



Control de temperatura de una autoclave de vapor saturado para la esterilización de instrumental quirúrgico

Temperature control of a saturated steam autoclave for sterilization of surgical equipment

Jairo Bernardo Viola-Villamizar¹, Raúl Restrepo-Agudelo², Peter Gómez³

¹Grupo de investigación en Control Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia. Orcid: 0000-0003-2739-5383.

Email: jairo.viola@upb.edu.co

²Grupo de investigación Intelec, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia. Email: raul.restrepo@upb.edu.co

³Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia. Email: Peter.gomez@upb.edu.co

Recibido: enero 20, 2018. Aceptado: febrero 14, 2018. Versión Final: abril 13, 2018.

Resumen

La esterilización de instrumental quirúrgico es una parte fundamental de muchos procedimientos médicos, ya que previene infecciones, así como la transmisión de enfermedades. El autoclave de vapor saturado es una alternativa para la realización de procedimientos de esterilización de acuerdo con los estándares médicos. Por lo tanto, es importante asegurar las condiciones adecuadas de temperatura y presión en la cámara de esterilización del autoclave, para realizar un adecuado proceso de esterilización. Sin embargo, el comportamiento dinámico de un autoclave suele ser complejo, por lo que se requiere emplear estrategias de control para realizar el proceso de esterilización. Este artículo presenta la identificación y control de temperatura de un autoclave de vapor saturado para la esterilización de instrumental quirúrgico, empleando la técnica de asignación de polos. Inicialmente, se captura la información del comportamiento de la temperatura del autoclave empleando un sistema de adquisición de datos. Luego, se obtiene un modelo linealizado del sistema. Posteriormente, a partir del modelo linealizado se realiza la sintonización de los controladores PI y PID para alcanzar las especificaciones de operación deseada en lazo cerrado. Los controladores fueron validados en Simulink para las condiciones de temperatura del autoclave en presencia de perturbaciones externas y ruido aleatorio en el lazo de realimentación. Los resultados obtenidos mostraron que el controlador PID tiene un mejor desempeño para controlar la temperatura del autoclave en presencia de perturbaciones externas.

Palabras clave: autoclave de vapor saturado; identificación de sistemas; control PID.

Abstract

Surgery equipment sterilization is an important part of many serious medical procedures since it prevents infections and disease transmission. The saturated steam autoclave may be used to carry out the sterilization process according to the required medical standards. For this, certain temperature and pressure conditions must be granted in the sterilization chamber of the autoclave to perform an accurate sterilization process. However, the dynamical behavior of an autoclave tends to be complex, requiring the use of control strategies to perform a correct sterilization process. This paper presents the identification and temperature control of a saturated steam autoclave for the sterilization equipment employing the pole placement technique. Initially, temperature data of autoclave was acquired using a data acquisition system. Then, a linear model of the autoclave was obtained. Using the linear model, a PI and PID controllers were tuned to achieve the desired closed loop specifications. Controllers were validated in Simulink for the temperature

conditions of the autoclave in presence of external disturbance and random noise in the feedback loop. Results show that the PID controller has a good performance on the autoclave temperature regulation in presence of external disturbances.

Keywords: saturated steam sterilization autoclave; system identification; PID control.

1. Introducción

Un autoclave es un dispositivo metálico con una cámara de cierre hermético que se utiliza para realizar procesos de esterilización empleando vapor de agua a alta presión. Principalmente son empleados en la industria médica para la esterilización de instrumentos quirúrgicos [1][2]. Sin embargo, los autoclaves también son utilizados en la industria de alimentos [3], cemento [4] o en la fabricación de semiconductores [5].

En el caso de un autoclave de esterilización médica, es fundamental asegurar las condiciones de temperatura y presión para garantizar la correcta esterilización de los instrumentos quirúrgicos. Esto se debe a que la presencia de agentes bacterianos en los instrumentos quirúrgicos puede generar patologías infecciosas en los pacientes sobre los cuales se usen dichos implementos.

En la industria, el controlador PID es el más utilizado debido a la simplicidad en su diseño e implementación [6], [7]. En el caso de los autoclaves, el uso de controladores PID no es la excepción. Sin embargo, la sintonización del controlador PID de un autoclave se suele realizar manualmente debido al comportamiento dinámico variable del sistema, lo que implica un mayor consumo de energía, así como una mayor duración del tiempo de esterilización. Adicionalmente, son pocos los casos registrados en la literatura donde se utilizan estrategias de control para regular el funcionamiento del autoclave [8].

En este artículo, se plantea el control de temperatura de un autoclave de vapor saturado empleado en la esterilización de instrumentos quirúrgicos, empleando controladores PI y PID sintonizado, mediante la técnica de asignación de polos.

Inicialmente, se describe la técnica de asignación de polos para la sintonización de controladores PI y PID. Después, se presenta el caso de estudio el cual corresponde a un autoclave de esterilización médica de 150 litros de la empresa Stericlinic S. A. S. Luego, se realiza la adquisición de datos de la temperatura absoluta del autoclave, y se obtiene un modelo linealizado del sistema. A partir del modelo linealizado, se realiza el diseño de los controladores PI y PID, mediante la técnica de asignación de polos. Posteriormente se valida el comportamiento de los controladores empleando

Simulink, teniendo en cuenta como índices de desempeño el valor cuadrático medio (ISE) para la respuesta temporal del sistema, y el valor cuadrático medio (RMS), para la acción de control.

El artículo se estructura de la siguiente manera. En primer lugar, se presenta la técnica de asignación de polos para controladores PI y PID. Luego se presenta la adquisición de datos y la identificación de un modelo linealizado del sistema. Después se sintonizan los controladores PI y PID y su validación empleando Simulink. Finalmente se presentan los resultados obtenidos y las conclusiones.

2. Técnica de asignación de polos

De acuerdo con [9], la técnica de asignación de polos busca la obtención de un sistema en lazo cerrado con un conjunto de polos deseados, a partir de un modelo de primer o de segundo orden del sistema a controlar.

Para la aplicación de esta técnica de diseño, inicialmente las condiciones deseadas del sistema en lazo cerrado son definidas, las cuales establecen el comportamiento dinámico del sistema en estado transitorio y en estado estacionario. Estas condiciones están dadas en términos del factor de amortiguamiento ζ , la frecuencia natural del sistema w_n , el tiempo de establecimiento t_s y el error de estado estacionario. Luego, se selecciona un controlador tipo PI o PID, cuya ecuación característica en conjunto con la planta en lazo cerrado está dada por (1).

$$1 + G_c(s)G_p(s) = 0 \quad (1)$$

Donde G_c es la función de transferencia del controlador, y G_p , la función de transferencia del sistema. Posteriormente se establece el polinomio característico deseado del sistema en términos de las especificaciones de desempeño en estado transitorio y estado estacionario, como se da en (2). Finalmente, se comparan los coeficientes de (1) y (2), para encontrar los parámetros del controlador PI o PID.

$$(s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2) = 0 \quad (2)$$

De esta forma, aplicando la metodología de asignación de polos a un sistema de segundo orden con polos reales, dado por (3) y un controlador PID definido en (4):

$$G_p(s) = \frac{k_p}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (3)$$

$$PID(s) = k \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (4)$$

Aplicando (1), la ecuación característica del sistema en lazo cerrado está dada por (5).

$$s^3 + \left(\frac{1}{\tau_i} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{k_p k \tau_d}{\tau_1 \tau_2} \right) s^2 + \left(\frac{1}{\tau_i \tau_2} + \frac{k_p k}{\tau_1 \tau_2} \right) s + \frac{k_p k}{\tau_1 \tau_2 \tau_i} = 0 \quad (5)$$

Como se puede observar, la ecuación característica en lazo cerrado del sistema corresponde a un polinomio de tercer orden. Por lo tanto, la ecuación característica deseada planteada en (2) se modifica como se muestra en (6).

$$(s + \alpha w_n)(s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2) = 0 \quad (6)$$

Donde αw_n es un polo no dominante del sistema localizado 5 o 10 veces más alejado con respecto a los polos dominantes del sistema. Igualando (5) y (6), las constantes para el controlador PID en conjunto con un sistema de segundo orden con polos reales están dados por (7).

$$k = \frac{\tau_1 \tau_2 w_n^2 (1 + 2\alpha\zeta) - 1}{k_p}$$

$$\tau_i = \frac{\tau_1 \tau_2 w_n^2 (1 + 2\alpha\zeta) - 1}{\tau_1 \tau_2 \alpha w_n^3} \quad (7)$$

$$\tau_d = \frac{\tau_1 \tau_2 w_n (\alpha + 2\zeta) - \tau_1 - \tau_2}{\tau_1 \tau_2 w_n^2 (1 + 2\alpha\zeta) - 1}$$

Para el caso de un controlador PI descrito en (8), en conjunto con el sistema de segundo orden con polos reales (2).

$$PI(s) = k \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \quad (8)$$

La ecuación característica en lazo cerrado estará dada por (9).

$$s^3 + \left(\frac{1}{\tau_i} + \frac{1}{\tau_2} \right) s^2 + \frac{1 + k_p k}{\tau_1 \tau_2} s + \frac{k_p k}{\tau_1 \tau_2 \tau_i} = 0 \quad (9)$$

Cabe resaltar que la ecuación característica en lazo cerrado para el controlador PI también corresponde a un polinomio de tercer orden; por lo tanto la ecuación

característica deseada empleada será (6). Considerando que el controlador PI solamente cuenta con dos parámetros sintonizables, un valor w_n debe ser escogido, el cual está dado por (10).

$$w_n = \frac{\tau_1 + \tau_2}{(\alpha + 2\zeta) \tau_1 \tau_2} \quad (10)$$

Despejando (6) y (9), las constantes del controlador PI por asignación de polos estarán dadas por (11).

$$k = \frac{\tau_1 \tau_2 w_n^2 (1 + 2\alpha\zeta) - 1}{k_p} \quad \tau_i = \frac{k_p k}{\tau_1 \tau_2 \alpha w_n^3} \quad (11)$$

3. Autoclave de vapor saturado para esterilización

En este artículo, el proceso que se va a controlar corresponde a un autoclave de vapor saturado de 150 litros de la empresa Stericlinic S. A. S, presentado en la figura 1. Este autoclave tiene una temperatura máxima de operación de 120 °C, y una presión máxima de 40 PSI dentro de la cámara de esterilización.



Figura 1. Autoclave de esterilización de 150 litros de la empresa Stericlinic S. A. S. **Fuente:** Stericlinic S. A. S.

3.1. Identificación del autoclave de esterilización

Considerando que un autoclave presenta un comportamiento dinámico diferente para cada punto de operación, el proceso de identificación se realizó alrededor del punto de operación $(\bar{P}, \bar{T}) = (40 \text{ psi} / 120 \text{ }^\circ\text{C})$, el cual corresponde a las condiciones críticas durante el proceso de esterilización. Como datos de

entrada se consideró una presión constante de 40 *PSI* y como salida se capturaron las variaciones en la temperatura de la cámara de esterilización.

Para llevar a cabo la adquisición de datos de la autoclave, se empleó una termocupla RTD-PT100 como sensor de temperatura, una tarjeta de adquisición de datos NI DAQ 6008 y la herramienta de identificación de Matlab.

Dos conjuntos de datos fueron capturados, uno para realizar el proceso de identificación y otro para validar el modelo identificado. En la figura 2 se presentan los datos de identificación y validación del autoclave alrededor del punto de operación $(\bar{P}, \bar{T}) = (40 \text{ psi} / 120 \text{ }^\circ\text{C})$.

A partir de los datos capturados, el proceso de identificación es desarrollado empleando la herramienta de identificación de Matlab, obteniendo como resultado un modelo de segundo orden con polos reales dado por (12) con un ajuste del 92.23 %.

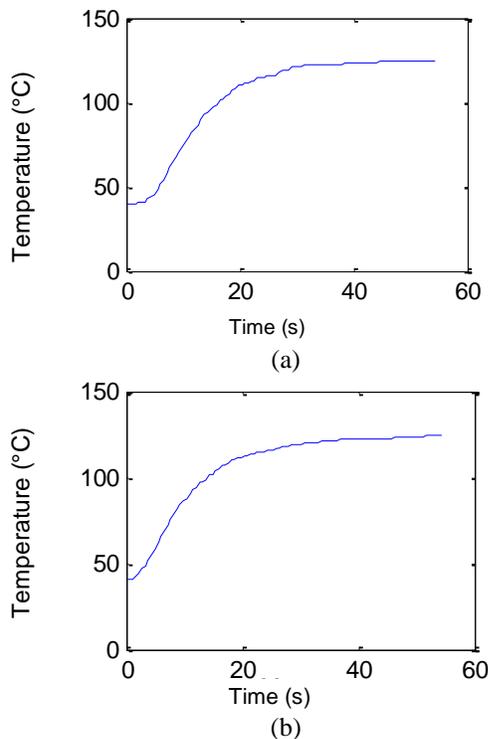


Figura 2. Conjunto de datos de (a) identificación y (b) validación de la autoclave. **Fuente:** elaboración propia.

$$P(s) = \frac{2.087}{(2.6s + 1)(5.46s + 1)} \quad (12)$$

4. Diseño de los controladores PI y PID

La tabla 1 presenta los parámetros obtenidos para los controladores PI y PID sintonizados mediante la técnica de asignación de polos. Como especificaciones de diseño deseadas se utilizó un tiempo de establecimiento de 50 s, que el sistema no tenga sobreimpulso o $\zeta = 1$ y un polo no dominante ubicado en $a = 5$.

Tabla 1. Parámetros obtenidos para los controladores PI y PID.

Controlador	k_p	k_i	k_d
PI	0,14	0,02	0
PID	1,06	0,06	5,37

En la figura 3 se presenta la respuesta en el dominio del tiempo y la acción de control de los controladores PI y PID sintonizados mediante la técnica de asignación de polos. Como se puede observar, el controlador PID tiene una mejor respuesta en el dominio del tiempo con respecto al controlador PI, ya que este alcanza el tiempo de establecimiento deseado más rápido y sin sobreimpulso. Con respecto a la acción de control, se observa que el controlador PI tiene un menor esfuerzo de control, el cual también es más suave con respecto al producido por el controlador PID.

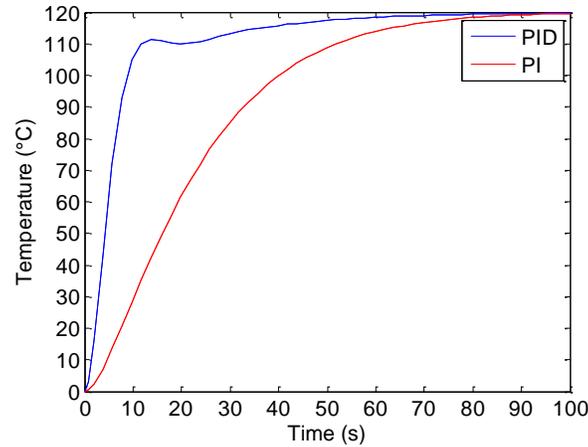
5. Análisis de robustez

Para evaluar la robustez de los controladores PI y PID sintonizados por la técnica de asignación de polos, la respuesta temporal del sistema y la acción de control son probadas en presencia de perturbaciones externas y ruido aleatorio en el lazo de realimentación. Como índices de desempeño, se empleó la integral del error cuadrático medio (ISE) para la respuesta temporal del sistema y el valor cuadrático medio (RMS) para la acción de control.

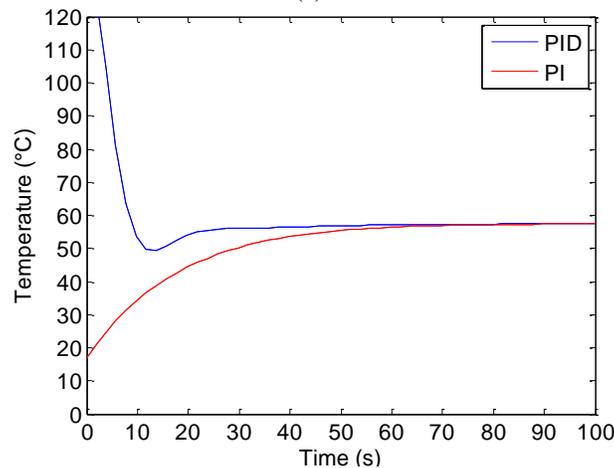
La tabla 2 presenta los índices de desempeño obtenidos para los controladores PI y PID sintonizados por la técnica de asignación de polos en presencia de perturbaciones externas. Como se puede observar, el controlador PID tiene un menor valor ISE, lo que significa que tiene un menor error de posición, y alcanza las condiciones de temperatura deseadas más rápido con

respecto al controlador PI. Para la acción de control, se observa que el controlador PID presenta un mayor valor RMS con respecto al controlador PI. Esto indica que el controlador PID tiene un mayor consumo de energía,

pero es afectado en menor medida por la presencia de perturbaciones externas como perturbaciones externas y ruido aleatorio en el lazo de realimentación.



(a)



(b)

Figura 3. Control de temperatura del autoclave (a); respuesta temporal (b) acción de control. **Fuente:** elaboración propia.

Tabla 2. Índices de desempeño ante la presencia de perturbaciones externas de los controladores PI y PID

Controlador	nominal		ruido		Perturbación	
	ISE	RMS	ISE	RMS	ISE	RMS
PI	64,16	47,54	95,2	53,71	186,81	132,65
PID	53,68	76,67	80,4	84,7	96,48	190,91

6. Conclusiones

Este artículo presentó el control de temperatura de un autoclave de esterilización médica utilizando controladores PI y PID sintonizados mediante la técnica

de asignación de polos. Como resultado del proceso de identificación del autoclave, se obtuvo un modelo de segundo orden con polos reales para una presión de 40 PSI y una temperatura de 120 °C dentro de la cámara de esterilización. A partir de los resultados obtenidos, el controlador PID sintonizado empleando la técnica de asignación de polos presenta un mejor desempeño en lazo cerrado de la respuesta temporal, ya que cumple con las especificaciones deseadas de tiempo de establecimiento y sobreimpulso, con un menor valor ISE. Por otra parte, se observa que, aunque el controlador PI sintonizado empleando la técnica de asignación de polos no cumpla exactamente con las especificaciones deseadas de tiempo de establecimiento y sobreimpulso, el controlador

presenta una menor acción de control, reflejado en un menor valor RMS. Con respecto al análisis de robustez, el controlador PID mostró una mejor respuesta ante la presencia de perturbaciones externas con respecto al controlador PI, reflejado en un menor valor ISE para cada una de las perturbaciones evaluadas.

Referencias

- [1] Cho H S, Tao G D and Winter A "Achieving appropriate design for developing world health care: The case of a low-cost autoclave for primary health clinics" 2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, San Diego, CA, USA 2012.
- [2] Huijs J 2014 "Facing the standards gap: an autoclave for the rest of us" Appropriate Healthcare Technologies for Low Resource Settings. Londres, UK, 2014.
- [3] Thomas M M, Kardos J L and Joseph B "Shrinking horizon model predictive control applied to autoclave curing of composite laminate materials" American Control Conference, Baltimore, MD, USA, 1994.
- [4] Jiang Y and Wu R "Mixed with lime powder on the performance test of autoclaved concrete". Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), Hohhot, China 2011.
- [5] Li Y and Fu G. "The influence of autoclave on plastic encapsulated microcircuit". Prognostics and System Health Management Conference, Zhangjiajie, China, 2014.
- [6] F. Valencia, C. Mejía, V. Erazo, "Desarrollo de una prótesis de rodilla para amputaciones transfemorales usando herramientas computacionales," *Rev. UIS Ing.*, vol. 16, no. 2, pp. 23-34, 2017. Doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v16n2-2017002>
- [7] J. Fuentes, S. Castro, B. Medina, F. Moreno, S. Sepúlveda, "Experimentación de controladores digitales clásicos en un sistema embebido aplicado en un proceso térmico," *Rev. UIS Ing.*, vol. 17, no. 1, pp. 81-92, 2018. Doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018008>
- [8] Dufour P, Tour Y, Michaud D J and Dhurjati P S "Optimal trajectory determination and tracking of an autoclave curing process: A model based approach". European Control Conference, Karlsruhe, Germany ,1999.
- [9] Aström K J and Hägglund T *Control PID avanzado*, 2^{da} ed, Madrid, España: Pearson Prentice Hall, 2009.