

# Jornadas de Automática

## Método práctico para la estimación de parámetros en un intercambiador de calor

Satué, M.G.<sup>a,\*</sup>, Schiavo, M.<sup>b</sup>, Ortega, M.G.<sup>a</sup>, Beschi, M.<sup>b</sup>, Visioli, A.<sup>b</sup>, Arahal, M.R.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Systems Engineering and Automation Department, University of Seville, 41092 Seville, Spain (e-mail: {mgarrido16,mortega,arahal}@us.es)

<sup>b</sup>Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale, University of Brescia, Italy (e-mail: {michele.schiavo, manuel.beschi, antonio.visioli}@unibs.it)

**To cite this article:** Satué, M.G., Schiavo, M., Ortega, M.G., Beschi, M., Visioli, A., Arahal, M.R. 2024. Método práctico para la estimación de parámetros en un intercambiador de calor. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10746>

### Resumen

En este trabajo se presentan resultados preliminares de un método práctico de identificación para su uso en laboratorio o en industria. La propuesta viene motivada por la necesidad de obtener los parámetros de un modelo de intercambiador a partir de mediciones de campo. El trabajo se centra en cierto equipo que es parte de una planta de almacenamiento de energía en construcción. El intercambiador considerado usa agua como fluido secundario para enfriar el aire comprimido a la salida de un compresor industrial. El principal reto para la identificación es que la mayoría de variables no son modificables a voluntad debido a las características de la planta. Esto impide el uso de técnicas como la respuesta a escalón. Por otro lado, durante el uso normal del equipo, algunas variables están fuertemente correlacionadas, dificultando el uso de técnicas basadas en datos. La propuesta emplea una construcción poco invasiva para sortear los citados obstáculos mediante la introducción de señales en rampa en una de las principales variables.

**Palabras clave:** Control de calor y transferencia de masa, identificación de sistemas LPV, identificación de sistemas no lineales, Sistemas con retardos.

### Practical method for the parameter estimation of a heat exchanger

#### Abstract

This work presents preliminary results from a practical identification method for use in laboratory or industrial environments. The proposal is motivated by the need to estimate the parameters of a heat exchanger from data. The work is concerned with a particular subsystem of a energy storage plant. The heat exchanger uses water as secondary fluid to cool compressed air. The main challenge for the identification is that most variables cannot be manipulated. This negates the use of techniques such as step response. Also, some variables are heavily correlated during normal use, difficulting the adoption of data-based techniques. The proposal uses an auxiliary construction to inject ramp signals into one of the main variables.

**Keywords:** Control of heat and mass transfer systems, LPV system identification, Nonlinear system identification, Systems with time-delays.

## 1. Introducción

Los intercambiadores de calor usados a la salida de compresores de aire (AHX) son necesarios en muchas aplicaciones pues la compresión genera mucho calor. El fluido secundario puede ser agua la cual se calienta robando calor al aire comprimido.

El problema de control en estos casos suele utilizar el caudal del fluido secundario como variable manipulable para conseguir que el aire se enfríe lo suficiente sin superar ciertos límites en la temperatura del agua a la salida.

El flujo másico de aire ( $mf_1$ ) y su temperatura ( $T_{1i}$ ) son perturbaciones para el sistema de control. La temperatura del agua a la entrada del AHX ( $T_{2i}$ ) también constituye una per-

turbación. El problema de control tiene ciertas características que se comentan a continuación.

- Dependencia de los flujos. Los tiempos de residencia varían con los flujos, lo cual produce valores dependientes del punto de operación que afectan a los retardos y a la característica estática.
- Comportamiento no lineal. Ésta procede tanto de elementos auxiliares como válvulas y bombas, como de coeficientes de transferencia de calor que dependen de temperatura y flujo.
- Identificación. Algunos parámetros como los coeficientes de transferencia de calor son de difícil medida por lo que se han de identificar.

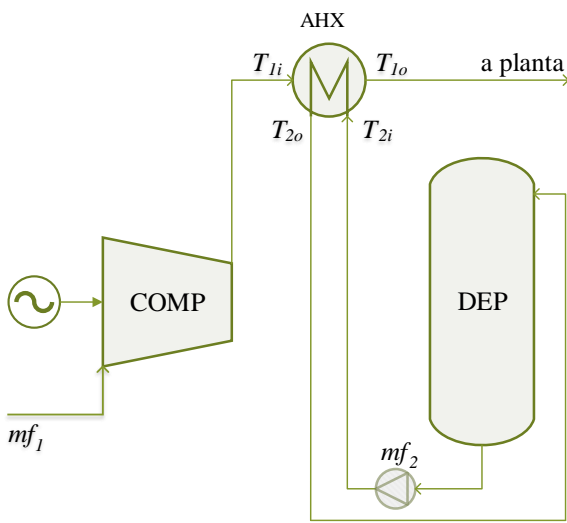


Figura 1: Diagrama del subsistema formado por el compresor de aire (COMP), el intercambiador de calor (AHX) y el depósito de fluido secundario (DEP).

A modo de estado del arte se pueden citar trabajos de modelado que sirven para el desarrollo de controladores (Alsop and Edgar, 1989), incluyendo algunos aspectos característicos como la posible existencia de resonancias (Álvarez et al., 2007). Los modelos basados en primeros principios incluyen coeficientes cuya determinación constituye una línea importante de trabajo (Salimpour, 2009). Los modelos de caja negra también han sido usado en este contexto (Gupta et al., 2018; Sanz Bermejo et al., 2023), así como combinaciones con los anteriores, dando lugar a modelos de caja gris (Casteleiro-Roca et al., 2019; Rodríguez et al., 2010).

En lo que respecta al control, las reglas de sintonía para PID tienen la ventaja de proporcionar soluciones de control con poca inversión en pruebas (Pekar, 2020; Skogestad, 2001; Sanchis and Peñarrocha-Alós, 2022). Sin embargo, para ciertas aplicaciones es conveniente contar con modelos más preciso. Éste es el caso del control jerárquico en el que el control PID de bajo nivel recibe consignas de un bloque de alto nivel. Este bloque de alto nivel necesita conocer ciertos aspectos para producir políticas de gestión correctas.

Otra línea interesante la componen las estrategias de control robusto. En este caso las incertidumbres del modelo se

tratan en el diseño del controlador que debe realizar su tarea sin necesidad de resintonización. En el trabajo de (Oravec et al., 2018) se presenta un control predictivo robusto valorado por simulación. El trabajo de (Vasičkaninová et al., 2018) presenta técnicas  $H_\infty$  y  $H_2$  para un equipo de laboratorio. La técnica de iso-amortiguamiento de (Beschi et al., 2016, 2017) ha sido usada para obtener invariancia en el margen de fase de controladores PID de orden fraccional.

En lo tocante a la identificación, existen en la literatura gran cantidad de trabajos donde se proponen distintas estrategias que van desde la identificación paramétrica habitual (Piotrowska and Chochowski, 2012), modelos con no-linealidades concentradas (Srinivasan and Lakshmi, 2008) hasta modelos no lineales de aplicación general como borrosos y neuronales. Este trabajo pretende no desviarse de modelos tradicionales por necesidades del proyecto en el que se encuadra. En este sentido existen todavía novedades que aparecen en el campo no ligadas al uso de control inteligente como por ejemplo (Al Hadad et al., 2016).

## 2. Materiales y métodos

La propuesta se va a utilizar para caracterizar un AHX conectado a un compresor de aire usando agua para la refrigeración. Estos elementos forman un subsistema de una instalación mayor en la que el aire comprimido es almacenado y después turbinado. El esquema simplificado del subsistema se presenta en la figura 1.

El agua caliente que sale del AHX es almacenada en el bloque marcado (DEP) para su uso en otros procesos auxiliares. Los cambios en las condiciones de operación del compresor serán poco frecuentes y relativamente suaves. El agua para enfriado proviene de un depósito. Al principio del día cabe considerar que el agua está a temperatura ambiente (unos 293 K). Durante la operación de la planta la temperatura sube lentamente.

Por todo lo anterior, y a efectos de obtener datos para identificar modelos dinámicos del AHX, conviene tener en cuenta las siguientes hipótesis:

- No es factible realizar ensayos en escalón en  $mf_1$ . Esto es debido tanto a la dinámica del compresor como a las condiciones de operación del resto de la planta.
- La variable  $T_{1i}$  está fijada fundamentalmente por  $mf_1$  por lo que tampoco se puede someter a ensayos en escalón.
- La variable  $T_{2i}$  puede modificarse mediante la introducción de elementos adicionales en la instalación. De este modo se podrá excitar la dinámica para realizar la identificación.
- La variable  $mf_2$  puede modificarse siguiendo rampas según especificaciones del variador de velocidad del motor de la bomba de agua.

### 2.1. Intercambiador de calor

El AHX es de tubo concéntrico en el cual el aire circula por el interior y el agua por la corona. Los flujos siguen un recorrido espacial opuesto (en contracorriente) para mejorar el

intercambio de calor. Las características del AHX considerado en los ensayos se indican en la tabla 1. Por otro lado, los valores nominales para las variables se indican en la tabla 2.

La cantidad de calor retirada por el agua en el AHX se nomina  $\dot{Q}$  y viene dada por la expresión

$$\dot{Q}(t) = \varepsilon(t) \cdot \dot{Q}_M(t) \quad (1)$$

siendo  $\dot{Q}_M$  la potencia teórica máxima para el intercambiador. Ésta puede calcularse como

$$\dot{Q}_M(t) = C_m(t) \cdot (T_{1i} - T_{2i}(t)), \quad (2)$$

siendo  $\varepsilon$  una medida de la eficacia del intercambiador, la cual puede expresarse en función del número de unidades de transferencia ( $NTU = UA/C_m$ ) del siguiente modo (London et al., 1941):

$$\varepsilon(t) = \frac{1 - e^{-NTU(t) \cdot (1 - C_r(t))}}{1 - C_r(t) \cdot e^{-NTU(t) \cdot (1 - C_r(t))}}, \quad (3)$$

siendo  $C_r = C_m/C_M$  el cociente entre las capacidades extremas dependientes de los flujos y que se calculan como:

$$C_m(t) = \min(m_{f1} \cdot c_{p1}, m_{f2}(t) \cdot c_{p2}), \quad (4)$$

$$C_M(t) = \max(m_{f1} \cdot c_{p1}, m_{f2}(t) \cdot c_{p2}). \quad (5)$$

Tabla 1: Parámetros del subsistema AHX

Parámetro	Valor	Unidad
Calor específico aire, $c_{p1}$	1018	J/(kg K)
Calor específico agua, $c_{p2}$	4186	J/(kg K)
Coefficiente de transferencia, $UA$	150	W/K
Flujo máximo bomba, $m_{f2M}$	0.5556	kg/s

Tabla 2: Condiciones nominales subsistema AHX

Variable	Valor nominal	Unidad
Flujo 1ario, $m_{f1}$	0.1004	kg/s
Flujo 2ario, $m_{f2}$	0.0807	kg/s
Temperatura 1ario, $T_{1i}$	453	K
Temperatura 2ario, $T_{2i}$	293	K
Consigna 1ario, $T_{1o}^*$	338	K

## 2.2. Inyector de caudal frío

El inyector de caudal frío es un elemento físico adicional que se propone para obtener variaciones en  $T_{2i}$ . Se compone de los elementos que se muestran en la figura 2.

El conjunto consiste en un depósito adicional (depósito B) con agua enfriada a unos 278 K y una valvulería especial. Como puede verse, dos de las válvulas están acopladas como indica la línea discontinua. Este acoplamiento permite mover los servo-motores de cada válvula de forma que el flujo total  $m_{f2} = m_{fA} + m_{fB}$  es aproximadamente constante. En la práctica habrá pequeñas variaciones de flujo pues la pérdida de carga total no es la misma para todas las posiciones de las válvulas acopladas. En todo caso la variación es pequeña siempre y cuando no se cambie el estado de la bomba de impulsión (velocidad  $\omega$ ). Cabe indicar que el sistema de control de flujo de la bomba principal contraactuaría esta variación,

pero su constante de tiempo es relativamente alta por lo que no eliminaría la perturbación.

Los cambios en los flujos  $m_{fA}$  y  $m_{fB}$  están regidos por la característica no lineal de las válvulas empleadas y por los motores para actuar sobre ellas. Además, la construcción no es simétrica. En particular el flujo  $m_{fA}$  es normalmente mayor a  $m_{fB}$  pues el depósito B es mucho menor que el A dado que es una construcción auxiliar con un coste permitido mucho menor. Esto puede apreciarse en la figura 4 donde se muestra la dependencia de los flujos con respecto a un parámetro  $\beta$  que indica la mezcla realizada. Cuando  $\beta = 1$  toda el agua procede del depósito normal (depósito A) mientras que para  $\beta = 0$  se introduce el máximo flujo posible de agua fría procedente del depósito B.

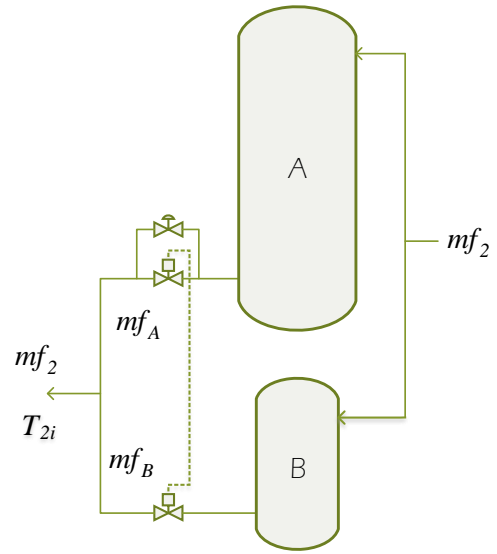


Figura 2: Diagrama del inyector de caudal frío.

La variación en  $T_{2i}$  se consigue realizando a voluntad inyecciones de caudal frío. Durante un experimento de inyección de caudal frío se activan las válvulas conectadas, manteniendo la otra en una apertura constante. De esta manera se consigue un cambio en el parámetro  $\beta$  como muestra la figura 3.

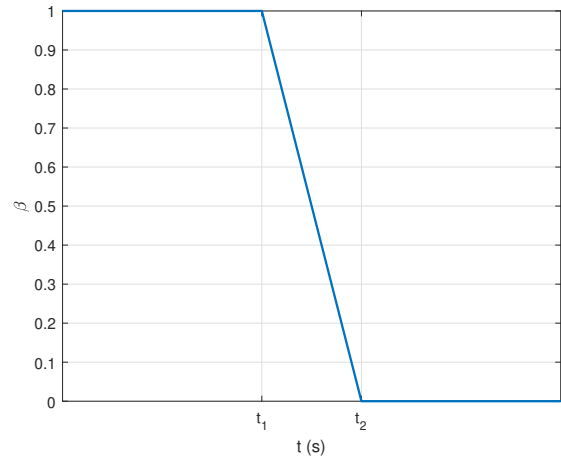


Figura 3: Evolución de la ratio de mezcla  $\beta$  en función del tiempo (t) en un experimento de inyección de caudal frío.

Nótese que, para valores  $0 < \beta < 1$  se produce una mezcla de flujos de agua, de forma que la temperatura de la mezcla  $T_{AB}$  se obtiene a partir de los flujos instantáneos mediante

$$T_{AB} = \frac{mf_A \cdot T_A + mf_B \cdot T_B}{mf_A + mf_B}. \quad (6)$$

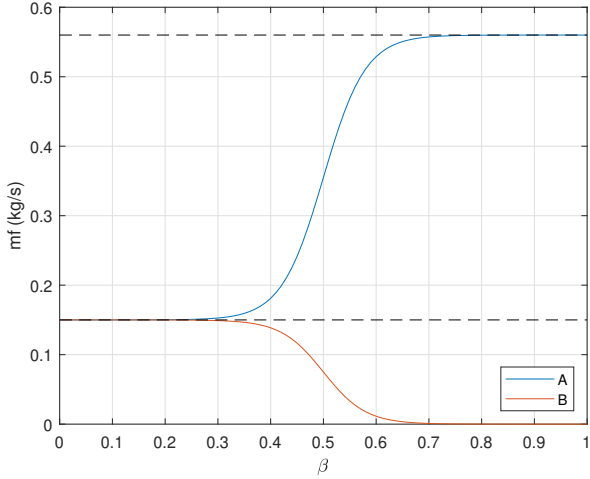


Figura 4: Evolución de los flujos en función del parámetro  $\beta$ .

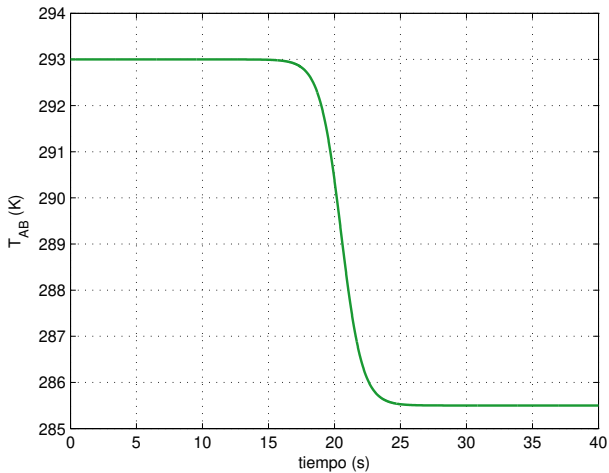


Figura 5: Trayectoria de la temperatura del agua a la entrada del AHX durante un proceso de inyección de caudal frío.

El agua de mezcla es usada como agua de entrada al intercambiador, por lo que  $T_{2i} = T_{AB}$ . El objetivo perseguido es conseguir una variación brusca de  $T_{2i}$  que excite al subsistema para su identificación. Por ello interesa pasar a  $\beta = 1$  de la manera más rápida posible. Esto se consigue activando las válvulas a tope. Por las características del actuador se puede conseguir la evolución de la figura 3 donde  $t_2 - t_1$  es del orden de 10 segundos. En estas condiciones se consiguen los caudales que muestra la figura 4. Finalmente, la trayectoria de  $T_{2i}$  experimenta un cambio dinámico similar a una rampa suavizada como se muestra en la figura 5.

### 2.3. Modelo y su identificación

El modelo considerado consiste en una no-linealidad estática, unos retardos no constantes y unas dinámicas de bajo orden. La no linealidad representa la curva característica del intercambiador, la cual resulta de la eficacia del intercambiador  $\varepsilon$  que depende del punto de operación. Los retardos son debidos al transporte de material en el intercambiador y dependen de los caudales considerados. Por último, la dinámica de bajo orden es una simplificación en la cual la dinámica distribuida existente en el AHX se sustituye por un modelo de parámetros concentrados y orden reducido. El diagrama de la figura 2.3 muestra los elementos del modelo, siendo NL la no linealidad estática,  $\hat{T}_{1o}$  el valor de  $T_{1o}$  estimado por el modelo y  $r$  los residuos o ruido de identificación.

La identificación comienza caracterizando la no linealidad estática a partir de datos de operación normal. Este paso no reviste dificultad dado que se pueden obtener datos de bucle cerrado o abierto con la única condición de que se permanezca en un cierto equilibrio.

Como segundo paso se obtienen datos de experimentos en los que la variable  $T_{2i}$  sufre cambios que excitan la dinámica. Dado que el intercambiador real no ha sido construido aún en esta fase del proyecto, se va a usar una simulación compleja para obtener los datos de respuesta a las rampas. A partir de estos datos se identifica el modelo de 2.3 usando un tiempo de muestreo  $T_m = 1$  s. Los parámetros a estimar son los coeficientes de la versión discretizada de los polinomios  $A(s)$ ,  $B(s)$ ,  $C(s)$ ,  $D(s)$  y  $F(s)$  así como el retraso  $R$ . Para la estimación de parámetros se usa el método de identificación es de Mínimos Cuadrados Extendidos (MCE) realizado en MATLAB con programas propios (Arahal et al., 2006).

Dado que el objetivo final de los modelos es la realización de controladores jerárquicos se utiliza como medida de bondad el error del modelo en simulación en lugar de la medida habitual que considera solamente la predicción a un paso (Yedra et al., 2014).

El modelo así identificado es válido para condiciones de uso en torno a los valores  $mf_1$  y  $mf_2$  considerados. Para abarcar todo el intervalo de funcionamiento del AHX cabe considerar una malla de puntos que cubra el espacio  $\{mf_1\} \times \{mf_2\}$ . Esto se logra fácilmente mediante tablas, pero se ha de tener en cuenta que los valores  $mf_1$  y  $mf_2$  no son independientes en condiciones normales, por lo que no es necesario completar toda la malla. De hecho, debido a las características del resto de la planta, la variable  $mf_1$  dicta el punto de operación casi por completo. La temperatura del agua en el DEP sí varía durante el día, lo cual provoca una cierta variación en el flujo  $mf_2$  necesario para refrigerar el aire.

### 3. Resultados

El método presentado en el apartado anterior ha sido usado para la realización de ensayos en los que se recogen datos para identificación. En cada prueba se mantienen constantes los valores  $T_{1i}$  y  $mf_1$  simplemente no modificando las condiciones del compresor. El flujo  $mf_2$  es aproximadamente constante y  $T_{2i}$  sufre la variación descrita anteriormente y que se observa en la figura 5. En la figura 7 se aprecia la evolución de  $T_{1o}$  para los tres casos siguientes: C1 en el que  $mf_2 = mf_{2M}$ , C2 en el que  $mf_2 = 0,66mf_{2M}$  y C3 en el que  $mf_2 = 0,33mf_{2M}$ .

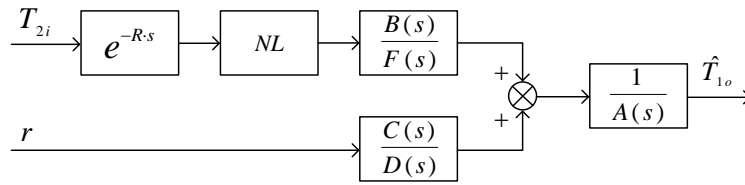


Figura 6: Diagrama del modelo considerado para identificación.

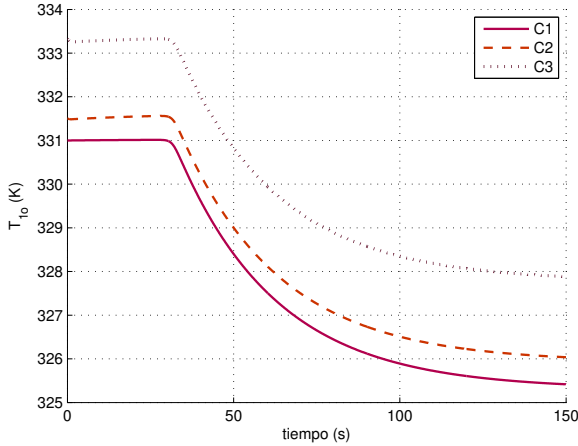


Figura 7: Trayectorias de la temperatura del aire a la salida del AHX para tres condiciones diferentes.

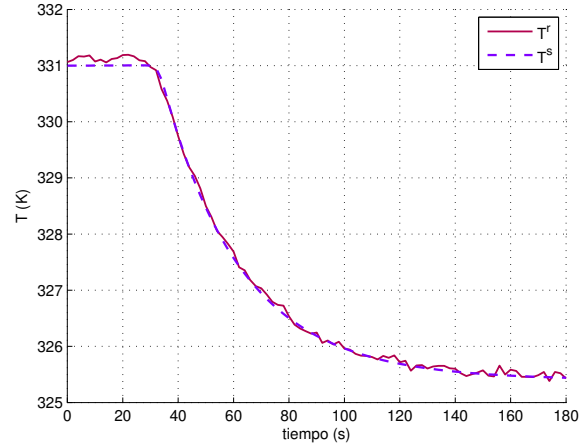


Figura 8: Trayectoria real ( $T^r$ ) y simulada con el modelo identificado ( $T^s$ ).

Se usa el método de MCE descrito en la Sección 2. Los parámetros que no son coeficientes estimables mediante MCE se han fijado por prueba y error. En este caso estos parámetros son el retardo y el grado de los polinomios. Para el retardo se ha usado la curva temporal como guía. Para el orden de los polinomios se han usado los menores órdenes posibles. A modo de resumen de resultados se presenta el modelo identificado para el caso C1.

- Retardo  $R \approx 7$  (muestras).
- Polinomio A:  $(1 - 0,966z^{-1})$
- Polinomio B:  $(0,0071 + 0,0182z^{-1})$
- Polinomio C:  $(0,41 + 0,59z^{-1})$
- Polinomio D: (1)
- Polinomio F: (1)

Los resultados al someter el modelo a simulación se presentan en la figura 8. Se observa que se ha identificado el comportamiento dinámico con bastante aproximación pues el error cuadrático medio es menor a un Kelvin. De hecho el modelo puede usarse no sólo para realizar el control jerárquico, que es el objetivo planteado inicialmente, sino que por su sencillez puede usarse para desarrollar controladores de bajo nivel para el control local.

Como dato final se presenta en la figura 9 el histograma del error en simulación ( $T_{1o}^r - T_{1o}^s$ ) para un ensayo en condiciones similares con la misma dinámica, pero siendo diferente a los ensayos usados para la determinación del modelo.

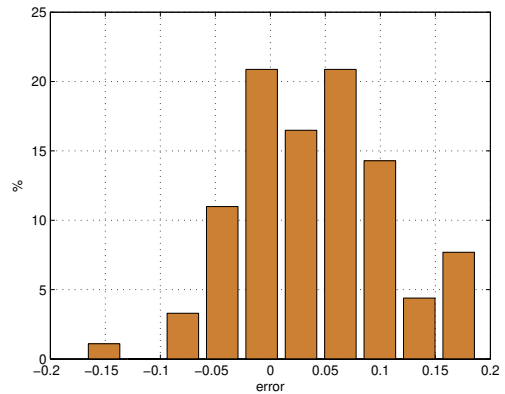


Figura 9: Histograma del error en simulación para un experimento no usado en la determinación del modelo.

#### 4. Conclusiones

El trabajo presentado es un primer paso hacia la identificación de un equipo industrial de grandes dimensiones y con reducida capacidad de actuación. Como trabajo futuro, y una vez se hayan tomado una cierta cantidad de datos, se podrán aplicar otras técnicas de identificación y otros tipos de modelos.

## Acknowledgements



Funded by the European Union under GA No 101115601 (PUSH-CCC). Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or EISMEA. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

## Referencias

- Al Hadad, W., Jannot, Y., Maillet, D., 2016. Characterization of a heat exchanger by virtual temperature sensors based on identified transfer functions. In: *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 745. IOP Publishing, p. 032089.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2007.02.003>
- Alsop, A. W., Edgar, T. F., 1989. Nonlinear heat exchanger control through the use of partially linearized control variables. *Chemical Engineering Communications* 75 (1), 155–170.  
DOI: [10.23919/ACC.1986.4789081](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.04.005)
- Álvarez, J., Yebra, L., Berenguel, M., 2007. Repetitive control of tubular heat exchangers. *Journal of Process Control* 17 (9), 689–701.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2007.02.003>
- Arahal, M. R., Berenguel, M., Rodríguez, F., 2006. *Técnicas de predicción con aplicaciones en Ingeniería*. Vol. 15. Universidad de Sevilla.
- Beschi, M., Padula, F., Visioli, A., 2016. Fractional robust PID control of a solar furnace. *Control Engineering Practice* 56, 190–199.  
DOI: [10.1016/j.conengprac.2016.04.005](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.04.005)
- Beschi, M., Padula, F., Visioli, A., 2017. The generalised isodamping approach for robust fractional PID controllers design. *International Journal of Control* 90 (6), 1157–1164.
- Casteleiro-Roca, J.-L., Barragán, A. J., Segura, F., Calvo-Rolle, J. L., Andújar, J. M., sep. 2019. Intelligent hybrid system for the prediction of the voltage-current characteristic curve of a hydrogen-based fuel cell. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 16 (4), 492–501.  
DOI: <https://doi.org/10.4995/riai.2019.10986>
- Gupta, S., Gupta, R., Padhee, S., 2018. Parametric system identification and robust controller design for liquid–liquid heat exchanger system. *IET Control Theory & Applications* 12 (10), 1474–1482.  
DOI: [10.1049/iet-cta.2017.1128](https://doi.org/10.1049/iet-cta.2017.1128)
- London, A., Nottage, H., Boelter, L., 1941. Determination of unit conductances for heat and mass transfer by the transient method. *Industrial & Engineering Chemistry* 33 (4), 467–473.
- Oravec, J., Bakošová, M., Trafczynski, M., Vasičkaninová, A., Mészáros, A., Markowski, M., 2018. Robust model predictive control and PID control of shell-and-tube heat exchangers. *Energy* 159, 1–10.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.106>
- Pekar, L., 2020. *Advanced Analytic and Control Techniques for Thermal Systems with Heat Exchangers*. Academic press.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/C2019-0-00031-3>
- Piotrowska, E., Chochowski, A., 2012. Application of parametric identification methods for the analysis of the heat exchanger dynamics. *International journal of heat and mass transfer* 55 (23-24), 7109–7118.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.07.025>
- Rodríguez, C., Guzman, J., Rodríguez, F., Berenguel, M., Arahal, M. R., 2010. Diurnal greenhouse temperature control with predictive control and online constraints mapping. *IFAC Proceedings Volumes* 43 (1), 140–145.  
DOI: <https://doi.org/10.3182/20100329-3-PT-3006.00027>
- Salimpour, M. R., 2009. Heat transfer coefficients of shell and coiled tube heat exchangers. *Experimental thermal and fluid science* 33 (2), 203–207.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2008.07.015>
- Sanchis, R., Peñarrocha-Alós, I., 2022. A new method for experimental tuning of PI controllers based on the step response. *ISA transactions* 128, 329–342.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.09.008>
- Sanz Bermejo, F. J., Ramírez Laboreo, E., Sagüés Blázquez, C., may 2023. Structural identifiability analysis of a heat transfer system. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 20 (4), 412–420.  
DOI: <https://doi.org/10.4995/riai.2023.19170>
- Skogestad, S., 2001. Probably the best simple PID tuning rules in the world. In: *AIChE Annual Meeting, Reno, Nevada*. Vol. 77. Citeseer, p. 276h.
- Srinivasan, A., Lakshmi, P., 2008. Wiener model based real-time identification and control of heat exchanger process. *J. Automation and Systems Engineering*.
- Vasičkaninová, A., Bakošová, M., Čírka, L., Kalúz, M., Oravec, J., 2018. Robust controller design for a laboratory heat exchanger. *Applied Thermal Engineering* 128, 1297–1309.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.086>
- Yedra, R. M., Rodríguez, F., del Mar Castilla, M., Arahal, M. R., 2014. A neural network model for energy consumption prediction of ciesel bioclimatic building. In: *International Joint Conference SOCO'13-CISIS'13-ICEUTE'13: Salamanca, Spain, September 11th-13th, 2013 Proceedings*. Springer, pp. 51–60.  
DOI: [10.1007/978-3-319-01854-6\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-01854-6_6)