

Sistema de Control Borroso para Tanques de Drenaje

Mercedes Ramírez Mendoza

José Arnulfo Aguilera Martínez

Manuel González Valdez

RESUMEN / ABSTRACT

En este artículo se realiza el diseño y la simulación de un sistema de control de nivel para los tanques de drenaje del Metro de Caracas empleando técnicas de control borroso. El sistema incluye un accionamiento constituido por un motor de inducción alimentado con un inversor (PWM). Previamente se presentan las generalidades del proceso y los conceptos generales del control borroso que se aplican en el diseño del sistema de control propuesto, evaluado con el software MATLAB[®]. Los resultados obtenidos permiten concluir que el control borroso garantiza el cumplimiento de los requerimientos del proceso eficazmente.

Palabras claves: control inteligente, control de nivel, lógica borrosa, motor de inducción.

Fuzzy Control System for Drainage Tanks

In this paper it's will be realized the design and simulation of a level control system for drainage wells from Caracas's Subway employing fuzzy control techniques. The system includes a drive consisting of an induction motor fed by an inverter (PWM). Previously presented an overview of the process and the general concepts of fuzzy control applied in the design of the proposed control system, evaluated with MATLAB software. The results show that the fuzzy control ensures compliance with the requirements of the process effectively.

Key words: Fuzzy logic, intelligent control, induction motor, level control.

INTRODUCCIÓN

En las instalaciones del Metro de Caracas se encuentran sistemas de drenaje de aguas pluviales y de aguas negras.

Estos sistemas están formados por un conjunto de bombas, tanques de almacenamiento y tableros de control emplazados entre las diferentes estaciones de pasajeros, y su principal objetivo es el desalojo permanente del agua acumulada en el subsuelo (Nivel Freático) hacia el sistema público de aguas servidas, con la finalidad de evitar que se produzca la inundación de la vía férrea y que los lugares donde están situados no sufran afectaciones por acumulación de agua,¹

Como antecedentes de este trabajo, se realizó una investigación para mejorar el control del sistema objeto de estudio, a través de la cual se desarrolló un modelo matemático multivariable de los pozos. Las variables de importancia para el control según este modelo son el nivel del pozo y el pH del agua y las variables manipuladas el caudal de salida de la bomba que vacía el pozo y el caudal de las sustancias químicas que permiten controlar el pH, teniendo el caudal de lluvia como perturbación.

Este modelo tiene como inconvenientes que resulta difícil medir el flujo de agua de lluvia por las características aleatorias de este proceso natural y la medición del pH es complicada y en general la estrategia planteada necesitaría incluir los flujos de otras sustancias básicas y ácidas.

En la actualidad existe un control de dos posiciones (on-off), que emplea cuatro sensores de tipo flotante y contactores para ejercer el control del nivel del pozo de drenaje, mediante el encendido y apagado de dos bombas eléctricas sumergidas. En el Metro de Caracas, una propuesta para automatizar el control del nivel en los pozos de drenaje debe satisfacer ciertos requerimientos de seguridad, ya que es necesario evitar que los tanques rebasen el nivel máximo, pues en caso de desbordamiento, las vías férreas se inundarían, lo que provocaría la interrupción del servicio, no se podría circular por esta zona y esto altera el tráfico lo que trae pérdidas económicas para la instalación y pérdidas de equipamiento en el caso en que el nivel del agua provoque cortocircuitos en el sistema eléctrico. En el caso contrario, o sea, que el nivel esté por debajo del mínimo requerido (0.5 m), las bombas sufrirían daños que podrían ser irreversibles pues son bombas sumergidas que para trabajar correctamente necesitan encontrarse bajo un determinado nivel del líquido, y estos daños implican también pérdidas económicas o en otro caso, el riesgo de mal funcionamiento del sistema.

El sistema de control que actualmente está en uso ofrece buenos resultados siempre y cuando el proceso no se someta a fuertes lluvias o cambios bruscos en el flujo de entrada al tanque¹. Cuando se producen estas perturbaciones el sistema no garantiza la evacuación necesaria del agua lo que ocasiona las afectaciones antes referidas. Por ello el objetivo del presente trabajo es diseñar y poner a punto, mediante simulación, un sistema de control del nivel para un tanque de drenaje, empleando técnicas de control borroso, que garantice el mantenimiento de un nivel adecuado frente a diferentes cambios en las perturbaciones, lo que permitiría evaluar la propuesta para una posible implementación en el Metro.

Desde hace algún tiempo la lógica borrosa se ha estado utilizando con éxito para el control de los accionamientos de frecuencia variable, es por esto que se ha tomado esta vía para intentar el control del proceso objeto de estudio, cuyas características se advienen al uso de esta técnica por la variabilidad del flujo de entrada y la dificultad para medirlo con exactitud. Por otra parte el control de los motores eléctricos mediante conjuntos de conmutación “Todo o Nada” aunque es una solución que se utiliza para el accionamiento de una amplia gama de máquinas conlleva limitaciones que pueden ser eliminadas con el empleo de los variadores de velocidad electrónicos, los cuales garantizan la aceleración y deceleración progresivas y permiten adaptar la velocidad a las condiciones de explotación de forma muy precisa. Según la clase del motor, se emplean variadores de tipo rectificador controlado, convertidor de frecuencia o regulador de tensión. En este diseño será empleado un convertidor de frecuencia.

El trabajo está estructurado de la siguiente forma, inicialmente se describe el sistema de drenaje, a continuación se plantean los modelos que representan a los diferentes componentes del sistema de control propuesto, luego se habla sobre el diseño del sistema de control borroso, se describen algunos experimentos de simulación realizados y finalmente se ofrecen las conclusiones del trabajo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sistema de drenaje del Metro de Caracas.

Anteriormente se mencionó que el sistema de drenaje del Metro de Caracas está compuesto por un conjunto de tanques de almacenamiento, bombas y tableros de control, que se encuentran emplazados entre las distintas estaciones de pasajeros. Las aguas negras y las aguas pluviales, corren hacia los tanques, evitando la acumulación del líquido en el subsuelo, la inundación de la vía férrea y de los lugares donde están instalados y con ello los correspondientes fallos de diversos tipos que pudieran ocasionarse. Cada pozo luego debe drenar esta agua hacia el sistema público de aguas servidas.¹

Cada uno de los pozos del sistema de drenaje referido posee, además de una ubicación diferente, características particulares de largo, ancho, altura, capacidad, nivel de ceba o nivel mínimo para el funcionamiento de las bombas, entre otras. Para este trabajo se eligió uno de los tanques del sistema cuyas características más significativas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características del tanque.

Largo	9.50 m
Ancho	2.60 m
Alto	2.15 m
Capacidad	53 110 l
Cap. Real reboso	41 990 l
Nivel de ceba	0.50 m
Largo	9.50 m
Ancho	2.60 m
Alto	2.15 m
Capacidad	53 110 l
Cap. Real reboso	41 990 l
Nivel de ceba	0.50 m

Otro dato importante es el Tiempo de reboso que según los especialistas del metro es de 45 minutos. Entonces podemos decir que $\text{Cap. real reboso} / \text{Tiempo de reboso}$ dará como resultado el flujo de entrada estimado el cual es 933.1 /min, es decir 15.55 l/s o 0.015 m³/s. Las dos bombas electro-sumergibles a emplear son iguales y el flujo máximo de salida de cada una es: $Q_s = 64 \text{ l/s}$ o 0.064 m³/s.

Se puede constatar entonces que entre ambas bombas se logra extraer un total de: $Q_{s\text{Total}} = 0.128 \text{ m}^3/\text{s}$ que es muy superior al flujo de entrada $Q_e = 0.015 \text{ m}^3/\text{s}$ que se empleó para calcular el Tiempo de reboso que se brinda en los datos del tanque.

En la figura 1 se muestra el esquema del proceso.

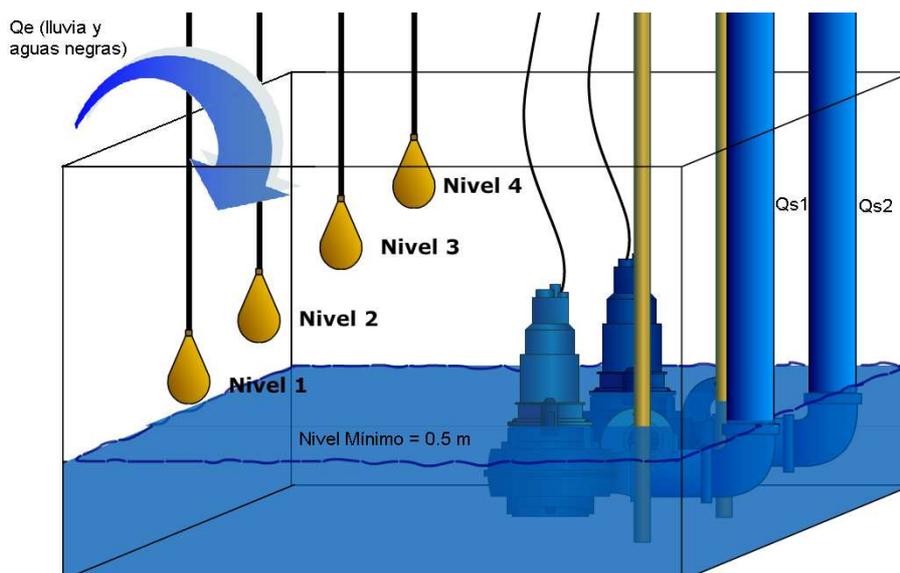


Figura 1. Esquema del proceso.

Modelo de los componentes del sistema de control.

A continuación se muestran los modelos matemáticos de los componentes del sistema de control propuesto para el tanque de drenaje.

Modelo del tanque.

Para modelar el tanque o pozo de drenaje se realiza un balance de masa que ofrece como resultado la siguiente expresión:

$$H(s) = \frac{Q_e(s) - Q_s(s)}{As} \quad 1)$$

donde:

H es el nivel en el tanque.

Q_e es el flujo de entrada al tanque.

Q_s es el flujo de salida.

A es el Área de la sección transversal del tanque.

Modelo de la bomba

Como se trata de una bomba centrífuga la ecuación que describe su comportamiento dinámico es:

$$\frac{dQ_s}{dt} = \frac{(k_p * m(t)) - Q_s}{\tau_p} \quad 2)$$

donde:

K_p es el coeficiente de la bomba.

$m(t)$ es el parámetro relacionado con la velocidad del motor de la bomba.

τ_p Es la constante de tiempo de la bomba.

Q_s es el flujo de salida de la bomba.

Variando el parámetro $m(t)$ es posible variar el flujo de salida mientras que la ganancia de la bomba y su constante de tiempo se mantienen constantes.^{1 2}

Modelo del sensor.

Para medir el nivel se propone un transmisor de nivel ultrasónico KOBOLD EchoKing NEO-5003, el cual no requiere contacto con el fluido, por lo que no requiere un mantenimiento frecuente. El mismo posee un rango de entrada de 0 a 8 m y un rango de salida de 4 a 20 mA. Dadas las características ofrecidas en el manual del fabricante^{1 3} se trata de un dispositivo de comportamiento lineal con una dinámica despreciable frente a la del proceso, lo que permitió considerar su modelo como una ganancia de 2 mA/m.

Modelo del accionamiento eléctrico de las bombas.

Los variadores de velocidad electrónicos constan de dos módulos, normalmente integrados en una misma envolvente: un módulo de control, que gestiona el funcionamiento del aparato y un módulo de potencia, que suministra energía eléctrica al motor.

Todas las funciones de los variadores modernos se controlan por medio de un microprocesador que utiliza los ajustes, las órdenes transmitidas por un operador o por una unidad de tratamiento y los resultados de las medidas de velocidad,

corriente y demás. En base a estos datos, el microprocesador gestiona el funcionamiento de los componentes de potencia, las rampas de aceleración y deceleración, el seguimiento de la velocidad, la limitación de corriente, la protección y la seguridad.

En este caso se pretende suministrar los ajustes a través de un controlador lógico programable (PLC). Además se trata de un sistema dotado con amplificación de potencia que funciona a lazo abierto. La velocidad del motor queda determinada por una tensión de referencia. Para un valor dado de la consigna, la velocidad puede variar en función de las perturbaciones (variaciones de la carga). El rango de velocidad se expresa en función de la velocidad nominal.

El convertidor de frecuencia, que se alimenta de la red a tensión y frecuencia fijas, garantiza la alimentación del motor de corriente alterna con tensión y frecuencia variables, en base a las exigencias de velocidad. El circuito de potencia consta de un rectificador y de un ondulator que, partiendo de la tensión rectificada, produce una tensión de amplitud y frecuencia variables.

Para el accionamiento de las bombas centrífugas se propone utilizar un motor de inducción industrial de 20 HP, 460 V, 1760 rpm, alimentado a través de una fuente inversora de tensión sinusoidal(PWM), la cual opera bajo la Teoría del Campo Orientado ^{1,2}.

El inversor es construido completamente con bloques Simulink® standard. La frecuencia base de la onda sinusoidal de referencia es 60 Hz, mientras que la frecuencia de la onda triangular portadora se establece en 1980 Hz. Su salida pasa a través de bloques de fuentes controladas por voltaje antes de ser aplicada a los devanados del estator de la máquina asincrónica. El par de carga aplicado al eje de la máquina es constante y se establece en su valor nominal de 11,9 N.m. El motor se arranca desde el reposo y la referencia de velocidad se establece en 1760 rpm; alcanzándose esta velocidad al cabo de 0,1 s.

En la figura 2 puede apreciarse la parte del diagrama de bloques Simulink correspondiente al sistema de control a lazo abierto de la velocidad del motor.

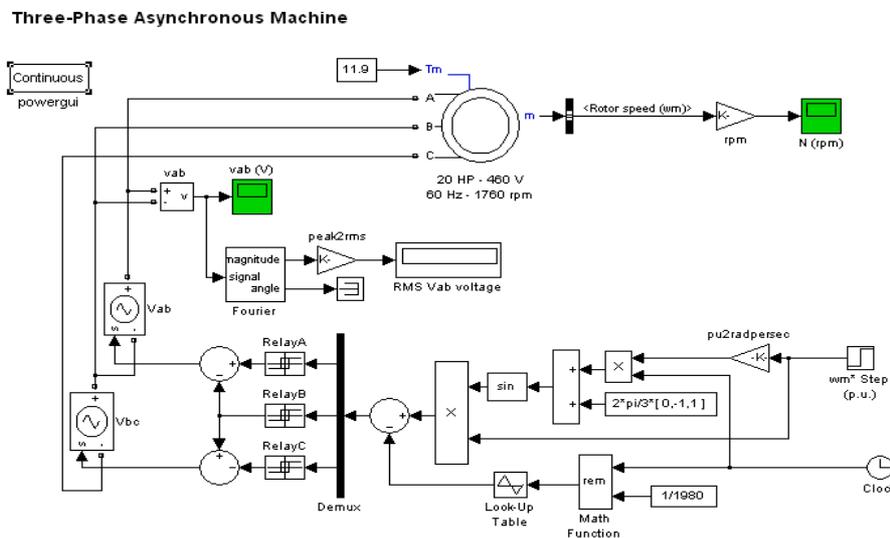


Figura 2. Diagrama de bloques Simulink del control de velocidad a lazo abierto en un motor de 20 HP, 360 V, 1760 rpm.

Generalidades sobre los sistemas borrosos.

En el ámbito del control de procesos una de las alternativas más destacadas y que presenta mayor número de contribuciones en los últimos años, es el empleo de estructuras borrosas. Ésta se basa en el uso de una descripción lingüística del proceso, en vez de precisar las relaciones matemáticas entre las variables. Los modelos borrosos o Fuzzy son útiles para la descripción de los procesos complejos en los que se no se conocen todas las dinámicas involucradas.

Entre las metodologías desarrolladas en el ámbito del modelado borroso se encuentran los sistemas basados en reglas, que son los más empleados debido a su interpretabilidad, se basan en el mapeo del conjunto de variables de entrada sobre el conjunto de variables de salida a través de una colección de reglas Si-Entonces (If Then). Dependiendo de la estructura de las reglas, existen distintos tipos de modelos borrosos basados en reglas como pueden ser los modelos lingüísticos, los relacionales y los Takagi-Sugeno(TS),^{3 4}.

La estructura de las reglas de los modelos lingüísticos presenta la forma descrita en la ecuación siguiente:

$$\text{Si } x \text{ Es } A \text{ Entonces } z \text{ Es } B \quad 3)$$

Donde:

la proposición 'x es A' es el antecedente de la regla.

la proposición 'z es B' es el consecuente.

Por tanto, x y z son variables lingüísticas definidas como conjuntos borrosos con dominio $X \in \mathbb{R}^n$ y $Z \in \mathbb{R}^n$ respectivamente. Los términos A y B son conceptos lingüísticos constantes que definen un valor cualitativo del sistema en un punto concreto del espacio de variables, por ejemplo temperatura alta, nivel bajo, presión alta, etc. En consecuencia, los conjuntos borrosos definen de cierta manera un conjunto de puntos de referencia espacio de variables^{3 4}, definiéndose como conjuntos borrosos de referencia. Las funciones de pertenencia para describir los conjuntos borrosos de referencia se definen como funciones matemáticas paramétricas o como tablas de valores que se almacenan en una base de datos como parte del sistema borroso. En general, se pueden definir múltiples términos lingüísticos A_i en el dominio de una única variable, denominándose partición borrosa de una variable a la colección de los conjuntos borrosos $[A_1, A_2, \dots, A_M]$. El número de particiones del dominio de la variable depende de la granularidad y por tanto de la precisión de representación del modelo.

Los modelos lingüísticos no asumen ninguna dependencia estructural entre las variables de los antecedentes y los consecuentes. Simplemente son una colección de reglas, donde cada una define un punto en el espacio de variables definido por el producto de las variables de los antecedentes y los consecuentes.

La base de reglas junto con la base de datos de las funciones de pertenencia forman la base de conocimiento del sistema borroso. El mapeo entrada-salida se realiza empleando un mecanismo de inferencia borroso unido a la base de reglas y los conjuntos de referencia definidos, de manera que a partir de un conjunto borroso de entrada se obtiene un conjunto borroso de salida.

En el caso de los modelos TS la estructura de la base de reglas es como se muestra en la ecuación siguiente:

$$\text{Si } x \text{ Es } A_i \text{ Entonces } y_i = f_i(x) \quad 4)$$

Donde

$$y_i = f_i(x) = a_i^T x + b_i \quad 5)$$

En general, las funciones $f_i(x)$ presentan estructuras afines, tal y como muestra la ecuación (5), donde a_i es el vector de parámetros y b_i es un escalar. Por tanto, cuando $a_i = 0$ los modelos TS son equivalentes a los modelos lingüísticos donde el consecuente es un número real, como se hace en el presente trabajo.

Los modelos TS combinan una descripción global del sistema mediante la base de reglas, y una aproximación local mediante las funciones empleadas en los consecuentes.³⁴

La salida del modelo, o lo que es lo mismo, la inferencia y el desemborronado del sistema se obtiene mediante el cálculo de la media ponderada de cada una de las reglas, tal y como se indica en la ecuación (6).

$$y = \frac{\sum_{i=1}^k \mu_{A_i}(x) y_i}{\sum_{i=1}^k \mu_{A_i}(x)} \quad (6)$$

Donde:

k es el número de reglas

μ_{A_i} es el grado de pertenencia del antecedente de cada una de las reglas.

Diseño del controlador borroso.

Para llevar a cabo el diseño del controlador borroso (CLB), se seleccionaron como variables lingüísticas de entrada el nivel y el cambio del nivel en el pozo y como variables de salida el flujo a extraer por cada una de las bombas, tomándose para las primeras funciones de pertenencia trapezoidales, en la figura 3 se muestra como ejemplo la partición realizada a la variable Nivel.

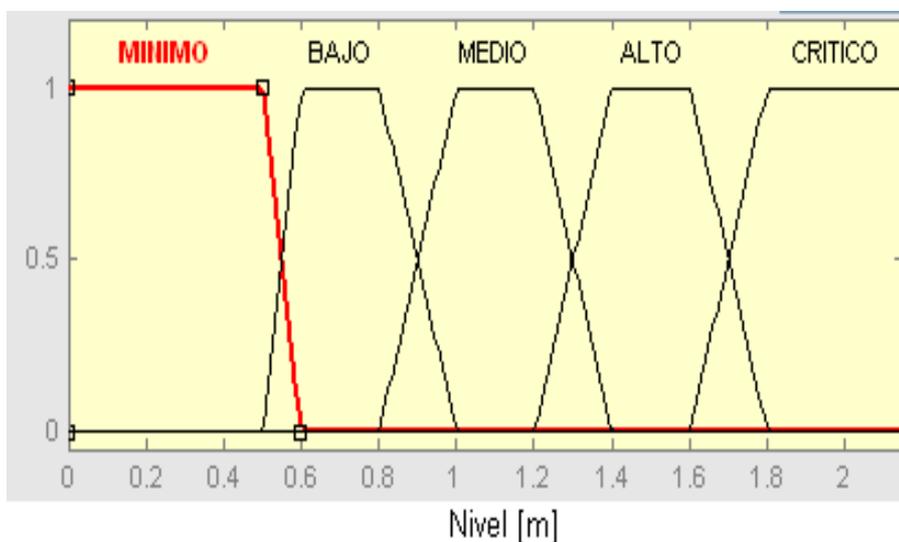


Figura 3. Partición de la variable lingüística Nivel

En el caso de la variable de salida se tomaron como acciones apagar, disminuir, mantener, aumentar y máximo, atributos que se corresponden con valores de flujo deterministas que se garantizan actuando sobre el parámetro $m(t)$ de cada bomba.

En la figura 4 se muestra la configuración básica del esquema propuesto

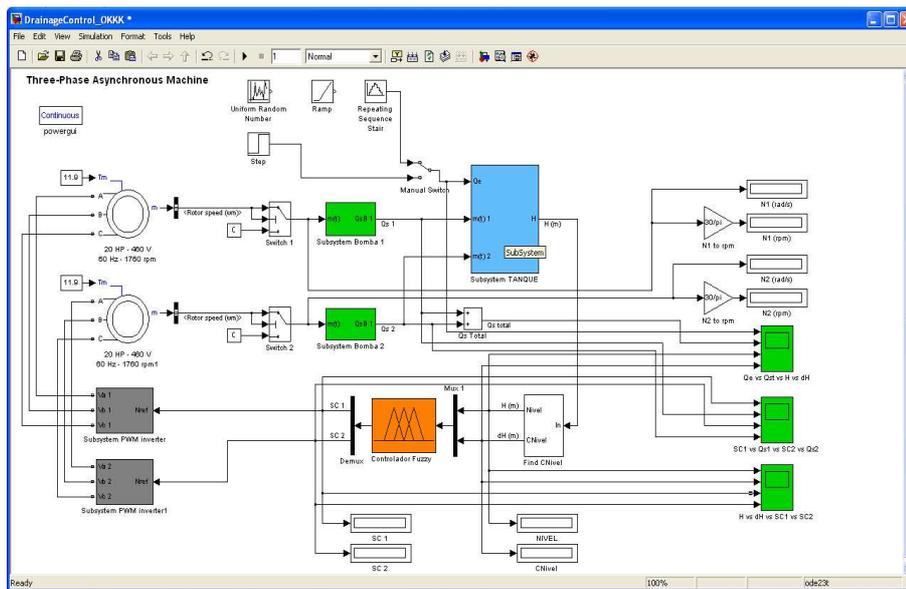


Figura 4. Esquema de simulación del sistema de control para el drenaje de los pozos.

Las reglas borrosas utilizadas están basadas en la intuición y se plantearon buscando que el nivel del tanque no alcance el estado crítico y que para flujos de entrada grandes, el nivel se mantenga lo más bajo posible. Es decir, que no solo se actúa de acuerdo a la altura que tiene el líquido en un instante dado, sino que se trata de prever el salto a un estado superior, y que además, tenga siempre al menos el nivel mínimo de 0.5 m.

Resultados

A continuación se ofrecen los resultados de las simulaciones realizadas con el sistema de control propuesto. Para las mismas se utilizó el diagrama Simulink representado en la figura 4.

El sistema de control fue puesto a prueba con señales de entrada que simulan flujos de entrada diversos. Algunos de estos elementos pueden verse también en la figura 4, y en todos los casos se utilizó un flujo de entrada tal que $Q_e > Q_{sTotal}$, durante un tiempo variable, de tal forma que el sistema es forzado a trabajar en condiciones críticas.

Los resultados obtenidos muestran que a pesar de producirse fuertes variaciones del flujo de entrada, el CLB responde rápidamente a los cambios y el nivel no rebasa los límites establecidos, es decir, no llega a su estado crítico, lo cual evidencia el buen desempeño del lazo de control propuesto.

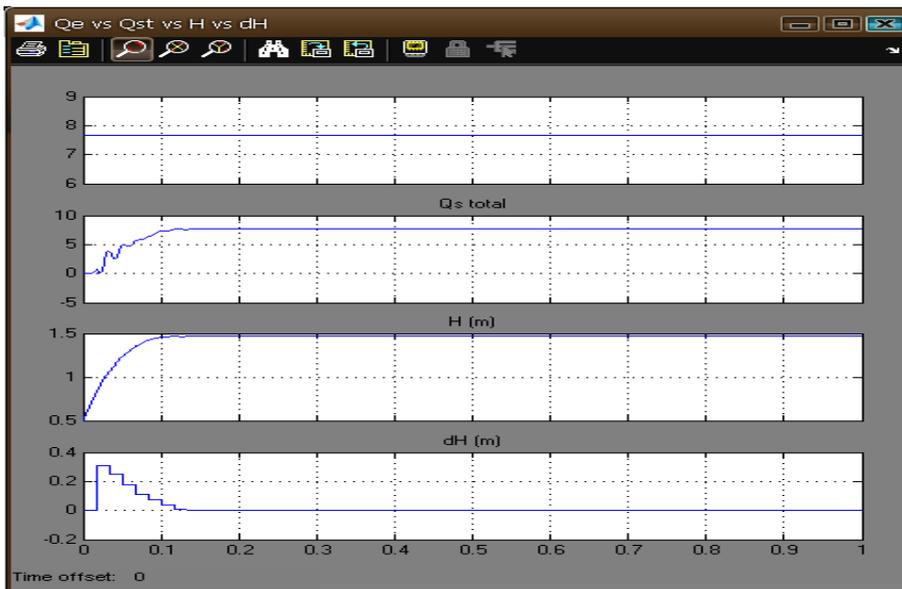


Figura 5. Comportamiento del flujo de salida, del Nivel y del cambio del nivel ante un cambio en el flujo de entrada máximo tipo escalón de 7.68 m³/min.

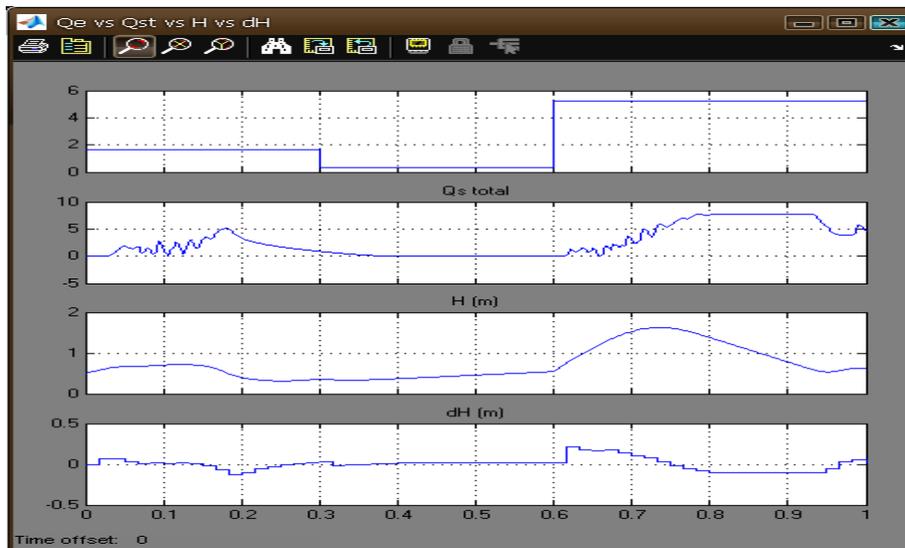


Figura 6. Comportamiento de las variables Q_s Total, Nivel y CNivel cuando Q_e cambia cada 0.3 horas.

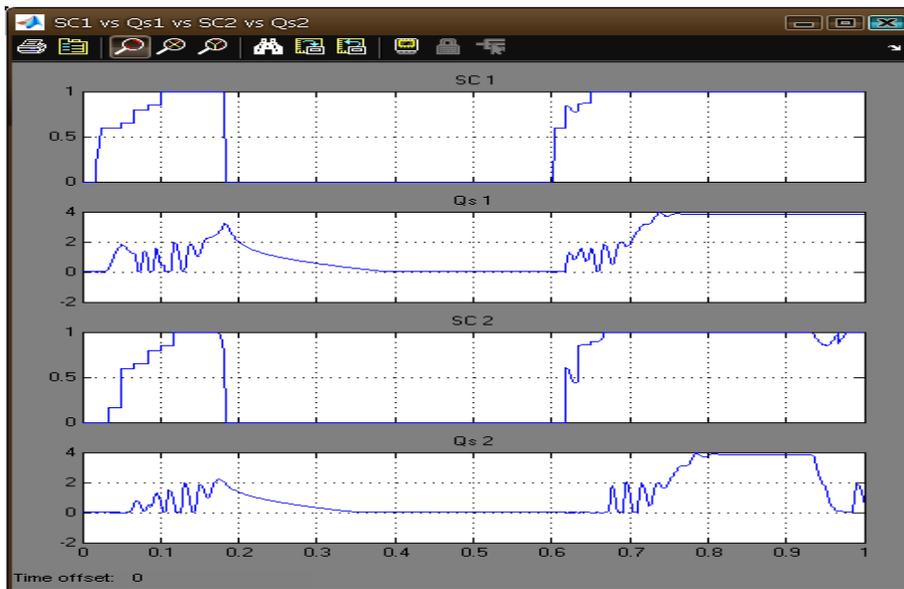


Figura 7. Flujos de Salida de las Bombas 1 y 2 con las respectivas salidas del controlador para el mismo caso de la figura 6.

Las oscilaciones en los flujos de salida se atribuyen a las respuestas de los motores ante las variaciones en los valores de referencia que llegan al inversor (SC1 y SC2).

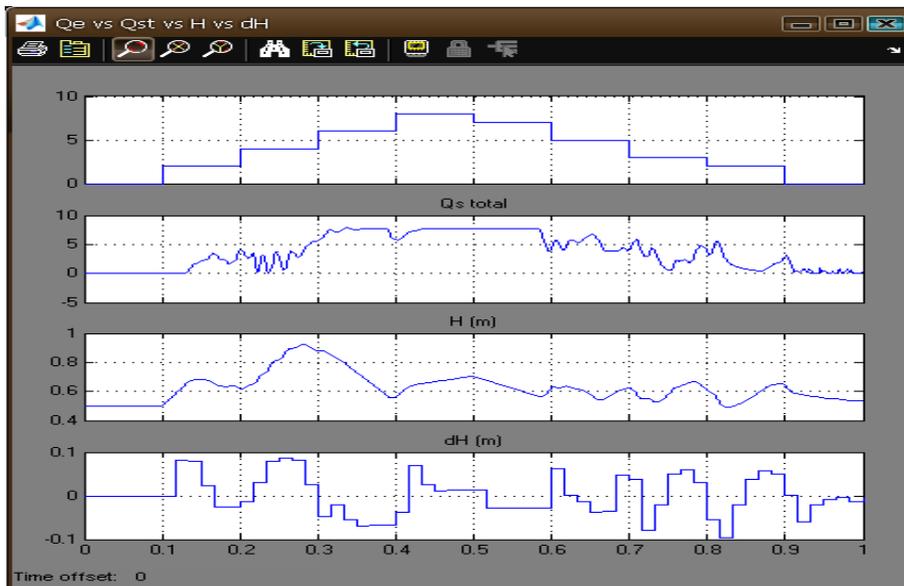


Figura 8. Comportamiento del Qs_{Total} , del Nivel y el CNivel cuando Q_e que se incrementa cada 0.1 horas hasta alcanzar un máximo de 8 m³/min para luego ir descendiendo hasta 0 m³/min.



Figura 9. Flujos de Salida de las Bombas 1 y 2 con las respectivas salidas del controlador para el mismo caso de la figura 8.

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones del sistema de control realizadas para diferentes condiciones de operación se observa que:

Se mantiene un nivel mínimo de 0.5 m en el tanque.

Se evita el desbordamiento del tanque aún en situaciones extremas donde el flujo de entrada es mayor que el flujo máximo de salida y donde la perturbación se mantiene durante un tiempo prolongado.

CONCLUSIONES

Se realizó el diseño y puesta a punto a través de simulación de un sistema de control de nivel para el proceso de drenaje del Metro de Caracas usando una estrategia de control borroso. Para lograr el objetivo planteado se diseñó un Controlador Lógico Borroso que a partir de mediciones de nivel y de cambios en este último, modifica el flujo de salida de las bombas del sistema de control objeto de estudio.

El estudio incluyó la utilización de un accionamiento eléctrico para manejar las bombas centrífugas compuesto por un motor de inducción alimentado a través de una fuente inversora de tensión sinusoidal (PWM), la cual opera bajo la Teoría del Campo Orientado.

Se concluye entonces que con la utilización de esta estrategia de control se obtienen resultados favorables, pues el sistema funciona correctamente y se observa la capacidad del mismo para adaptarse a perturbaciones diversas y donde puedan existir variaciones en los parámetros del proceso.

REFERENCIAS

1. **GONZÁLEZ, M., GUZMÁN, D., INSERS, K., MARRERO, S., COLUMBIÉ, A.:** “Modelación y Simulación para el Control del Drenaje de los Pozos del Metro de Caracas”, presentado en *XIV Convención Científica de Ingeniería CUJAE*, La Habana, Cuba, 2008. (Trabajo presentado en un congreso).
2. **ROJAS, L.D.:** “Accionamiento Eléctrico Asíncrono para Transporte Eficiente de Pulpa Laterítica”, *Tesis de Dr. en Ingeniería*, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba, 2006.
3. **KOBOLD ECHOKING NEO-5003 SERIES.:** “Ultrasonic Level Transmitter. User Instructions” KOBOLD Instruments Inc. 1801 Parkway View Drive Pittsburgh PA 15205, 2008.

4. **GARCÍA-NIETO, S.:** "Identificación y Control Predictivo Fuzzy TS en Espacio de Estados. Una Aproximación al Control No Lineal" , *Tesis de Dr. en Ingeniería*, Universidad Politécnica de Valencia, España, 2010.
5. **BABUSKA, R., & VERBRUGGEN, H.B.:** "An overview of fuzzy modeling for control", *Control Engineering Practice*, pp. 1593-1606, 1996.

AUTORES

Mercedes Ramírez Mendoza, Ingeniera en Automática, Dra. En ciencias Técnicas, profesora Titular, Universidad de Oriente, Cuba, c/Heredia #797, Santiago de Cuba, e-mail: mramirez@fie.uo.edu.cu

José Arnulfo Aguilera Martínez, Ingeniero en Automática, Universidad de Oriente, Cuba, Habana # 507 Santiago de Cuba, e-mail: jose.aguilera@fie.uo.edu.cu

Manuel González Valdez, Ingeniero Electromecánico, MSc., profesor Asociado, IUT "Dr. Federico Rivero Palacio", código postal 1212, Estado Miranda, Venezuela. e-mail: raduga535@yahoo.es