343 -0.4419

Para el cálculo de los parámetros  $q_0$  y  $q_1$  del controlador PI en función de la temperatura las ecuaciones de regresión obtenidas son:

$$q_0 = -3.254 \times 10^{-11} T^3 + 1.325279 \times 10^{-8} T^2 - 2.028321 \times 10^{-6} T^4 + 1.5022187 \times 10^{-4} T^2 - 5.979538968 \times 10^{-3} T^2 + 0.13361511795 T - 0.2298511388 \quad (8)$$

$$q_1 = -7.05 \times 10^{-22} T^6 + 6.17005 \times 10^{-19} T^5 - 1.7671806 \times 10^{-16} T^4 + 2.28190322 \times 10^{-14} T^3 - 1.43626974 \times 10^{-12} T^2 + 0.424598393 T - 5.54448182 \quad (9)$$

T es la temperatura en la cámara de la autoclave en °C.

Para el cálculo de los parámetros  $q_0$  y  $q_1$  del controlador PI en función de la presión las ecuaciones de regresión obtenidas son:

$$q_0 = -3.880377 \times 10^{-12} P^3 + 5.93491479 \times 10^{-11} P^2 - 3.7814982222 \times 10^{-10} P^4 + 1.256877743534 P^2 - 22.967298601032 P^2 + 218.712948264647 P - 246.748093350635 \quad (10)$$

$$q_1 = 2.911915 \times 10^{-12} P^3 - 4.50426158 \times 10^{-11} P^2 + 2.8266832 \times 10^{-10} P^4 - 0.932701183584 P^2 + 16.818195714766 P^2 - 157.812167417182 P + 601.288041954190 \quad (11)$$

P es la presión en la cámara de la autoclave en PSI.

Una vez obtenidas las ecuaciones para el cálculo de los parámetros de los controladores de temperatura y de presión se procedió a simular el comportamiento de los mismos con el fin de verificar su desempeño y realizar, en caso necesario, los ajustes pertinentes. Los resultados que se muestran en la Fig. 5 y en la Fig. 6 respectivamente corresponden a un proceso de esterilización realizado a temperatura de 121 °C, de ellas se deduce que los controladores con ganancia programable diseñados muestran un desempeño satisfactorio, acorde con los resultados esperados.

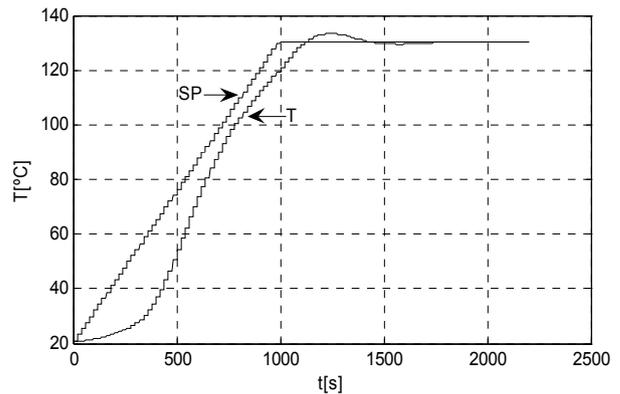


Fig. 5. Simulación de la respuesta de la temperatura con el controlador PI con ganancia programable

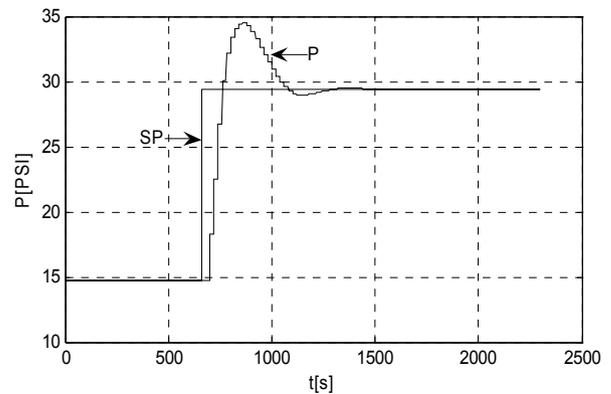


Fig. 6. Simulación de la respuesta de la presión con el controlador PI con ganancia programable

Finalmente se implementaron los controladores en la autoclave utilizando la plataforma Labview. Se probó inicialmente un controlador PI de parámetros fijos estimado para valores de temperatura de 120°C y presión de 30 PSI y luego se probó el controlador PI por ganancia programable con los parámetros  $q_0$  y  $q_1$  calculados en cada instante de muestreo con las ecuaciones de regresión estimadas y los valores actuales leídos para la temperatura y la presión. Los resultados obtenidos se muestran en las Fig. 7 y en la Fig. 8 respectivamente.

## 7. CONCLUSIONES

- El control adaptativo con el método de ganancia programable, es una buena alternativa para la regulación de procesos con

comportamiento no lineal, debido a que este actualiza de forma continua y automática sus propios parámetros de acuerdo con los cambios que experimenta la variable de ajuste.

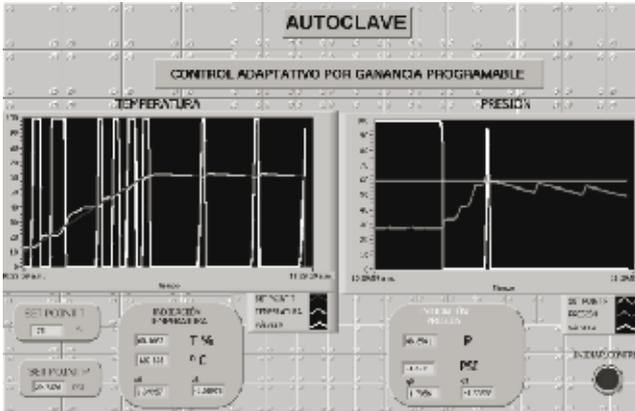


Figura 7. Respuesta con el controlador PI fijo

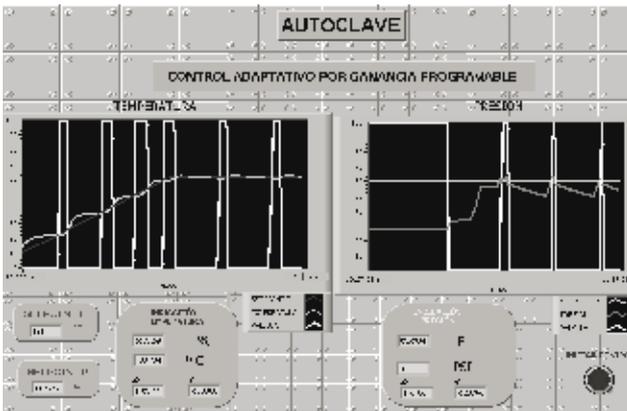


Figura 8. Respuesta con el controlador PI con ganancia programable.

- El desarrollo del proyecto permitió comprobar la congruencia entre las simulaciones realizadas y los resultados experimentales obtenidos al realizar el control de la autoclave. Esto confirma la validez del diseño propuesto para los controladores utilizados.
  - El control de las variables de temperatura y presión se logro de acuerdo a la programación de tiempos y valores realizada, con errores de estado estable mínimos y con un buen desempeño de los algoritmos de control estimados. Las pruebas de esterilización realizadas cumplen con los estándares exigidos.
  - El programa de control desarrollado en el entorno Labview, cumplió con los requisitos y especificaciones técnicas para el cual fue diseñado.
  - El paso más importante en el diseño de controladores adaptativos por ganancia programable es la identificación adecuada de la dinámica del sistema para poder obtener una ley de control que genere resultados satisfactorios.
  - El diseño del controlador con ganancia programable, a pesar de no ser muy complejo, requiere de un tiempo de desarrollo considerable pues los controladores deben ser sintonizados para varias zonas o puntos de trabajo y el comportamiento del sistema debe ser extensamente verificado mediante simulación.
  - La comparación entre el desempeño del controlador PI fijo y el controlador PI con ganancia programable permite deducir que con los dos tipos de algoritmo se logra una buena regulación del proceso: excelente velocidad de respuesta, muy buena estabilidad y error de estado estable dentro de límites muy aceptables. Sin embargo, se aprecia que el esfuerzo de control con el controlador con ganancia programable es menor que el del PI de parámetros fijos. Este indicativo puede ser un buen motivo para preferir el control adaptativo sobre el control de parámetros fijos.
- El uso de controladores con ganancia programable resulta útil como complemento a los controladores PI y PID en aquellos casos en que sea necesario aplicar diferentes controladores a una misma planta o cuando el comportamiento no lineal de la misma no admite un único controlador para una regulación satisfactoria del proceso.
  - El controlador PI con ganancias programadas presenta una respuesta que es independiente de la magnitud del cambio realizado en el punto de consigna, lo cual garantiza repetitividad en el comportamiento del sistema
  - Con este control el error de estado estable del sistema se redujo a un valor mínimo aceptable y las perturbaciones provocadas fueron corregidas satisfactoriamente.

## 8. AGRADECIMIENTOS

Los autores presentan sus agradecimientos al Politécnico Colombiano JIC y a la Universidad de Antioquia, entidades que financiaron el proyecto según el convenio CNVPOLI-UDEA 04-01-02.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Ciancone, R. Marlin, T. Tune controllers to Meet Plant Objectives. Control 1992
- [2] Black, J. Microbiology Principles and Exploration. John Wiley Son, Inc. 1999. Pp 313-33
- [3] Brownell, L.E. y Young, E.H. Process equipment design. New York, John Wiley & Sons. Pp 249-254
- [4] Clavell, L.; Pedrique de Aulacio, M. Microbiología. Manual de Métodos Generales. Facultad de Farmacia. Universidad Central de Venezuela. 1992.
- [5] Marlin, T. Process Control: designing processes and control systems for dynamic performance. McGraw Hill, Singapore. 1995.
- [6] Pao C. Chau. Process Control: A First Course with MATLAB. Cambridge University Press. 2002.
- [7] Ciancone, R and Marlin, T. Tune controllers to meet plant objectives, Control. 5, 1992. Pp 51-57.
- [8] Isermann, Rolf. Digital Control Systems. Springer-Verlag. New York 1981. Pp 74-86
- [9] Åström, K. J. and Wittenmark, B. Adaptive Control, 1989, Addison Wesley Publishing Company. Pp 343-369
- [10] Wang, M. y F. Crusca, Design and implementation of a gain scheduling controller for a level control system, ISA transactions. 41(3). 2002