

Algoritmo genético aplicado a la sintonización de un controlador PID para un sistema acoplado de tanques

Othon Colorado Arellano ^a, Norberto Hernández Romero^{b*}, Juan Carlos Seck Tuoh Mora^b, Joselito Medina Marín^b

^a Área de Básicas, CECyT 3, Instituto Politécnico Nacional, Av. Carlos Hank González S/N, Ecatepec de Morelos, Estado de México, C.P. 55119.

^b Área Académica de Ingeniería, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca – Tulancingo Km. 4.5, Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hgo., México, C.P. 42184.

Resumen

Este trabajo presenta un algoritmo diseñado para encontrar los parámetros de modo tal que mejore el funcionamiento de un controlador Proporcional Integral y Derivativo (PID) en un sistema acoplado de tanques ya que es uno de los controladores industriales utilizados comúnmente; el método propuesto para determinar el valor de los parámetros del controlador PID, se basa en un Algoritmo Genético (AG), para obtener los valores de las constantes K_p , K_i y K_d del controlador en un sistema lineal de tres tanques de nivel de líquido; para ello primeramente se realizó la sintonización con el método de Ziegler-Nichols e integrándose a la planta; posteriormente se utiliza un AG para sintonizar el mismo controlador de modo tal que se comparan las respuestas con ambas metodologías, lográndose mejores resultados con el AG en cuanto al tiempo de establecimiento del sistema así como en el sobre impulso del sistema; por lo tanto podemos decir que para el sistema estudiado el método de sintonización de los parámetros del controlador PID con un AG mejora la respuesta del controlador en comparación con el método de Ziegler-Nichols.

Palabras Clave: Algoritmos Genéticos, Control PID, y método Ziegler-Nichols.

1. Introducción

El regulador PID es un controlador ampliamente utilizado en la industria debido a su simplicidad y robustez. Actualmente el PID todavía es favorable para ser usado con más del 90% de controladores industriales (Moharam, Mostafa, & Al-Hosseini, 2016). Sin embargo, encontrar los parámetros óptimos del regulador PID es difícil especialmente en modelos de sistemas no lineales, un ejemplo de estos son sistemas de control de nivel de líquido. Se han desarrollado varios métodos para realizar la sintonización del controlador PID, uno de estos métodos es Ziegler y Nichols (Z-N) (Dorf C. R. & Bishop R., 2016). Es el método más antiguo y el más sencillo. Sin embargo, es muy difícil determinar los parámetros óptimos del PID con Z-N en las plantas industriales. El método (Z-N) no proporciona un rendimiento aceptable, ya que presenta un sobre impulso y un tiempo de establecimiento largo, por lo que los valores de los parámetros PID a menudo se perfeccionan posteriormente de acuerdo con la experiencia del operador. (Moharam, Mostafa, & Al-Hosseini, 2016)

Los Algoritmos Genéticos (AG) son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización. Están basados en el proceso genético de los organismos vivos. A lo largo de las generaciones, las

poblaciones evolucionan en la naturaleza de acorde con los principios de la selección natural y la supervivencia de los más fuertes. (Universidad el País Vasco)

El desarrollo de los AG, se debe en gran medida al profesor investigador John Holland de la Universidad de Michigan. A finales de la década de los 60 desarrolló una técnica que imitaba en su funcionamiento a la selección natural, aunque originalmente esta técnica recibió el nombre de “planes reproductivos”, a raíz de la publicación en 1975 de su libro “Adaptation in Natural and Artificial Systems” (Holland, 1975) se conoce principalmente con el nombre de AG (Gestal & Rivero, 2010). Básicamente, un AG consiste en una población de soluciones codificadas de forma similar a cromosomas; cada uno de estos cromosomas tendrá asociado un ajuste, valor de bondad o fitness, que cuantifica su validez como solución al problema; en función de este valor se le darán más o menos oportunidades de reproducción. Los AG tienen una fuerte base biológica, en sus orígenes los algoritmos evolutivos consistieron en copiar procesos que tienen lugar en la selección natural, este concepto había sido introducido, por Charles Darwin. A pesar de que aún hoy en día no todos los detalles de la evolución biológica son completamente conocidos existen algunos hechos apoyados

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: ocolorado@ipn.mx (Othon Colorado Arellano),
nhromero@uaeh.edu.mx (Norberto Hernández Romero), jseck@uaeh.edu.mx
(Juan Carlos Seck Tuoh Mora), jmedina@uaeh.edu.mx (Joselito Medina Marín)
URL: www.uaeh.edu.mx

sobre una fuerte evidencia experimental. (Gestal & Rivero, 2010)

Algunas de las alternativas para el cálculo de las constantes del controlador PID son las técnicas de computación emergentes entre los cuales están los AG y como ejemplo podemos mencionar: Genetic Algorithm-based PID Parameters Optimization for Air Heater Temperature Control, aplica AG para la regulación de un sistema de calefacción mediante un controlador PID, el cual se utiliza para controlar la temperatura de salida del calentador de aire. (Wati & Hidayat, 2013). On Lime Kiln Temperature System Based on GA Fuzzy PID Algorithm and Optimal Control, diseñado un plan para el control inteligente de la temperatura en la cámara de combustión del horno que utiliza un AG para determinar en conjunto con lógica difusa para determinar las constantes del controlador PID. (Shaoming, Peng, Fan, & Guoli, 2014). The PID Control System of Steam Boiler Drum Water Level Based on Genetic Algorithms, se aplican AG al diseño del regulador PID del nivel de agua de la caldera de vapor, se obtienen los parámetros PID relativamente óptimos que no solo cumplen los exigentes requisitos de control, también optimizar el rendimiento dinámico y hacen que el sistema tenga una fuerte capacidad anti interferencia. (Zhao, Wang, & Teng, 2014) Genetic Algorithm-Based Adaptive PID Controller, desarrolla un controlador PID adaptativo basado en algoritmos genéticos (AG-APID) con el fin de lograr un rendimiento y regulador adecuado; estimando los parámetros para lograrlo. (Verma & Mudi, 2015). Optimal Tuning of PID Controller for Centrifugal Temperature Control System in Sugar Industry Using Genetic Algorithm, presenta un ajuste óptimo de los parámetros PID para regular la temperatura en un intercambiador de calor de máquinas centrífugas en la industria azucarera mediante algoritmo genético. (Singh, Boolchandani, Modani, & Katal, 2016).

2. Controlador PID

Los sistemas de control son capaces de iniciar y detener procesos sin la intervención manual del usuario, para ello es necesario recibir información del exterior, procesarla y emitir una respuesta; en un sistema de control dicha respuesta será siempre la misma pero podemos tener diferentes comportamientos según las circunstancias. (recursostic.educacion.es, 2017). A la información que recibe el sistema del exterior se le denomina de forma genérica entrada o input; a las condiciones que existen en el exterior después de la actuación se les denomina de forma genérica salida u output.

El control retroalimentado o a lazo cerrado tiene la característica de que medimos cierta cantidad de la salida y luego la comparamos con un valor deseado y el error resultante lo utilizamos para corregir la salida del sistema, como se muestra en la figura 1.

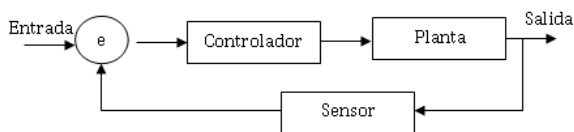


Figura 1: Sistema de control lazo cerrado.

El controlador PID está formado por tres parámetros diferentes, los cuales ajustan o corrigen una variable de proceso en relación a una referencia dada por medio de un elemento de control; se encarga de reducir el sobreimpulso de la salida y el tiempo de respuesta mediante el control derivativo y puede eliminar offset de estado estacionario a través del control integral. (Dos Santos Coelho & Vichhoff Pessoa, 2014).

La ecuación que describe un controlador PID está dada por:

El control proporcional:

$$u(t) = Ke(t), \quad [1]$$

El control integral:

$$u(t) = \frac{K}{T_i} \int_0^t e(t) dt, \quad [2]$$

y el control derivativo:

$$u(t) = KT_d e(t), \quad [3]$$

Combinando las tres acciones de control y aplicando la transformada de Laplace, debido a que tenemos un sistema que es variable con respecto del tiempo, del mismo modo es una herramienta para el análisis de sistemas dinámicos lineales; tenemos la ecuación que describe el controlador PID en Laplace, dada por:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right), \quad [4]$$

Donde K_p es la constante proporcional, T_i es el tiempo integral y T_d el tiempo derivativo. Estas tres constantes definen el control PID.

Una vez modelado el controlador PID en Laplace se conecta con la planta la cual también debe de estar en Laplace; reduciendo el sistema en lazo cerrado, para entonces determinar los parámetros del controlador PID por medio de un AG y posteriormente determinar las raíces del modelo, para fijar ciertos comportamientos en la planta que minimicen la desviación de la respuesta respecto a una referencia establecida, como se muestra en la figura 2.

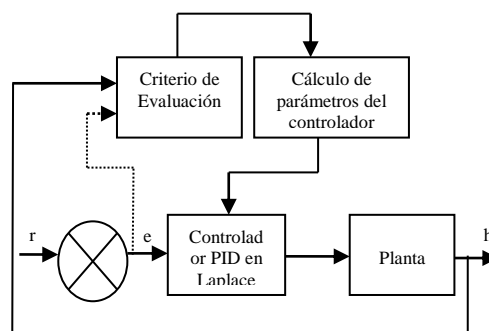


Figura 2: Integración del controlador PID con la planta.

3. Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos constituyen una técnica de búsqueda fundamentada en el proceso de evolución natural en la cual los individuos más adaptados tienen mayores probabilidades de sobrevivir y de transferir su material

genético a las siguientes generaciones. La idea fundamental de los algoritmos genéticos consiste en encontrar una solución aceptable a un problema por medio del mejoramiento de un conjunto de individuos, cuya función de evaluación corresponde a una solución del problema. Esta optimización se realiza mediante procesos selectivos y de intercambio de información genética. Dichos procesos están dados por operadores genéticos, que definen la estructura de un AG (Goldberg, 1989).

Un AG básico está constituido por la población y el siguiente conjunto de reglas:

Función objetivo: proporciona una medida de desempeño del sistema asociado a cierto individuo en la población.

Operador de selección: busca ciertos individuos de la población, quienes darán origen a las futuras generaciones. Por lo general, la selección depende del valor de la función de evaluación de cada individuo.

Operador de cruce: consiste en mezclar la información genética de dos individuos, a fin de generar nuevos individuos.

Operador de mutación: consiste en alterar las características genéticas de un individuo, con el objeto de aumentar la probabilidad de exploración del espacio de búsqueda y disminuir el riesgo de estancamiento del algoritmo en óptimos locales.

Como los AG se basan en los procesos de evolución de los seres vivos, tienen los siguientes elementos:

- Operadores genéticos, Son los diferentes métodos u operaciones que se pueden ejercer sobre una población que nos permite obtener poblaciones nuevas.
- Población, conjunto de individuos (cromosomas), se debe ir obteniendo de forma sucesiva distintas poblaciones.
- Individuo, es un ser que caracteriza su propia especie, es el cromosoma y es el código de información sobre el cual opera el algoritmo.

Su aplicación al control se fundamenta en el que un proceso complejo se puede a menudo reducir a una aproximación funcional numérica del problema, que se pueden optimizar mediante los AG (Santos, 2011).

En la Figura 3, se muestran los componentes principales de un AG. Una población compuesta de N individuos y cada individuo definido por su cromosoma. Los cromosomas son cadenas de genes, normalmente se usa el sistema binario para esta representación. Por otra parte, está un conjunto de reglas que de una forma metodológica incide sobre la población.

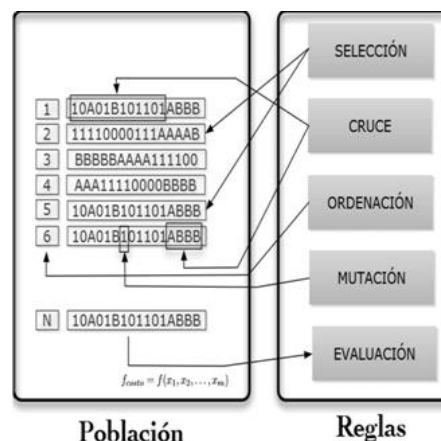


Figura 2: Componentes de un algoritmo genético.

La secuencia de ejecución de un AG es la siguiente:

- Generar una población aleatoria en el espacio solución del problema.
- Establecer una función, de modo que se pueda evaluar la adaptación de los nuevos individuos a la nueva población.
- Crear una nueva población efectuando operaciones como selección/ reproducción proporcional a la adaptación, cruce y mutaciones en los individuos en la que ésta acaba de ser medida.
- Reemplazar la antigua población.
- Evolucionar utilizando la nueva población hasta cumplir un número de iteraciones o un determinado número de error.

La figura 4 muestra el diagrama de flujo de la realización de las diferentes etapas de ejecución del AG, donde básicamente el ciclo es evaluar función-selecionar individuo-cruza-mutación-prueba de terminación de ciclo.

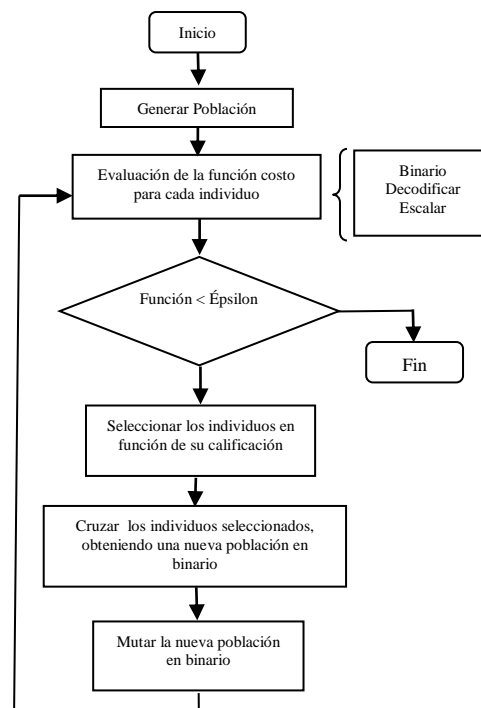


Figura 4: Secuencia de ejecución de un algoritmo genético.

4. Descripción de la planta

Para la prueba en la aplicación real, el PID se utiliza la función de transferencia de un sistema de tres tanques de nivel de líquido tomada de, (Moharam, Mostafa, & Al-Hosseini, 2016), el cual se muestra en la figura 5.

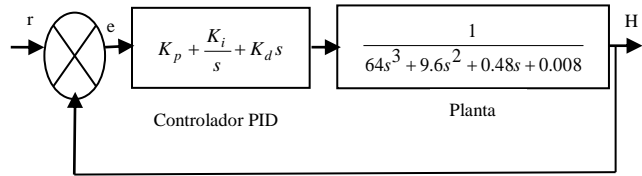


Figura 5: Diagrama de bloques del controlador PID.

La función de transferencia global del sistema de tres tanques está dada por la ecuación [5], tomada de (Davoud Mohammadi Souran, Seyed Hamidreza Abbasi, & Faridoon Shabaninia, 2013).

$$\frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{1}{64s^3 + 96s^2 + 0.48s + 0.008} \quad [5]$$

5. Sistema de nivel de líquido con controlador PID genético

El AG se utiliza para buscar los parámetros K_p , K_i y K_d del controlador. La figura 6 muestra la estructura del sistema dinámico con el AG y el criterio de evaluación.

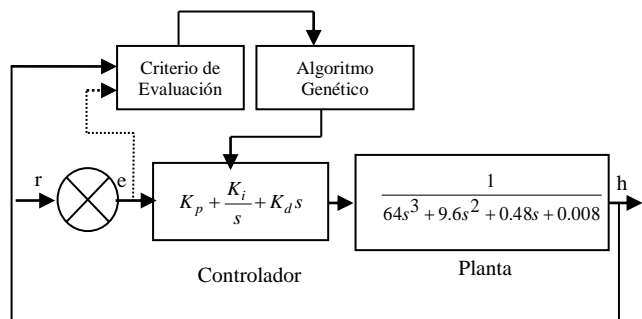


Figura 6: Planta con controlador PID genético.

6. Pruebas y resultados

Con el propósito de comparar el desempeño del algoritmo genético, primeramente se obtuvieron las ganancias del controlador PID, con el segundo método de Ziegler y Nichols, basado en la ganancia crítica K_{cr} , y el periodo crítico P_{cr} (Ogata, 2014). Los cuales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Ganancias del controlador PID con Ziegler y Nichols.

Controlador	K_p	K_i	K_d
PID	0.0384344	0.0010588	0.1739608

Una vez obtenidas las ganancias se obtiene la respuesta del sistema ante una entrada escalón mediante el software Matlab, obteniéndose la respuesta transitoria en la figura 7.

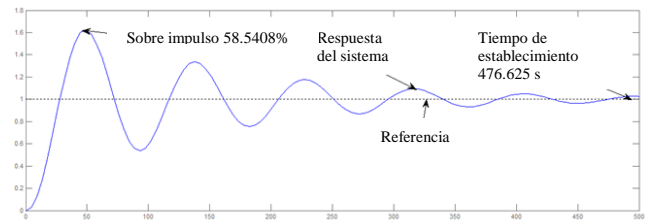


Figura 7: Diagrama de bloques del controlador PID.

En la figura 7, se observa como el controlador PID sintonizado con Ziegler – Nichols alcanza la referencia a un tiempo de 476.6551 s, con un sobre impulso de 58.5408%.

Los parámetros para realizar la prueba de sintonización del controlador PID usando un AG se muestran en la Tabla

Tabla 2: Parámetros para la obtención de las constantes del controlador PID.

Parámetro	Valor
Número de individuos	200
Longitud del cromosoma	18 bits
Numero de variables independientes	3
Máximo error de la optimización	1×10^{-12}
Porcentaje de mutación	5%
Numero de interacciones	20
Intervalo de búsqueda K_p	0 a 0.5
Intervalo de búsqueda para K_i	0 a 0.01
Intervalo de búsqueda para K_d	0 a 0.7

Después de varias pruebas en cuanto al número de individuos de la población, del número de interacciones así como los intervalos de búsqueda se obtienen el valor de las constantes K_p , K_i y K_d del controlador, los cuales se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Ganancias del controlador PID con el algoritmo genético.

Controlador	K_p	K_i	K_d
PID	0.0361	0.000731	0.6999

Ahora la respuesta del sistema ante una entrada escalón con las ganancias de la Tabla 4 se muestra en la figura 8, en la cual se tiene una función de evaluación y la de respuesta de la planta con el controlador PID, se observa como el controlador hace que la función de la planta en un tiempo de 90 segundos alcance dicha función de prueba, además de tener un sobre impulso del 18% con respecto a la función de evaluación.

La Tabla 4 muestra la comparación de los dos métodos, el AG logra un menor sobre impulso, alcanza la referencia de una forma más suave y con un menor tiempo de establecimiento.

Tabla 4: Resultados de los controladores Ziegler-Nichols y algoritmo genético.

Característica	Ziegler – Nichols	Algoritmo Genético
Sobre impulso	58.5404 %	18 %
Tiempo de subida	18.1142 s	10 s
Tiempo de establecimiento	476.6551 s	90 s
Tiempo de pico	48.500 s	45 s

La respuesta del controlador PID con un AG se muestra en la figura 8.

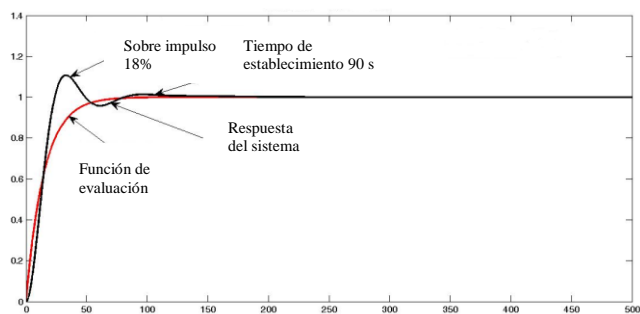


Figura 8: Planta con controlador PID genético.

7. Conclusión

Si comparamos los resultados obtenidos que se reportan en la tabla 4, observamos que el controlador PID sintonizado por el AG muestra un desempeño que mejora tanto el sobre impulso máximo como el tiempo de establecimiento; por otra parte en las figuras 7 y 8 se grafican las respuestas del sistema con Ziegler-Nichols y con el AG respectivamente, comparando ambas respuestas se observa que el AG logra una mejor sintonización del control PID.

Abstract

This work presents an algorithm designed to find the parameters to improve the performance of a Proportional Integral and Derivative (PID) controller in a liquid level tanks system. It is one of the most commonly used controllers in industry. The proposed method, that determines the values of the PID controller parameters, is based on a Genetic Algorithm (GA) to obtain the values of constants K_p , K_i and K_d of the PID controller in a linear system of three liquid level tanks. In order to do a comparative study, the tuning was first performed with the Ziegler-Nichols method and integrated with the plant. Next, a genetic algorithm was used to tune the same controller. Then, the dynamic response obtained in both methodologies was compared, and the GA showed better results in the establishing time of the system as well as in the impulse of the system. In conclusion, for the studied system the method of tuning the parameters of the PID controller with a GA improves the control response in comparison to the Ziegler-Nichols method.

Keywords:

Genetic algorithm, PID control, liquid level tank system, Ziegler-Nichols method.

Referencias

- Suvadeep Banerjee, Ankush Chakrabarty, Sayan Maity, & Amitava Chatterjee. (2011). Feedback linearizing indirect adaptive fuzzy control with foraging based on line plant model estimation. *Applied Soft Computing*, 11.
- Santos, M. (2011). Un enfoque aplicado del control inteligente. *Revista Iberoamericana e Informatica Industrial*.
- Shaoming, L., Peng, Y., Fan, Y., & Guoli, Z. (2014). On Lime Kiln Temperature System Based on GA Fuzzy PID Algorithm and Optimal Control. *IEEE*.
- Singh, S. K., Boolchandani, D., Modani, S. G., & Katal, N. (2016). Optimal Tuning of PID Controller for Centrifugal Temperature Control System in Sugar Industry Using Genetic Algorithm. *Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer*.
- Wati, D. A., & Hidayat, R. (2013). Genetic Algorithm-based PID Parameters Optimization for Air Heater Temperature Control. *IEEE. Universidad el Pais Vasco*. (n.d.). From www.sc.ehu.es/ccwbayes/docencia/mmcc/docs/temageneticos.pdf
- Verma, S., & Mudi, R. K. (2015). Genetic Algorithm-Based Adaptive PID Controller. *Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer*.
- Zhao, R. X., Wang, X. J., & Teng, F. (2014). The PID Control System of Steam Boiler Drum Water Level Based on Genetic Algorithm. *IEEE*.
- Davood Mohammadi Souran, Seyed Hamidreza Abbasi, & Faridoun Shabaninia. (2013). Comparative study between tank's water level control using PID and fuzzy logic controller. *Computing Applications*, 195.
- Dos Santos Coelho, A., & Victhoff Pessoa, M. (2014). A tuning strategy for multivariable PI and PID controllers using differential evolution combined with chaotic zaslavskii map.

- Dorf C. R., & Bishop R. (2016). *Modern Control Systems*. U.S.: Pearson.
- Esmat Rashedi, Hossein Nezamabadi , & Saeid Saryazdi. (2009). A Gravitational Search Algorithm. *Information Sciences* , 179.
- Fini, A. M., Mahdi Bahar Gogani, & Mahdi Pourgholi. (2015). Fuzzy Gain Scheduling of PID controller implemented on real time level control. *IEEE*.
- Gestal, M., & Rivero, D. (2010). *Introducción a los Algoritmos Genéticos y la Programación Genética*. España: Universidad de Coruña.
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning* . Estados Unidos : Addison-Wesley.
- Moharam, A., Mostafa, A., & Al-Hosseini, A.-A. (2016). Design of optimal PID controller using hibrid differential evolution and particle swam optimization whith an aging leader and challengers. *Applied Soft Computing* , 38.
- Ogata, K. (2014). *Ingeniería de control moderna*. México: Person.
- recursostic.educacion.es*. (2017). From http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/4esotecnologia/quincena11/quincena11_contenidos_2a_hm
- Ritu Rani De, & Rajani K Mudi. (2014). Fuzzy logic based high performance PID controller. *IEEE*.