



Modelado paramétrico de un sistema de control de transferencia de calor para el proyecto de mantenimiento de temperatura de agua

Parametric modeling of a heat transfer control system for a water temperature maintenance project

Modelagem paramétrica de um sistema de controle de transferência de calor para um projeto de manutenção da temperatura da água

Fabián Celso Gunsha-Maji ^I
fabian.gunsha@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-5637-1052>

Ángel José Quevedo-Ríos ^{II}
angel.quevedo@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-2304-018X>

Javier Milton Solís-Santamaría ^{III}
milton.solis@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-9291-1906>

Elvis Enrique Argüello ^{IV}
e_arguello@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-5083-1011>

Correspondencia: fabian.gunsha@esPOCH.edu.ec

Ciencias Técnica y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 23 de junio de 2023 * **Aceptado:** 12 de julio de 2023 * **Publicado:** 01 de agosto de 2023

- I. Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, EC060155, Ecuador.
- II. Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, EC060155, Ecuador.
- III. Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, EC060155, Ecuador.
- IV. Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, EC060155, Ecuador.

Resumen

En este artículo describe la identificación del modelo paramétrico de un sistema de transferencia de calor de una ducha eléctrica con datos obtenidos mediante un programa desarrollado en LabView y analizados con Matlab utilizando modelos paramétricos aplicando una secuencia binaria pseudoaleatoria PRBS a la planta, donde se establece que el modelo paramétrico Box-Jenkins tiene el mayor porcentaje de estimación.

Palabras clave: Modelo Paramétrico; PRBS; Secuencia Pseudoaleatoria Binaria; AR; ARMAX; Output Error; Box-Jenkins.

Abstract

This article describes the identification of the parametric model of an electric shower heat transfer system with data obtained through a program developed in LabView and analyzed with Matlab using parametric models applying a PRBS pseudorandom binary sequence to the plant, where it is established that the Box-Jenkins parametric model has the highest percentage estimate.

Keywords: Parametric Model; PRBS; Binary Pseudorandom Sequence; AR; ARMAX; OutputError; Box-Jenkins.

Resumo

Este artigo descreve a identificação do modelo paramétrico de um sistema de transferência de calor de chuveiro elétrico com dados obtidos através de um programa desenvolvido em LabView e analisado com Matlab usando modelos paramétricos aplicando uma sequência binária pseudoaleatória PRBS à planta, onde se estabelece que o Box- O modelo paramétrico de Jenkins tem a estimativa percentual mais alta.

Palavras-chave: Modelo Paramétrico; PRBS; Sequência pseudoaleatória binária; RA; ARMAX; OutputError; Box-Jenkins.

Introducción

El calor se transfiere por conducción, radiación y convección, de los cuales la transferencia de calor por convección es el más débil en el modelo general de transferencia de calor, considerando que la transferencia de calor por conducción y radiación está respaldada por modelos analíticos y

numéricos bien establecidos [1]. El modelado por convección implica la solución de problemas de dinámica de fluidos en los que la complejidad de la geometría de un espacio cerrado y la diversidad de patrones de flujo de aire interior requieren muchas correlaciones de convección adaptadas al propósito. Adicionalmente hay que considerar las características del espacio, geometría, condiciones ambientales que influyen sobre el modelo [2,3]. Bajo todos estos parámetros se desarrolla estimar un modelo para la ducha eléctrica incluyendo el interfaz de control por medio de la estimación paramétrica [4], mediante la adquisición de datos a través de un programa desarrollado en Labview, conectado a través de bluetooth al microcontrolador STM32F4Discovery encargado del control de temperatura.

El documento está organizado en las siguientes secciones: La sección I se aborda el planteamiento del problema donde se describe la estructura del sistema de transferencia de calor. En la sección III se describe la generación y aplicación de la señal PRBS (Pseudo Random Binary Sequence) hacia la planta. En la sección IV, se describe el proceso de identificación del modelo de la planta mediante Matlab. En la sección V se muestran los resultados paramétricos. Finalmente, en la sección VI se muestran las conclusiones de este trabajo.

Planteamiento del Problema

El sistema de calentamiento de agua (Ducha Eléctrica) es considerado un artefacto eléctrico tiene un consumo de energía elevado, de tal manera se plantea determinar el mejor modelo de la planta para mejorar su control y procurar reducir el consumo de energía.

Esquema del Sistema

El sistema que se muestra en la figura 1 está constituida por un interfaz de potencia, detector de cruce por cero, microcontrolador STM32F4DISCOVERY, sensor de temperatura LM35, ducha eléctrica, Bluetooth.

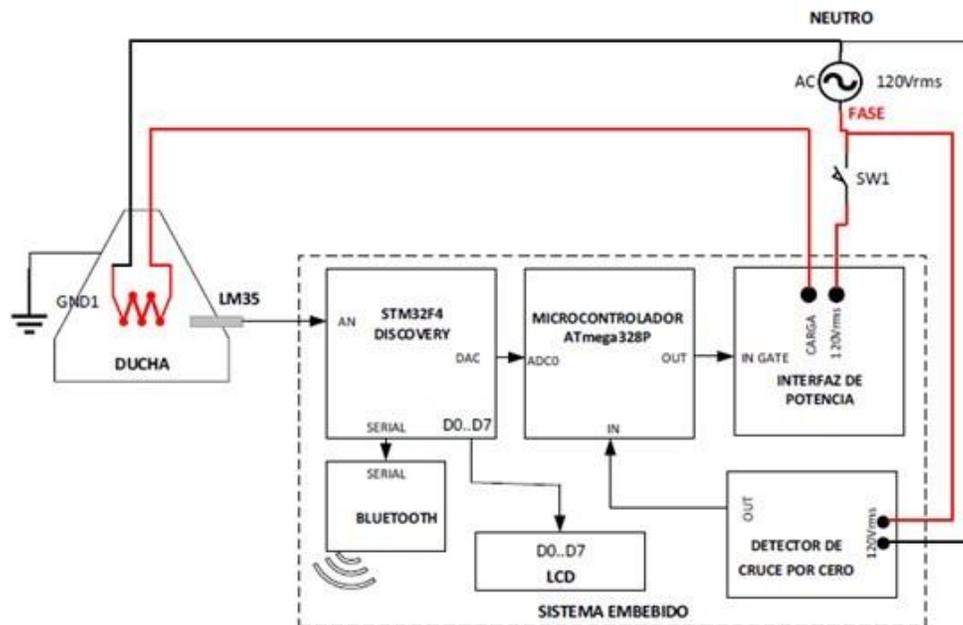


Fig. 1. Sistema de Calentamiento de agua

El interfaz de potencia está desarrollado por un controlador por ángulo de fase que permite controlar la potencia en el semiciclo positivo y negativo mediante un ángulo de disparo α , como muestra la ecuación 1, cuya potencia de salida se muestra en la ecuación 2 [5].

$$V_{i(rms)} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right)} \quad (1)$$

$$P_o = \frac{V_o(rms)^2}{R} \quad (2)$$

El detector cruce por cero permite ajustar el disparo sobre el tiristor ajustada a la red eléctrica, para un correcto funcionamiento del interfaz de potencia [6]. El microcontrolador STM32F4DISCOVERY encargado de controlar el interfaz de potencia, sensar la temperatura, especificar la temperatura de referencia y a través de estos controlar la temperatura del agua de la ducha eléctrica.

El sensor de Temperatura lineal LM35 encargado de sensar la temperatura del agua que sale de la ducha y enviar dicha información al microcontrolador.

La ducha eléctrica encargada de calentar el agua con un consumo de potencia máxima de 4400 Watts.

La figura 2 muestra la distribución de los distintos elementos del sistema de calentamiento de manera física, que permitió la adquisición de los datos para la identificación de la planta. Para la adquisición de los datos se considera un periodo de muestreo de 0.25 segundos [5].

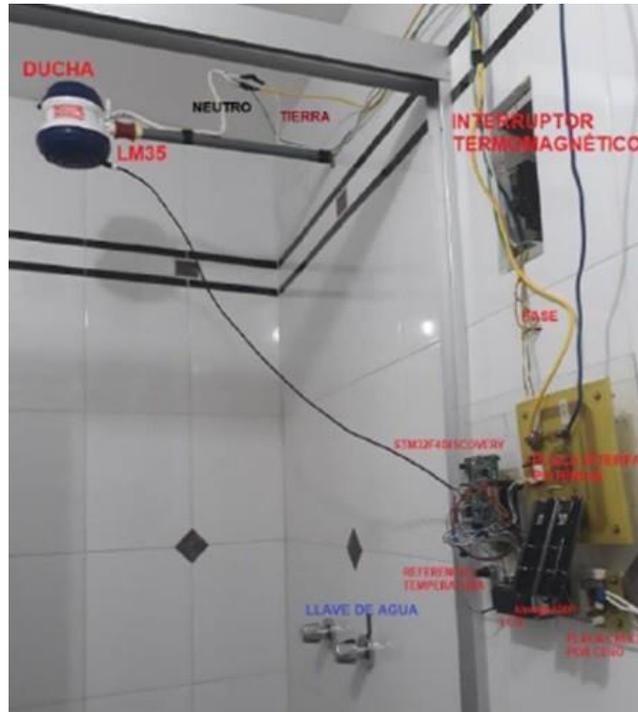


Fig. 2. Sistema de Calentamiento de agua

Generación y aplicación de señal PRBS a la planta

En esta sección se realiza la creación de la señal PRBS a partir de la respuesta, considerando la temperatura inicial del agua de 20°C debido a las condiciones ambientales en el momento de la adquisición de los datos, adicionalmente se realiza el acondicionamiento de la señal PRBS para temperatura que oscile entre 20 y 40 °C para su posterior ingreso al sistema para obtener datos que permitan identificar la planta [7].

Análisis de la respuesta escalón

La temperatura que ingresa al sistema es de 40°C incluida la temperatura inicial de 20°C por las condiciones ambientales del agua, es decir la señal de entrada forma una entrada escalón de 20 a 40°C es decir un cambio de 20°C cuya respuesta se muestra en la figura 3 donde se observa que

existe un sobrepico de 45°C, y llega a una temperatura de establecimiento 40°C a los 160 segundos.

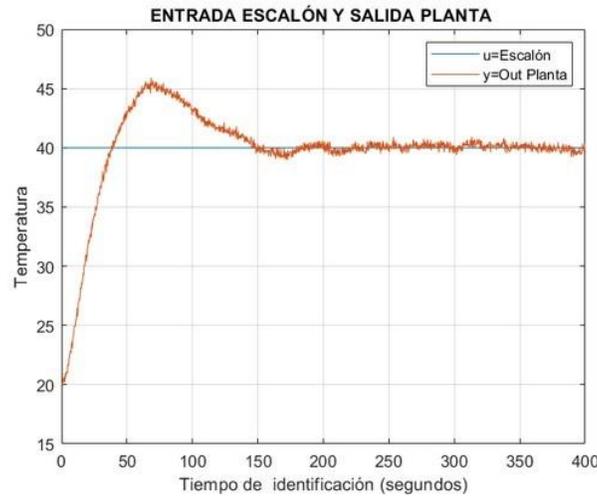


Fig. 3. Respuesta Escalón del sistema

Señal PRBS

Para el desarrollo de la señal PRBS que será ingresada a la planta mediante la programación del microcontrolador, se realiza el análisis de la respuesta escalón donde se establece las constantes de tiempo al 63%, 95%, 99% como muestra la figura 4.

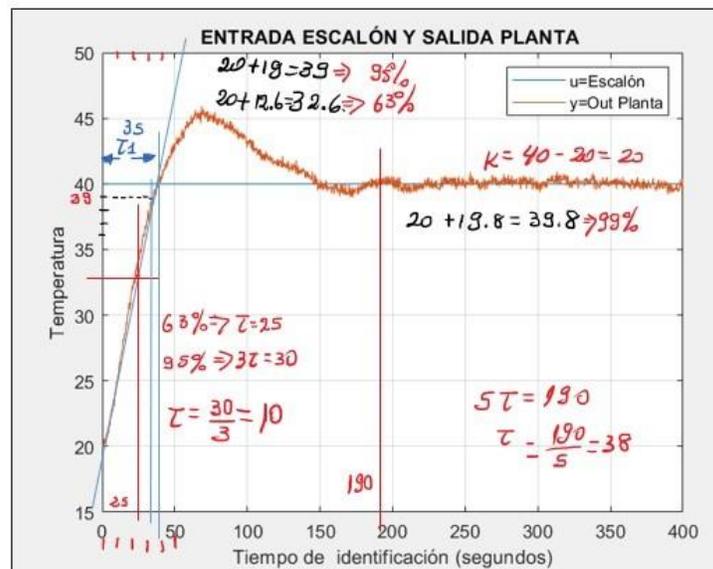


Fig. 4. Datos para generar señal PBRs

Los datos extraídos de la figura 4 se muestran en la tabla I

TABLE I: Constantes de Tiempo

Parámetro	τ
63%	15
95%	10
99%	38
τ dom	35

Con los datos de la tabla I, se determinan y calculan los parámetros se señal PBRS como se muestra en la tabla II y se genera la señal PRBS con el software inputDesignGUI Version2.3a, que se muestra en la figura 5.

TABLE II: Parámetros de PRBS

Parámetro	Valor
τ domL	10
τ domH	38
α s	2
β s	3
Tsw	14
nr	6
Ns	63

Debido a que el sistema con la señal PRBS generada de -1 a 1 no se logra obtener una señal adecuada para la identificación, la señal PRBS es modificada a rangos de 0 a 20 como se muestra en la figura 6 para que pueda alcanzar rangos de temperaturas de 40°C, la se tiene 2 ciclos PRBS con un periodo de tiempo aproximado de 30 minutos.

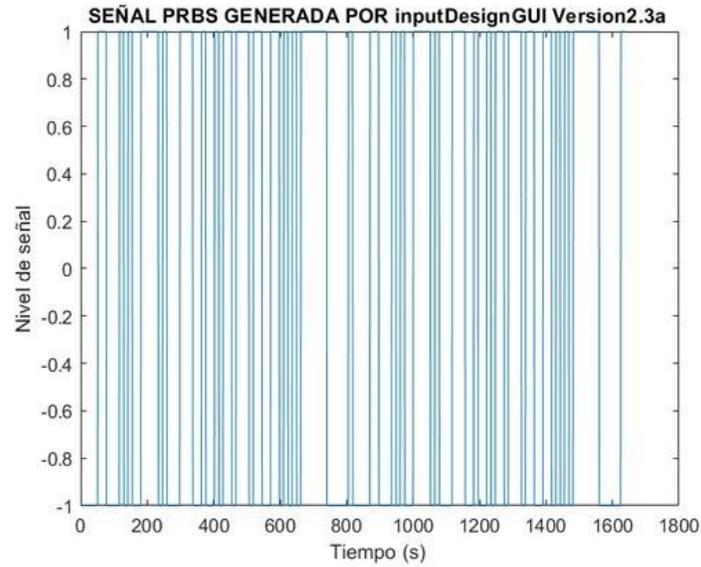


Fig. 5. Señal PBRS 1

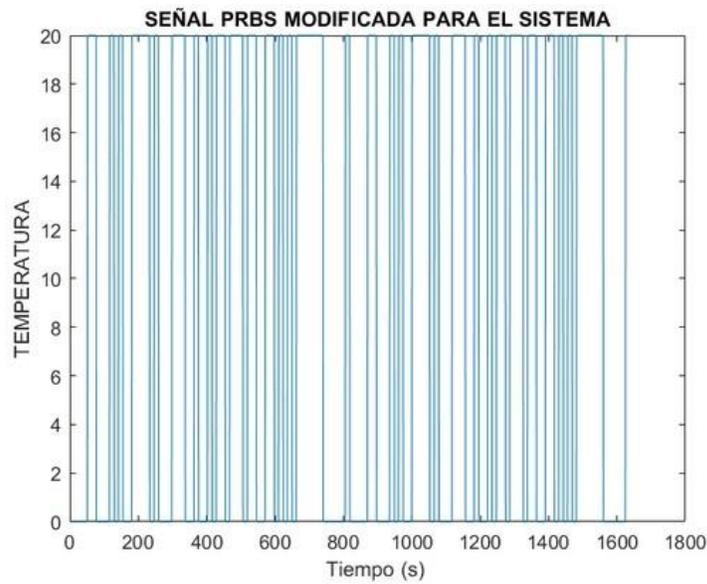


Fig. 6. Señal PBRS 2

Respuesta de la planta

Una vez ingresada la señal PRBS a la planta se obtienen los resultados que se muestran en la figura 7 donde se observa que la señal de salida tiene cambios de temperatura entre 22 y 42 grados centígrados, adicionalmente cabe señalar que el tiempo de recolección de datos es aproximadamente 30 minutos porque la señal PRBS tenía dos ciclos de repetición.

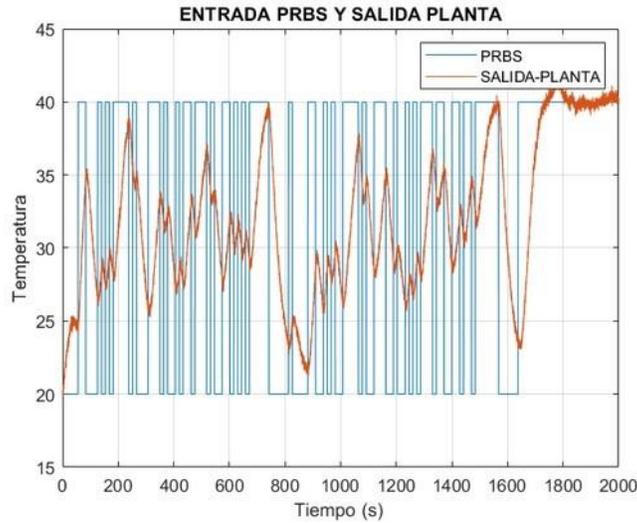


Fig. 7. Señal de Salida de la planta a una entrada PBRS

Identificación del modelo de la planta

Para la identificación del modelo se toman los primeros 15 minutos de la respuesta a la señal PRBS, y los 15 minutos restantes se utilizará para la evaluación del modelo mediante System Identification-Matlab [8,9].

Removemos tendencias y medias

Tomamos los datos elegidos y removemos tendencias y medias como se muestra en la figura 8, donde la señal toma valores entre ± 10 .

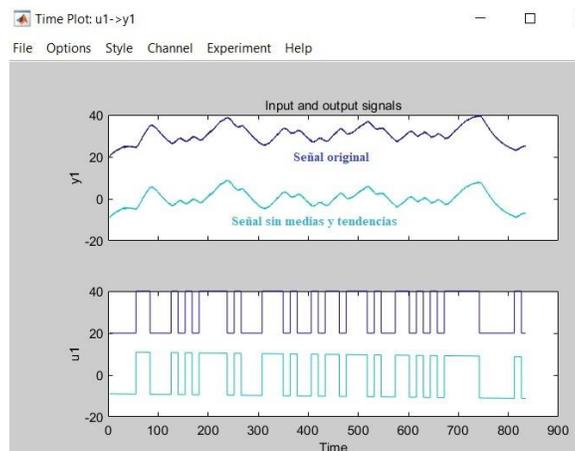


Fig. 8. Señal sin medias y tendencias

Generación de Modelos

Los modelos poligonales elegidos para el análisis ARX, ARMAX, OE, BJ como muestra la figura 9, donde se observa que el modelo Box Jenkins posee un mejor ajuste.

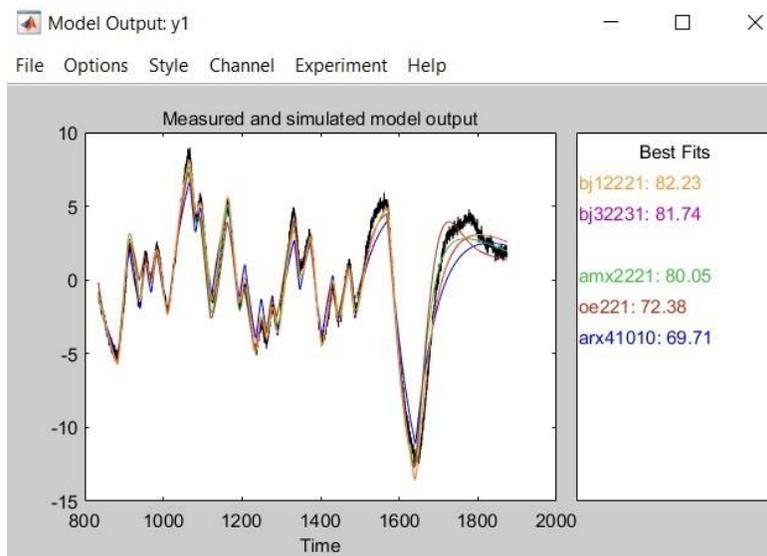


Fig. 9. Modelos Perimétricos

Resultados

Para la evaluación de los resultados se toma los 15 últimos minutos de los datos obtenidos con la señal PRBS aplicadas al sistema cuyos resultados se muestran en la tabla III.

TABLE III: Mejores ajustes de los modelos

MODELO	Ajuste
Box-Jenkins (bj12221)	82.23
ARMAX (amx12221)	80.05
(oe221)	72.38
ARX41010	69.71

La tabla III muestra que los modelos Box Jenkins y ARMAX tienen 82.23 y 80.05 porcentaje de estimación respectivamente.

TABLA IV: Parámetros

MODELO	na	nb	nc	nd	nf	nk
ARX	4	10	-	-	-	10
ARMAX	2	2	2	-	-	1
Output Error	-	2	-	-	2	1
Box-Jenkins	-	1	2	2	2	1

La tabla IV muestra los parámetros del orden polinómico de los modelos obtenidos después de proceso de ajuste del modelo, donde Box Jenkins tiene componentes polinómicos que le permiten estimar una planta. Los resultados de las variables de los dos modelos que poseen mejor estimación se muestran en las ecuaciones 3,4.

Modelo Box-Jenkins:

$$y(t) = [B(z)/F(z)]u(t) + [C(z)/D(z)]e(t) \quad (3)$$

$$B(z) = 0.0002773z^{-1}$$

$$C(z) = 1 - 1.747z^{-1} - 0.7824z^{-2}$$

$$D(z) = 1 - 1.853z^{-1} - 0.8539z^{-2}$$

$$F(z) = 1 - 1.954z^{-1} - 0.9547z^{-2}$$

Modelo ARMAX:

$$A(z)y(t) = B(z)u(t) + C(z)e(t) \quad (4)$$

$$A(z) = 1 - 1.964z^{-1} - 0.9646z^{-2}$$

$$B(z) = 0.0007028z^{-1} + 0.000478z^{-2}$$

$$C(z) = 1 - 1.84z^{-1} - 0.8557z^{-2}$$

Conclusiones

- El modelo Box-Jenkins paramétrico tiene el mejor ajuste a los datos de prueba con una estimación de 82.23 por ciento que determinan ser el mejor ajuste sin descartar el modelo ARMAX con una opción también válida.
- La señal PRBS generada entre -1 a 1 fue modificado a -10 a 10 grados centígrados debido a que la planta con cambios tan pequeños no permite tener una estimación adecuada y

considerando que el sistema tiene una temperatura inicial de 20°C debido a las condiciones ambientales en la que se encuentra la planta.

- Para futuros trabajos se pretende cambiar el sistema de control de ángulo de fase por la Modulación de Ancho de Pulso Sinodal (SPWM) para mejorar el control de temperatura, esto determina que se deba realizar una nueva estimación del modelo, para verificar que cambios se produce respecto al modelo obtenido al cambiar el tipo de controlador.

Referencias

1. Y. Cengel, Transferencia de calor y masa, 3rd ed. México: Mcgraw-Hill Interamericana Editores, 2007, pp. 17-30.
2. Amlashi N. J. S., Shahsavari A., Vahidifar A., Nasirian M. (2013). Nonlinear System Identification of Laboratory Heat Ex- changer. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), Vol.3, No.1, pp. 118-128.
3. P. Fanger, Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environ- mental Engineering, McGraw Hill Company, US, 1970.
4. Aarts, R.G.K.M. (2012). System Identification and Parameter Estimation, Faculty of Engineering Technology, University Twente
5. F. C. Gunsha Maji, "Análisis comparativo del desempeño de controladores discretos PID y difuso evaluados en un sistema de transferencia de calor", Tesis Maestría, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2018.
6. D. Hart, Electrónica de potencia, 1st ed. Madrid: Pearson educación, 2001, pp. 177-198.
7. LJUNG, L. System identification: Teory for the user. Prentice-Hall, 1987
8. System identification toolbox, For use with MATLAB. User guide.
9. K. OGATA, Sistemas de Control en tiempo discreto. Editorial Prentice Hall, México, 1996.