

REPÚBLICA DE CUBA  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO “Dr. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ”  
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECHANICA

---

**TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO  
ACADÉMICO DE MÁSTER EN ELECTROMECHANICA**

**TÍTULO: MODELACIÓN, SIMULACIÓN Y CONTROL  
DEL SISTEMA DE DRENAJE DE LOS  
POZOS DEL METRO DE CARACAS**

**AUTOR: Ing. MANUEL GONZALEZ VALDEZ**

**TUTORES: Dr. C. DANIEL GUZMÁN DEL RÍO  
Facultad de Informática y Matemática  
Universidad de Holguín**

**Dr. C. SECUNDINO MARRERO RAMIREZ  
Facultad de Metalurgia y Electromecánica  
Instituto Superior Minero Metalúrgico**

**Dr. C. LUIS DELFIN ROJAS PURON  
Facultad de Metalurgia y Electromecánica  
Instituto Superior Minero Metalúrgico**

**CARACAS – 2009**

**TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO ACADÉMICO DE  
MÁSTER EN ELECTROMECHANICA**

---

**MODELACIÓN, SIMULACIÓN Y CONTROL DEL  
SISTEMA DE DRENAJE DE LOS POZOS DEL METRO  
DE CARACAS**

**Ing. MANUEL GONZALEZ VALDEZ**

---

**Departamento de Ingeniería Eléctrica  
Instituto Universitario de Tecnología “Dr. Federico Rivero Palacio”**

**CARACAS - 2009**

DEDICATORIA

## DEDICATORIA

---

*A mis hijos*

*A mi esposa*

*A mis queridos hermanos*

*A la memoria de mi madre Alba*

*A la memoria de mi abuela Aípa*

*A tu memoria, Manuel, mi padre, en tu día.*

*El Autor.*

## AGRADECIMIENTOS

---

A mi tutor *Dr. C. Daniel Guzmán Del Río* por su invaluable aporte y su dedicación a ayudarme a hacer este sueño posible.

A los Coordinadores del Programa Doctoral *Dr. C. Secundino Marrero Ramírez* y *Dr. C. Enrique Torres Tamayo* por su ayuda incondicional, por impulsarnos todo el tiempo para alcanzar esta meta.

A todos los profesores integrantes del claustro doctoral, quienes nos han dado ejemplo de solidaridad, capacidad y entrega, y han sembrado en nosotros la semilla del amor por la Ciencia y la Investigación.

Al profesor Rafael Hernández, Jefe del Departamento de Química del IUT “Dr. Federico Rivero Palacio”, por su orientación y apoyo en el tema de control de pH.

Deseo también expresar mi más profundo agradecimiento a la Compañía Anónima Metro de Caracas, en especial al Dr. Mario Cantone, al Ingeniero Domingo Reyes y al Señor Oscar Nieves, por su colaboración desinteresada y solidaria durante el desarrollo de esta investigación, así como también a los Ingenieros Daniel Amaro y Erick Méndez, por el apoyo brindado a esta investigación durante su período de pasantías.

A todas las personas de quienes siempre tuve una palabra de aliento en los momentos difíciles.

***Mis sinceros agradecimientos, muchas gracias.***

***El autor***

## **RESUMEN**

En el presente trabajo se expone el desarrollo de un modelo matemático y la simulación de un sistema multivariable aplicado a los pozos que recogen las aguas de escorrentía en los túneles del Metro de Caracas. Las variables de importancia para el control en este sistema son el nivel del pozo y el pH del agua, y las variables manipuladas son 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 del sistema. Otro aspecto que se expone es la simulación en lazo abierto empleando el Matlab\Simulink que permite observar la respuesta dinámica del sistema ante variaciones en sus entradas. También se diseña, basado en técnicas de control multivariable clásico y de avanzada, una estrategia que permita valorar el comportamiento en lazo cerrado del control del sistema de drenaje de las aguas residuales (nivel y pH) en el Metro de Caracas. Finalmente se realiza un estudio económico, ambiental y social del sistema de drenaje del Metro de Caracas. Se analizan las pérdidas actuales existentes en el mismo por no contar con un control eficiente que permita su explotación racional, con mínimos costos operativos y de mantenimiento de los sistemas de bombeo. También son objeto de estudio, los impactos actuales sobre el medio ambiente y la sociedad.

**PALABRAS CLAVES:** Control multivariable, Modelación matemática, Control de pH, Control de Nivel, Simulación.

## **ABSTRACT**

The present paper describes the development of a mathematical model and simulation of a multivariable system applied to the wells that collect water runoff in the tunnels of the Metro de Caracas. The variables of importance for the control in this system are the level of the well and the pH of the water, and the manipulated variables are the flow output of the pump that empties the pit and the flow of chemicals to control pH, taking the flow of rain as the system disturbance. Another aspect that sets the open loop simulation using the Matlab \ Simulink which shows the dynamic response of the system to changes in their entries. It was also designed based on multivariable control techniques of classical and advanced a strategy to evaluate the behavior in closed loop control of the drainage system of the wastewater (pH level) in the Caracas Metropolitan Transport. Finally an economic study, environmental and social performance of the drainage system of the Caracas Metro. We analyze the current loss in the absence of an efficient control allowing their rational exploitation, with minimal operating costs and maintenance of pumping systems. Also under study, the current impacts on the environment and society.

**KEYWORDS:** Multivariable control, mathematical modeling, control pH, level control, Simulation.

<b>Índice</b>	<b>Pág.</b>
<b>Resumen</b>	
<b>Introducción</b>	1
 <b>Capítulo I Marco teórico metodológico</b>	
1.1 Introducción	9
1.2-Estado del arte	9
1.3 Caracterización del objeto de estudio.	15
1.3.1 Principales características de los suelos y sistema hídrico del Valle de Caracas	15
1.3.2 Gestión del Agua Subterránea en la ciudad de Caracas, Venezuela	16
1.3.3 Problema de las Aguas Negras	17
1.3.4 Principales características del metro de Caracas	17
1.3.5 Situación actual de los sistemas de drenaje del metro de Caracas	19
1.4 Sistema de control actual en el drenaje del Metro de Caracas	22
1.5 Conclusiones	27
 <b>Capítulo II Modelación y Simulación del Sistema de Drenaje</b>	
2.1 Introducción.	28
2.2 Flujo de Señal para las principales variables del Sistema de Drenaje.	28
2.3 Modelo matemático dinámico para el nivel de los pozos de drenaje	29
2.4 Modelación matemática dinámica del pH de las aguas de escurrimiento	31
2.4.1 Estudio experimental del pH de las aguas de escurrimiento de los pozos de drenaje del Metro de Caracas.	33
2.4.1.1 Concentración de elementos ácidos o básicos	34
2.4.1.2 Constantes de equilibrio para el acido, la base y el agua.	34
2.4.2 Modelo matemático del PH	35
2.5 Simulación a Lazo Abierto ante Variaciones en las Variables Manipuladas y perturbaciones	37
2.6. Conclusiones	54

## **Capítulo III Control Multivariable para el Sistema de Drenaje**

3.1	Introducción.	55
3.2	Clasificación actual de los sistemas de control.	55
3.3	Forma de definir los mejores pares de entrada salida	56
3.3.1	Técnica de la Descomposición en Valores Singulares (SVD)	57
3.4	Propuesta de control clásico. Control PID Multilazo	59
3.4.1	Técnicas de Control PID Multilazo	63
3.4.2	Métodos de Diseño y Sintonía para el Controlador PID Multilazo	65
3.4.2.1	Método de la Sintonía Secuencial	65
3.5	Propuesta de control avanzado. Control multivariable con Desacoplamiento	67
3.5.1	Método de Diseño y Sintonía del Controlador Multivariable Desacoplado	68
3.6	Simulación de los Sistemas de Control	71
3.6.1	Simulación ante Variaciones en las Variables Manipuladas	71
3.6.2	Simulación ante Variaciones en las Perturbaciones	72
3.7	Conclusiones	73

## **Capítulo IV Valoración Económica, Social y Ambiental**

4.1	Introducción.	74
4.2	Valoración Económica	74
4.3	Valoración Social	81
4.4	Valoración Ambiental.	83
4.5	Conclusiones	84
	<b>Conclusiones</b>	<b>86</b>
	<b>Recomendaciones</b>	<b>88</b>
	<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>89</b>

## INTRODUCCIÓN

---

La automatización es sin duda un aspecto de importancia estratégica en el sector industrial y de los servicios. El grado de automatización de algunos procesos es todavía muy bajo, el contenido tecnológico existente en cierto número de plantas donde existe automatización es muchas veces inferior al necesario. Estos aspectos provocan grandes pérdidas de energía, materia prima y una baja calidad del producto final, disminuyendo la competitividad de las empresas.

Con el desarrollo que han tenido en la última década las herramientas informáticas, la inversión en la automatización de los procesos aumenta significativamente, permitiendo que técnicas de control más elaboradas puedan ser implementadas. Debido a la gran diversidad de los procesos y a cuestiones de política industrial, esas mejorías en la automatización no son difundidas en todos los procesos, actualmente existen muchos donde la automatización es deficiente, particularmente en el área de transporte y servicios.

Actualmente los sistemas han incrementado su complejidad en la automatización de estos. Cuando los sistemas automáticos funcionan bien las intervenciones humanas son raras, pero si estos fallan se requiere que el personal a cargo conduzca el proceso a un punto estable sin peligro. Los psicólogos han reconocido desde hace mucho tiempo que la importancia del aprendizaje de una persona mejora bajo ciertas condiciones. Estas necesitan practicar sin presiones. Una situación no es adecuada en tiempo y lugar para aprender nuevas habilidades. De esta manera los modelos matemáticos son frecuentemente ideales para entrenar a una persona a hacer frente a diferentes situaciones antes de que estas ocurran (Klaus, 1995).

De esta forma se comprende que el conocimiento del proceso, el desarrollo de modelos matemáticos dinámicos, que representan los fenómenos, la simulación en computadora de sus características y por fin el proyecto e implementación de sistemas de control, es un tema de importancia fundamental para el desarrollo actual del sector industrial y de los servicios.

En la Republica Bolivariana de Venezuela, los servicios se han convertido en uno

de los pilares en los que se sustenta el desarrollo económico del país y es una esfera que enfrenta en la actualidad el reto del desarrollo y modernización, vía para lograr un alto nivel de satisfacción a los usuarios y de protección del medio ambiente. Este proceso integral de desarrollo y modernización no puede soslayar el perfeccionamiento tecnológico a partir de una aplicación consecuente de la ciencia y la técnica.

La compañía anónima “Metro de Caracas” es una empresa de servicio, dedicada a la explotación comercial de un sistema integrado de transporte, conformado por una red ferroviaria metropolitana (METRO), y una red alimentadora de transporte superficial, la cual presta el servicio público de transporte en forma efectiva, eficiente y confiable. Actualmente está constituido por cuatro líneas que transportan diariamente más de dos millones de personas.

Tres de sus líneas poseen un sistema de tracción con motores a corriente continua alimentados con 660 voltios, mientras que la cuarta línea posee un sistema de tracción con motores de corriente alterna.

### **Situación problemática**

El Metro de Caracas posee dentro de sus instalaciones Sistemas de Drenaje de aguas pluviales y de aguas negras, también llamados estructuras de ventilación, los cuales están conformados por un conjunto de bombas, tanques de almacenamiento, tableros de control y de transferencia, instalados entre las estaciones de pasajeros, cuyo objetivo es garantizar el desalojo permanente del agua acumulada en el subsuelo (nivel freático) hacia el sistema público de aguas servidas, a fin de evitar que por acumulación de estas se produzca inundación de las vías férreas y los ambientes donde están instaladas.

Entre los Sistemas de Drenaje de aguas pluviales, existen algunos ubicados en puntos de inflexión de la vía, lo que los hace mucho más críticos por la cantidad de agua que deben desalojar, estos puntos son llamados “Puntos Bajos”. Debido a lo neurálgicos que resultan ser estos puntos es necesaria su supervisión permanente.

Cuando el sistema de bombeo falla se producen inundaciones en la vía, lo que

provoca paralización del servicio comercial. Dado que el sistema Metro de Caracas es de suma importancia para el traslado diario en la ciudad, esto trae consigo un colapso del transporte superficial con pérdidas millonarias para la economía.

Actualmente en la gerencia del metro existe la división de Mantenimiento Mecánico que posee un personal que realiza tareas de supervisión y mantenimiento a equipos del Metro de Caracas, entre los cuales están las bombas de drenaje, pero el personal encargado es insuficiente para todo el espectro de tareas que tienen que realizar, por lo que la implementación de un control del nivel que sea capaz de asegurar una operación con menores costos energéticos de explotación y mayor calidad ambiental en las aguas a evacuar (control de PH), permitiría garantizar una mayor confiabilidad en el sistema de drenaje, aumentando la seguridad operativa de los trenes y de la vida de los pasajeros, facilitaría las labores de mantenimiento preventivo y generaría un aprovechamiento mas eficiente del recurso humano de esta división para labores de mantenimiento correctivo.

Con el perfeccionamiento del sistema de control existente se mejorará la confiabilidad de los sistemas de bombeo en los puntos bajos, con lo cual se lograrán los siguientes objetivos:

- a) Ofrecer un servicio de mayor seguridad tanto para los usuarios como para el personal que labora en el mantenimiento y explotación.
- b) Garantizar un funcionamiento eficiente y racional de los equipos asociados a estos sistemas que están relacionados directamente con la prestación del servicio comercial.
- c) Mayor eficiencia económica mediante la reducción de costos de mantenimiento, asociado a la utilización de personal para tareas de supervisión y a la disminución de la supresión de los servicios comerciales.
- d) Mejor utilización de las aguas pluviales y negras en tareas donde hoy se utilizan aguas tratadas, tales como el baldeo de calles, sistemas de riego, disminuyendo la contaminación ambiental.

El sistema de control de bombeo existente actualmente no garantiza la evacuación

de las aguas almacenadas en los pozos de drenaje con un consumo racional de energía, ni tampoco la calidad de las aguas vertidas en las tuberías de drenaje de la ciudad. Las aguas poseen un pH que influye en la formación de sales, las cuales disminuyen la sección útil de las tuberías, ocasionando a las bombas un trabajo en condiciones forzadas, y por tanto disminuyendo su vida útil.

El diseño de una nueva estrategia de control enmarcada en un ambiente multivariable, que tenga en cuenta variables tales como el nivel y el pH, como variables a controlar, mejorará la confiabilidad de los sistemas de bombeo en los puntos bajos, al mismo tiempo que garantiza un pH adecuado de las aguas que se envían al río Guaire, disminuyendo la contaminación ambiental.

### **Justificación**

El desarrollo de esta investigación permitirá racionalizar un proceso que actualmente se ejecuta de una manera poco eficiente e insegura, consumiendo tiempo y recursos económicos.

### **Problema Científico**

Ausencia de un sistema de control eficiente de los parámetros nivel y pH, que permita efectuar racionalmente el proceso de evacuación de aguas acumuladas en los túneles del metro de Caracas.

### **Objeto de Investigación**

El sistema de drenaje de los túneles del metro de Caracas.

### **Objetivo General**

Diseñar a partir de la modelación y simulación un sistema de control multivariable para la operación de los sistemas de drenaje del Metro de Caracas.

### **Campo de la Investigación**

Control de sistemas de bombeo, aplicado al sistema de drenaje de los túneles del Metro de Caracas.

### **Hipótesis**

Con la caracterización adecuada del sistema de drenaje de los pozos del metro de Caracas es posible conformar un modelo matemático dinámico, que permitirá evaluar a través de la simulación, el comportamiento e interrelación de todos sus principales parámetros y diseñar las técnicas de control que cumplan los requerimientos de explotación del mismo.

### **Alcance de la Investigación**

El sistema de control diseñado debe garantizar el control del pH y del nivel del pozo de modo que ambos se mantengan, ante perturbaciones, dentro de valores de explotación preestablecidos.

### **Aportes prácticos, económicos y medioambientales**

El control del sistema de bombeo con una mayor eficiencia energética contribuirá a hacer menos costosa la explotación del mismo. La simulación ante diferentes condiciones de explotación de los modelos obtenidos del sistema de drenaje, permiten el diseño de un sistema de control que racionalizará los parámetros de operación del sistema de drenaje del metro de Caracas en las 61 estaciones, que actualmente tienen bombas de potencias de 35 kW y 15 kW, con una disminución en los gastos de inversión y de explotación.

Adicionalmente, el control del pH proporcionará beneficios ecológicos a la comunidad y disminuirá las incrustaciones actuales de las tuberías y bombas que se deterioran mecánica y eléctricamente, dando mayor seguridad en los túneles a los usuarios, personal de explotación y mantenimiento de los trenes comerciales, lo que garantiza seguridad y minimiza las posibilidades de ocurrencia de eventos indeseables, perfeccionando así el plan de contingencia del metro Caracas.

**Objetivos Específicos**

- Modelar, con un enfoque multivariable, el sistema de drenaje de agua de los pozos del metro de Caracas, enfatizando en el pH y el nivel..
- Simular, con un enfoque multivariable, el sistema de drenaje de agua de los pozos del metro de Caracas, enfatizando en el pH y el nivel.
- Diseñar un sistema de Control Multivariable (pH y Nivel) para el Proceso de drenaje de los pozos del metro de Caracas.
- Realizar una valoración económica, social y medioambiental de los resultados obtenidos.

**Tareas de Investigación**

- Realizar la investigación bibliográfica a fin de establecer el estado del arte sobre el tema.
- Realizar un diagnóstico y tomar muestras de agua en la instalación hidráulica de un pozo del Sistema de drenaje.
- Seleccionar las principales variables de interés para la explotación del Sistema de drenaje.
- Conformar un modelo matemático para simular las principales variables de explotación de interés para el proceso de drenaje.
- Basado en los resultados de las simulaciones obtenidas, diseñar un sistema de control que cumpla los requerimientos de explotación y medioambientales para el sistema de drenaje.
- Realizar los estudios de impacto económico, social y medioambiental de la investigación a realizar.

**Métodos de Investigación**

- Método de investigación teórico para la caracterización del objeto de estudio, así como determinar las principales características de los elementos del sistema.
- Método experimental para la realización de mediciones en el sistema de drenaje.

- Métodos de modelación matemática y simulación de las principales variables de explotación componentes del sistema

### **Metodología de la Investigación**

La metodología utilizada durante el desarrollo de la investigación, que por etapas de trabajo se presenta a continuación, no difiere en su esencia de la metodología de investigación clásica utilizada para estudios de sistemas a modelar en procesos industriales, sólo que al aplicarla en un proceso real de alta complejidad con peculiaridades específicas, aplicando una herramienta potente en la simulación dinámica (Matlab) hace novedoso el estilo de trabajo seguido.

*Primera etapa:* Preliminar.

Se determinaron los métodos a aplicar en la fase inicial tales como la Revisión Bibliográfica, Revisión de la Documentación Técnica de la empresa Metro de Caracas, Manual de Operaciones, Trabajos Investigativos Específicos, Trabajos de Campo destinados a la Observación del trabajo de los puntos bajos, así como también se realizó la revisión de trabajos precedentes y se estableció la base teórica que sustenta la investigación. Se realizó el análisis de muestras de agua.

*Segunda etapa:* Modelación matemática y de Simulaciones. El desarrollo de esta se realiza en tres sub-etapas fundamentales, la primera de las cuales es el diseño del modelo matemático del proceso a estudiar.

La segunda parte dentro de esta etapa de trabajo es la simulación del modelo matemático del proceso completo obtenido, basada en datos tomados del proceso real, esto permite realizar un análisis en lazo abierto del sistema investigado estableciendo las principales interacciones e influencia de cada una de las variables manipuladas y perturbaciones sobre las variables de salida del proceso.

Dentro de esta etapa de trabajo la última parte corresponde al análisis de los resultados obtenidos de la simulación y la obtención de las funciones de transferencia que permitirán diseñar el sistema de control multivariable. Una vez diseñado el controlador se simula el comportamiento de todo el proceso en lazo cerrado, se procesan los resultados de esta simulación y se elaboran las conclusiones.

Finalmente se realiza una valoración económica, ambiental y social sobre el impacto de los principales resultados obtenidos. Se ofrecen las conclusiones y recomendaciones de la investigación en general.

### **Análisis de la pertinencia y actualidad de la bibliografía consultada**

La bibliografía consultada corresponde a las más recientes y relevantes investigaciones realizadas en el campo de acción de esta investigación. El modelo matemático del control de pH y control de nivel ha sido desarrollado a partir de estudios realizados por Zanabria(1997), Shinskey, F. G. (1996), McMillan, G. K. (1994) y otros. En cuanto al modelo del control de llenado del pozo y el control multivariable se han revisado los trabajos realizados por GUZMÁN (2001, 2005, 2006), GAMBIER, A. UNBEHAVEN, H(1999), GARCIA, C.(2000) y otros.

### **Publicaciones del autor sobre el tema**

En el marco del doctorado en Electromecánica el autor participó en el XIV Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura realizada en la CUJAE, Ciudad de La Habana, Cuba, con una ponencia sobre el tema publicada en las memorias del evento con el ISBN 978-959-261-281-5.

- González, M. "Modelación y Simulación para el Control del Drenaje de los Pozos del Metro de Caracas", *Memorias del XIV Congreso de las Ciencias de Ingeniería y Arquitectura, CUJAE*, Ciudad de La Habana, Cuba, 2008.

# **CAPITULO I**

# CAPITULO I

---

## Marco Teórico - Metodológico de la Investigación

### 1.1. Introducción

El marco teórico-metodológico como parte importante en la caracterización del objeto de estudio permite detectar de forma preliminar las diferentes características e interacciones que existen entre los múltiples elementos vinculados presentes en la investigación a realizar.

El objetivo del presente capítulo es establecer el Marco Teórico-Metodológico de la investigación, a partir del estado del arte del tema basado en el análisis de los trabajos precedentes, la metodología seguida para su ejecución así como la base teórica que sustenta la investigación y una caracterización integral del estado actual del objeto de estudio: El sistema de drenaje de los túneles del Metro de Caracas.

### 1.2. Estado del arte

Una investigación científica es una investigación sistemática, controlada, empírica y crítica de proposiciones hipotéticas sobre las presumidas relaciones entre fenómenos naturales según expresa Kerlinger (1975).

Según Aróstegui y Otros (1975), una investigación científica en cualquier área del conocimiento debe siempre estar sustentada por una investigación empírica y por una investigación teórica, de ahí que sea necesario utilizar los métodos que caracterizan a cada una de ellas para desarrollar científicamente las mismas a partir de una clara caracterización del objeto, del planteamiento del problema, los objetivos, la hipótesis y las tareas.

Para desarrollar la investigación fueron consultados diferentes trabajos y estudios, orientando la revisión bibliográfica en dos líneas fundamentales, por una parte, la información relacionada con el enfoque teórico y metodológico del estudio a realizar y

por otra, los trabajos que sobre el tema de la modelación matemática, la simulación dinámica desde el punto de vista científico, técnico y práctico se han realizado para este tipo de procesos.

En lo que respecta al primer elemento anteriormente mencionado, resultó muy útil la revisión de los trabajos de Mesarovich (1996) el cual aborda la temática relacionada con la teoría general de los sistemas y la metodología de las investigaciones sistémicas. Este autor conceptualiza con mucha claridad según Hurtado (1999) los métodos sistémicos de análisis del conocimiento científico, permitiéndole al investigador el empleo de los mismos para sustentar teóricamente la investigación, a pesar de que algunos términos y definiciones han evolucionado en el presente, su esencia posee actualidad y vigencia.

En lo atinente al segundo elemento, nos hemos basado en trabajos realizados por Zanabria (1997), Guzmán (2001), McMillan (1994) y otros.

Todo proceso real por simple que sea es de naturaleza multivariable (múltiples entradas y múltiples salidas), sin embargo, ya sea por ahorro en el coste de la instalación, o por desconocimiento de la dinámica del proceso, su control no siempre se aborda desde este punto de vista.

En los sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas, para definir los mejores pares de entrada y salida Bristol, E. H. (1966) fue el primero en desarrollar un método para el análisis de problemas de control multivariable. Esta aproximación, denominada Arreglo de Ganancias Relativas o RGA presentó entonces la desventaja de que tomaba en cuenta sólo el estado estacionario y no el factor dinámico, lo que fue considerado y tomado en cuenta luego en el trabajo de Gagnepain, J. P. y Seborg, D. E. (1982), así como en el de Mc Avoy, T. J. en (1981) cuya desventaja fundamental es que sólo trata con sistemas de dos entradas y dos salidas, es decir, no es utilizado en sistemas de mayor orden de entradas y salidas.

En el presente trabajo se realiza un estudio dinámico partiendo inicialmente de la modelación matemática del sistema de drenaje de los pozos del metro de Caracas, para diseñar un sistema de control que muestre una superior eficiencia al clásico empleado en este momento, donde además del nivel se incorpore una nueva variable el pH de las aguas contenidas en un pozo del sistema de drenaje.

El pH es una magnitud de mucha importancia en un sinnúmero de procesos biotecnológicos, como por ejemplo en neutralización de desperdicios alimenticios. También ha cobrado gran relevancia en la minería y en el control de contaminación, como es el caso de la neutralización de desechos industriales. El control de esta variable es en general difícil de realizar debido a la dependencia altamente no lineal entre los reactivos que ingresan al sistema y el pH que se establece.

Una cantidad importante de trabajos relacionados con la modelación y el control de pH de soluciones han sido publicados. Con respecto a la modelación del establecimiento del pH en soluciones, es importante mencionar el trabajo presentado por McAvoy et al. (1972) en el que se presenta un modelo para la neutralización de un ácido débil y una base fuerte, basado en los principios de conservación de masa en condiciones de equilibrio y electroneutralidad de las soluciones. Posteriormente Jacobs et al. (1980) han utilizado estos mismos principios para los casos en que se tiene un ácido y una base fuerte. Gustafsson y Waller (1983), así como también Wright y Kravaris (1991), han extendido estos resultados al caso de la modelación de sistemas en los cuales existe más de un ácido y/o base ya sean fuertes o débiles. Pajunen (1983) ha modelado el proceso de establecimiento del pH como un modelo de Wiener, esto es, una parte dinámica lineal seguida por una característica no lineal estática representada por una aproximación polinomial por tramos.

El diseño de algoritmos para controlar pH generalmente toma en cuenta la característica no lineal del proceso. Esta no linealidad puede ser vista como una ganancia variable en el tiempo, lo cual conduce a controladores lineales adaptables. Hay trabajos donde se adapta los parámetros de un modelo de primer orden para mantener la ganancia de lazo cerrado constante. Wright y Kravaris (1991) definen un objetivo de control equivalente al pH y formulan un controlador lineal y no adaptable en términos de este nuevo objetivo. También se han diseñado controladores no lineales tanto adaptables como no adaptables. Gustafsson y Waller (1983) utiliza una formulación matricial haciendo balances de masas de todos los ácidos y bases que reaccionan, considerando además la estequiometría del sistema. Efectuando transformaciones lineales al vector de concentraciones, se llega también a una formulación general pero haciendo uso de variables que son independientes de la reacción química. Posteriormente se realiza una estimación en línea de estas variables

utilizando el método de mínimos cuadrados y luego se utiliza un controlador PID que hace uso de estas estimaciones.

Según Zanabria (1997), los sistemas de control de pH son reconocidos entre los más difíciles problemas SISO en el área de control de procesos, debido a lo siguiente:

- La respuesta del pH a la adición de reactivos (variable manipulada) es altamente no lineal. La respuesta a igual cantidad de una base (o de un ácido) puede diferir mucho de un sistema a otro y de un pH a otro.: una pequeña cantidad de reactivo añadido puede cambiar el valor de pH en un cantidad ínfima o significativa, de manera casi aleatoria. Además, esta no linealidad también influye en el flujo de los afluentes.
- La sensibilidad del pH a la adición de reactivos también tiende a ser extrema. Los electrodos de pH pueden responder a cambios tan pequeños como 0,001 pH, lo cual significa que la medición de pH puede detectar variaciones en la concentración de iones de hidrógeno inclusive para un pH=7.
- Según Gustafsson & Waller, (1983) esta alta sensibilidad crea ciertas propiedades específicas que incrementan la dificultad de mantener el pH cercano a 7 por medio de un control en lazo cerrado. Cuando el proceso de neutralización es altamente sensible, se recomienda añadir una solución amortiguadora de bicarbonato a fin de suavizar las variaciones del pH y hacer más fácil su control. Las propiedades de los sistemas amortiguados son más cercanas a las de los sistemas lineales. (Gustafsson and Waller, 1992; Gustafsson et al., 1995).

Según Alegrechi y Capalbo (2009) el control de pH de una solución es crítico en una variedad de procesos. Los procesos de neutralización de pH son extremadamente difíciles debido a que exhiben un comportamiento fuertemente no lineal debido a la curva estática de titración (que es la característica de salida del proceso), que puede variar varios órdenes de magnitud en un rango pequeño de valores de pH. El proceso de neutralización de pH consiste de un flujo de solución ácida (acid stream HNO<sub>3</sub>), otro de solución base (base stream NaOH), y un tercero de la solución cuyo pH se quiere neutralizar (buffer stream NaHCO<sub>3</sub>).

Usualmente el objetivo de control es regular el pH de la solución de salida a través de la manipulación del flujo de la solución base, compensando los posibles cambios en el flujo del buffer que se considera como una perturbación no medible. El flujo de la solución ácida, y el volumen del tanque se asumen constantes. Para resolver el problema propuesto estos autores utilizarán dos métodos de control no lineal: control por linealización exacta y control adaptativo. Ambos requieren gran esfuerzo computacional en algoritmos para su realización.

Dentro de las técnicas convencionales de control se encuentra el controlador PID. Los controladores PID han sido desde la época de 1940, ampliamente empleados en la industria y es ciertamente el algoritmo de control más empleado en la actualidad. Según Deshpande, P. B. (1989), Hwang, D. Sh. y Hsu, D. L. (1997), Weng, K. H. (1997) cerca del 90% de los controladores industriales empleados actualmente son del tipo PI. Ender, D. B. en (1993) afirma en un estudio realizado, que el 30% de los controladores PID utilizados en procesos industriales trabaja de forma manual y 20% de los lazos de control emplean la denominada sintonía de planta (factory tuning); esto da una medida de que los controladores PID son ampliamente utilizados pero muy mal sintonizados. También Biakowski, W. L. en (1993) indica que en los procesos de preparación de papel en Canadá se tienen más de 2000 lazos de control, usando el 97% de ellos controladores PI y solamente el 20% de estos tienen un buen desempeño, debido a una incorrecta sintonía. Entre los controladores PID que son citados en la literatura se encuentran los controladores PID convencionales (o de parámetros fijos) y los controladores PID adaptativos ; Zhao, Z y otros (1993).

El método de desacoplamiento desarrollado por Rosenbrock, H. H. (1970) y (1974) Maciejowski, J. M. en (1989) y Deshpande, P. B. en (1989) para sistemas multivariables y conocido como Arreglo Inverso de Nyquist (INA) y Arreglo Directo de Nyquist (DNA), se fundamenta en una extensión de los conceptos de estabilidad de Nyquist para sistemas multivariables con interacciones significativas, introduciendo el concepto de dominancia diagonal de la matriz de funciones de transferencia del proceso. La desventaja de este método radica en la necesidad de utilizar recursos de computación adicionales para su desarrollo, su obtención resulta tediosa y se consume mucho tiempo para llegar a obtener un buen resultado, además de que se necesita también de mucha experiencia para tener una interacción activa con la máquina realizando aproximaciones

gráficas de tentativa y error. También existen otros autores que han llegado a un método de DNA pero con aproximaciones diferentes.

Smith, C. A. y Corripio, A. B. en (1997) muestran el desacoplamiento lineal para lazos de control que interactúan entre sí, tomando como ejemplo de aplicación el de un tanque con agitación con dos entradas y dos salidas. Estos autores también muestran las expresiones para el diseño de desacopladores en sistemas con  $n$  entradas y  $n$  salidas. El trabajo está limitado sólo a una aplicación a un sistema previamente linealizado. Una desventaja es que muestran la aplicación del desacoplamiento a sistemas de sólo dos pares de variables.

En otros trabajos sobre este tipo de control podemos destacar el de Harold, L. (1997), quien afirma que la técnica de desacoplamiento puede ser aplicada a procesos con muchas entradas y salidas, su desventaja consiste en que sólo da una medida de su aplicación en un proceso con dos entradas y dos salidas, Ogunnaike, B. A. (1994) ofrece la forma de determinar los desacopladores para sistemas con tres entradas y tres salidas, su desventaja radica en que el mismo es simulado aquí solamente para un sistema linealizado previamente y sólo ofrece el ejemplo de funciones de transferencia de primer orden con tiempo muerto, para las cuales describe el algoritmo de cálculo. Por otra parte Guzmán, D. en (1999) muestra en su trabajo la aplicación de estas técnicas al Tanque de Contacto obteniendo muy buenos resultados.

Sobre el control de procesos multivariables a partir de diferentes métodos tales como el adaptativo, no lineal etc, se pueden encontrar resultados en las patentes números 5 758 047 , 5 924 086, 5 566 065, 5 572 420, registradas en Estados Unidos, la JP 08 286 707, registrada en Japón y la EP 0 937 814 A2, registrada en Europa; estas nunca hacen referencia al control multivariable por desacoplamiento en un proceso de mezclado de mineral y licor, los desacoplamientos que refieren están ligados a circuitos electrónicos o variables de vehículos espaciales.

La patente EP 0 937 814 A2, de Europa lo refiere para un proceso de obtención de papel con dos entradas y dos salidas a partir de obtener un modelo de primer orden con tiempo muerto linealizado. También la patente 5 920 478, de Estado Unidos hace referencia al desacoplamiento en un proceso de múltiples entradas y salidas donde todas ellas interactúan.

Aquí no se ofrece como evaluar este proceso de interacción ni como seleccionar los mejores pares de variables.

Otras patentes hacen énfasis en dispositivos y métodos para el ajuste de los controladores PID SISO en el proceso, como por ejemplo la JP 09 034 503, en Japón, o la EP 0 704 776 A1, en Europa. Estos métodos en ningún momento tienen en cuenta un posible entorno multivariable, tampoco son específicos para un tipo de proceso, estos no presentan un estudio sobre la robustez de su solución.

En los problemas prácticos de control es típico encontrar más de una variable que puede ser controlada y de la misma forma, más de una para ser manipulada. Este problema es denominado control multivariable. Un sistema donde existan múltiples entradas y múltiples salidas como se muestra en la figura (3.3), es usualmente designado por la sigla, en inglés, MIMO (Multi-Input, Multi-Output).

Los problemas de control con múltiples entradas y múltiples salidas son más complejos que los sistemas con una entrada y una salida (SISO), debido a la interacción que ocurre entre las diversas variables. Debido a estas interacciones, la selección de los mejores pares de variables manipuladas y controladas para un esquema de control multilazo (multiloop) es una tarea no trivial.

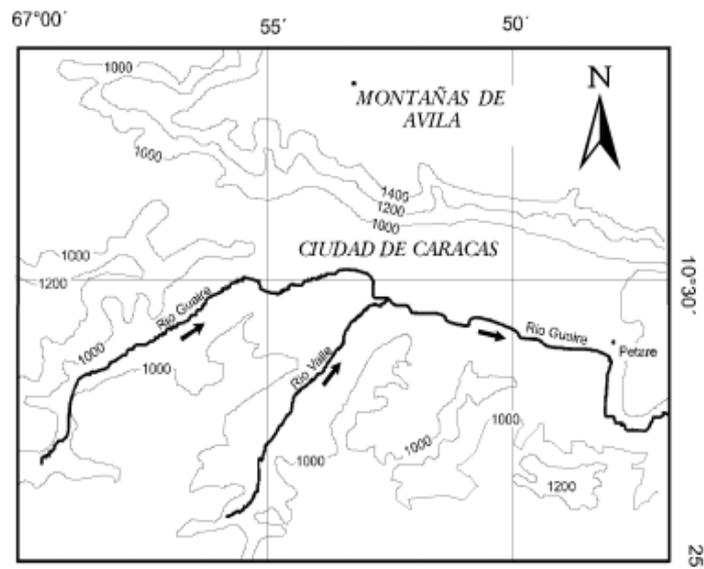
.El Control Multivariable por Desacoplamiento se encuentran, según Seborg, D. E. (1989), actualmente entre las técnicas avanzadas de control ampliamente usadas en la industria y empleado en los casos de sistemas multivariables con muchas interacciones entre las entradas y las salidas, Shing-Jia, S. (1998).

### **1.3 Caracterización del objeto de estudio**

#### **1.3.1 Principales características de los suelos y sistema hídrico del Valle de Caracas**

El valle de Caracas, rodeado por rocas cristalinas, se rellenó con 300 m de materiales procedentes de la meteorización. El acuífero de Caracas consta de gravas y arenas fluviales, que se intercalan con arcillas y limos procedentes de un lago inicial. Todos estos sedimentos se intercalan de una forma muy irregular, típica de los lagos estrechos en un ambiente muy energético (con un relieve muy fuerte). Los dos ríos Guaire y Valle (fig.1.1 ) descargan flujo superficial, sub-superficial y agua subterránea de la cuenca. En la actualidad ambos ríos están canalizados a su paso por la ciudad,

donde se dificultan los intercambios entre las aguas subterráneas y las superficiales, excepto en el área de Petare, donde el acuífero se termina y el río Guaire entra en un cañón de rocas cristalinas. El área de captación que llega hasta Petare cubre 564 km<sup>2</sup>, de los que 65,4 km<sup>2</sup> pertenecen a la ciudad. En el valle de Caracas pueden existir del orden de unos cientos de pozos, de los que sólo unos pocos son pozos de producción. No se han situado de manera sistemática; se construyeron de acuerdo con las conductividades hidráulicas de los acuíferos que se encontraban, y en el valle alcanzaban una profundidad de unos 120 m. No se sabe de ningún pozo que penetre totalmente en el sistema acuífero (un máximo de 300 m).



**Figura 1.1** Cuenca de captación del río Guaire desde las fuentes de Petare a la ciudad de Caracas en el valle (por debajo 1000 m s.n.m.). En el lado izquierdo de la confluencia de los ríos Valle y Guaire se extiende la ciudad antigua (DF); en el lado derecho está la ciudad nueva (MI)

Fuente: IGME. Temas: Guías y manuales. ISBN: 84-7840-465-1

### 1.3.2 Gestión del Agua Subterránea en la ciudad de Caracas, Venezuela.

En los últimos 150 años se ha incrementado la población de la ciudad desde aproximadamente 40000 hasta 4 000 000, y continua aumentando.

Se suministra alrededor de 17,4 m<sup>3</sup>/s de agua potable a la ciudad procedente de los embalses superficiales de las cuencas vecinas. La demanda de agua de la ciudad es

creciente y se han de buscar nuevos recursos. Una fuente potencial adicional es el acuífero que hay bajo la ciudad, que se ha ido desarrollando durante los últimos años. Para conocer las posibilidades y los límites de explotación adicional de este acuífero de una manera adecuada se ha de establecer un balance de agua, debe registrarse el estado de la calidad del agua subterránea y deben discutirse las posibles medidas de protección del agua subterránea.

### **1.3.3 Problema de las Aguas Negras**

Entendemos por aguas negras, servidas o residuales, a todas aquellas aguas que provienen de los centros de consumo y que ya han sido utilizadas. Las aguas residuales proceden esencialmente del agua, previamente acondicionada para su consumo, que se suministra a la comunidad después que la misma ha sido contaminada por diversos usos a los cuales ha sido sometida. Si a esas aguas no se les hace debido tratamiento, pueden contribuir a crear situaciones indeseables. Por ejemplo, una cantidad considerable de personas que viven en zonas cercanas a autopistas, carreteras, avenidas y calles, vierten aguas negras y basura que al caer en las cunetas las obstruyen, con lo cual se origina aglomeración de inmundicias y empozamiento en extensas áreas de las vías mencionadas.

### **1.3.4 Principales características del metro de Caracas**

La Compañía Anónima “Metro de Caracas”, fue creada con la finalidad de contribuir al desarrollo del transporte colectivo en el área metropolitana de Caracas, mediante la planificación, construcción y explotación comercial de un sistema integrado de transporte, conformado por una red ferroviaria metropolitana (METRO), y una red alimentadora de transporte superficial, que preste el servicio público de transporte en forma efectiva, eficiente y confiable.

Sus líneas de servicio están distribuidas del siguiente modo:

**Línea I** en el sentido Oeste-Este, consta de 22 estaciones, desde Pro-Patria hasta Palo Verde. En Pro-Patria se encuentran los patios y talleres, que son utilizados para estacionamiento, maniobra y servicio de mantenimiento de los trenes y demás equipos. Esta línea consta de 39 trenes en servicio.

**Línea II**, la cual parte de la estación LAs Adjuntas y la estación Zoológico, uniéndose antes de Llegar a la estación Mamera, finalizando en la estación El Silencio, que por medio de un pasillo de transferencia se comunica con la Línea I en la estación Capitolio. En las Adjuntas se encuentran los patios y talleres que prestan servicio a los trenes de esta línea, la cual consta de 15 trenes y 13 estaciones.

Actualmente se encuentra activa la línea 4 llamada así por su reciente construcción, realmente es la extensión de la línea II, esta va desde la estación Capuchino hasta Zona Rental, Consta de 5 estaciones.

Hoy en día el recorrido se realiza desde El Silencio hasta Zoológico y viceversa. Existen trenes provenientes de Zona Rental hasta Las Adjuntas y también para la vía de retorno. Recientemente se puso en servicio el tramo Las Adjuntas – El tambor (Metro los Teques).

**La Línea III**, la cual parte de la estación El Valle finalizando en la estación Plaza Venezuela II, siendo esta la estación de transferencia a la línea I específicamente a la estación Plaza Venezuela I, además, los trenes se comunican con las vías de la línea I mediante un túnel de transferencia. En los actuales momentos se puso en marcha el tramo El Valle - La Rinconada, esta cuenta con un patio de maniobra y que, además, presta servicio de mantenimiento menor. También la conexión La Rinconada con el ferrocarril proveniente de Valles del Tuy (IAFE).

Los trenes del “Metro de Caracas”, constan de 7 vagones en la línea I, de 6 vagones en la línea II y de 4 vagones en la línea III, cada tren consta de 2 vagones tipo A colocados a los extremos, los cuales tienen cabina de conducción principal y el resto de los vagones son del tipo B, con cabinas de conducción auxiliares en sus extremos.

### **Misión:**

La misión de la Compañía Anónima “Metro de Caracas”, es la de contribuir al desarrollo del transporte colectivo en el área metropolitana de Caracas, mediante la planificación, construcción y explotación comercial de un sistema integrado de transporte, conformado por una red ferroviaria metropolitana (Metro), y una red alimentadora de transporte superficial (Metro bus), que preste el servicio público de transporte en forma segura, efectiva, eficiente y confiable, manteniendo su autosuficiencia financiera.

**Visión:**

Ser la empresa líder de servicios públicos del país, mediante la ampliación de su red y la prestación del servicio de transporte masivo de pasajeros en el área Metropolitana de Caracas con excelente calidad y en condiciones de eficiencia y productividad; Contribuyendo así al bienestar de su población y al desarrollo urbano. A continuación se muestra las principales fechas de puesta en servicio de sus tramos.

## Puesta en servicio de los tramos

**Línea 1****Tramo****Fecha**

Propatria – La Hoyada	2 de enero de 1983
La Hoyada – Chacaíto	27 de marzo de 1983
Chacaíto – Los Dos Caminos	23 de abril de 1988
Los Dos Caminos – Palo Verde	19 de noviembre de 1989

**Línea 2**

Caricuao / Las Adjuntas – La Paz	4 de octubre de 1987
La Paz – El Silencio	6 de noviembre de 1988
Capuchinos – Zona Rental	2006

**Línea 3**

Plaza Venezuela – El Valle	18 de diciembre de 1994
El Valle – La Rinconada	15 de Octubre de 2006
La Rinconada – IAFE	15 de Octubre de 2006

**1.3.5 Situación actual de los sistemas de drenaje del metro de Caracas**

Los sistemas de drenaje están ubicados en las estructuras de ventilación y en las estaciones. Existe un total de 61 puntos bajos sobre los cuales es necesario tener un control estricto de la evacuación de las aguas; en la figura 1.2 se muestra la ubicación de estos.

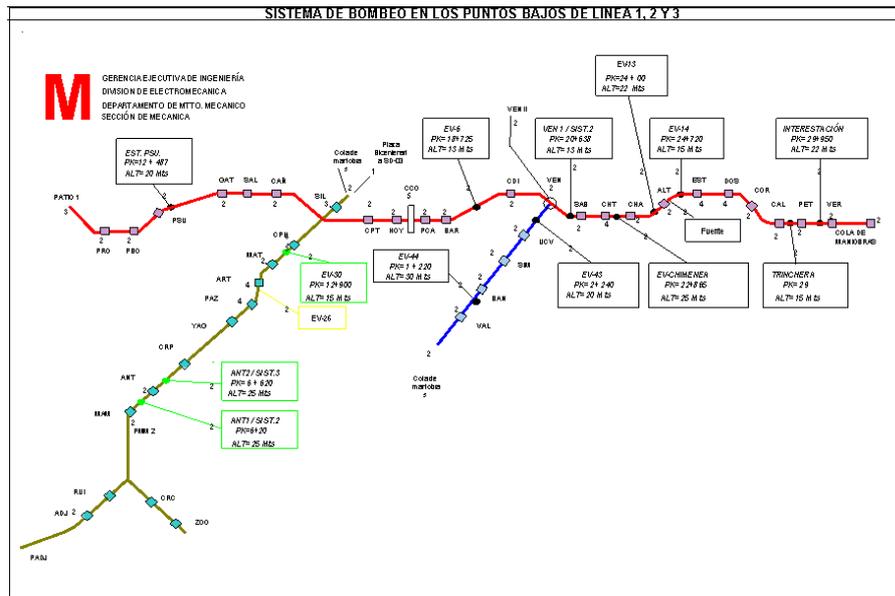


Figura 1.2 Plano de la ubicación de los puntos bajos en el Metro de Caracas.

Estos constan de dos bombas conectadas en paralelo con potencias de 15 kW y de 35 kW, cada una de ellas con sus respectivas tuberías de succión y descarga. Estas últimas convergen en una sola tubería común que lleva al alcantarillado a nivel de la calle; es de hacer notar que en las estructuras de la línea III, cada bomba posee su propia tubería de descarga.

En la figura (1.3) se muestra el esquema de un punto bajo del sistema de drenaje del metro de Caracas.

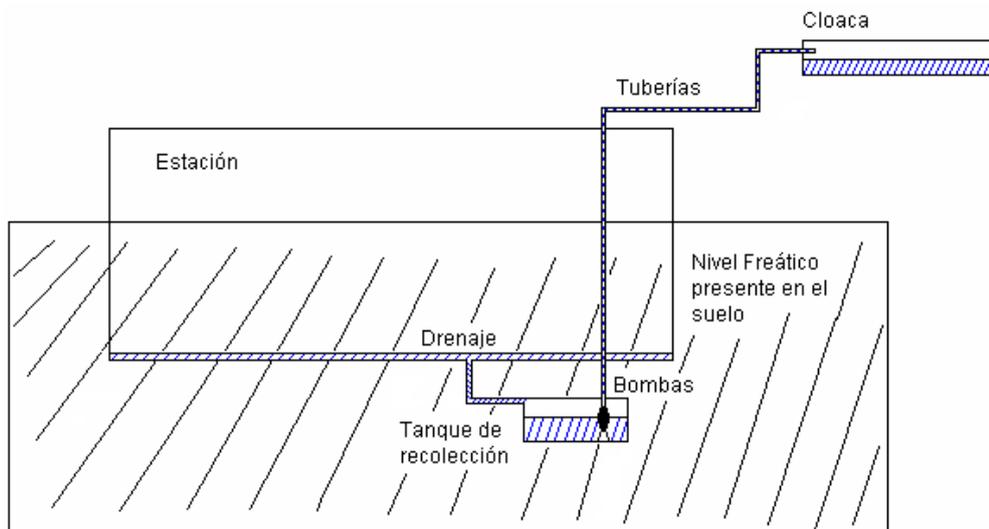


Figura 1.3 Esquema de un punto bajo del sistema de drenaje.

En las tablas (1.1, 1.2, 1.3) que se muestran a continuación se encuentran los datos generales de un punto bajo del sistema de drenaje, la estructura de ventilación, también llamada La Chimenea, situada entre las estaciones Chacaito y Chacao, en la línea 1 del Metro de Caracas.

**Tabla 1.1** Características de las tuberías en la estructura de ventilación La Chimenea.

Tuberías de Descarga	Normal	Diámetro Tubo principal, m	0.150
		Tubos instalados	1 tipo Y
		Diámetro Conector, m	0.150 m
		Conectores instalados	2
	Emergencia	Diámetro Tubo principal, m	0.150 m
		Tubos instalados	1
		Diámetro Conector, m	0,75
		Tipo de conector	Rápido
		Conectores instalados	2
	Tubería Seca	Diámetro Tubo principal, m	0,112
		Tubos instalados	1x cada Vía
		Diámetro Conector, m	0,062
		Tipo de conector	Roscado
		Conectores instalados	4

**Tabla 1.2** Datos esenciales del tanque de La Chimenea.

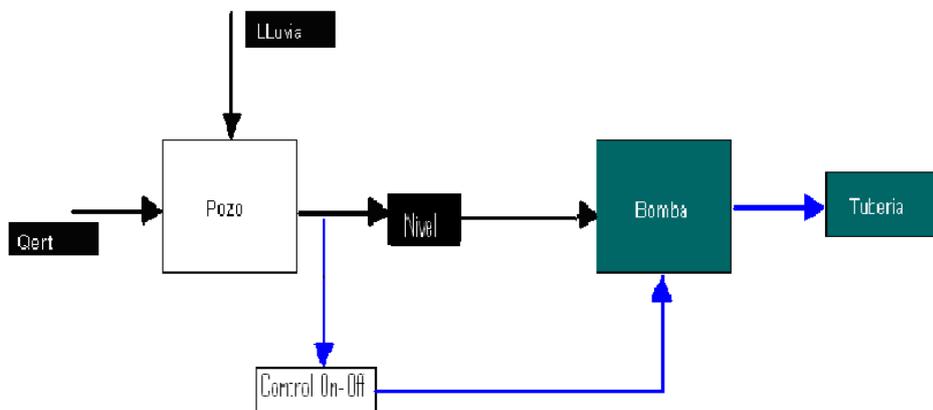
Pozos	Largo, m	9.50
	Ancho, m	2.60
	Alto, m	2.15
	Capacidad, lts.	53 110
	Cap real de Reboso, lts.	41 990
	Tiempo de reboso, min	45
	Nivel de ceba, m	0.50

**Tabla 1.3** Datos generales de la estructura de ventilación La Chimenea

Otros datos	Aforo, lts/min.	494
	Profundidad de la Estructura, m	25
	Velocidad de llenado del Tanque, cm/min.	2
	Tiempo total de reboso, min.	49
	Tiempo de señal de alto nivel, min.	29
	Tiempo para actuar, min.	20

#### 1.4 Sistema de control actual en el drenaje del Metro de Caracas.

En la figura 1.3 se ilustra el esquema funcional de control actual en los pozos.

**Figura 1.3** Esquema que existe actualmente en el metro de caracas.

Cada estructura de ventilación o punto bajo posee un sistema de control todo-nada (on-off) el cual es activado por unos sensores de nivel que permiten el control de encendido de las bombas que drenan el tanque de acuerdo con una lógica preestablecida.

En las estructuras de ventilación se observan dos formas de instalación de las bombas drenadoras: En *cámara húmeda*, que no es más que un tanque sumidero de concreto armado completamente estancado a no ser por tuberías de llegada de agua (descarga), de salida de agua (succión) y tubos de rebose que la conectan en algunos casos con una cámara seca adyacente; las dimensiones de la cámara varían de acuerdo a cada estructura y al nivel freático que se tenga.

La otra forma es en *Cámara seca*, situada adyacente a la cámara húmeda, separada por un muro de concreto armado; tiene como función servir de local para la ubicación del sistema de bombas y tuberías cuya operación permite el desalojo de las aguas drenadas a la cámara húmeda, se puede acceder a ella a través de una tapa tipo reja ubicada sobre el grupo de bombas.

Las bombas utilizadas internamente cuentan con un motor de inducción de jaula de ardilla trifásico de 480 voltios para 50 ó 60 Hz, con aislamiento clase F (permite una temperatura de trabajo de 100 °C por encima de la temperatura ambiente de 40 °C), el cual aplica fuerza centrífuga al agua para ser expulsada. Todos los tamaños de motores están hechos a la medida para sus aplicaciones especiales, son de tipo seco, sin ventilación. La bomba además de usarse en condiciones normales puede funcionar completamente en seco o con obstrucción en el desagüe sin riesgo a estropear el motor.

Otro aspecto importante es la alimentación de los motores de las bombas, la cual se lleva a cabo por medio de un cable que se compone de dos partes principales: una abrazadera protectora para sujetar el cable a la entrada y una junta de goma que se adapta al diámetro del cable y que cierra de un modo efectivo para que la humedad no pueda entrar al departamento donde se encuentran las conexiones. El sistema de conexión del cable facilita el cambio de los cables dañados.

Para el funcionamiento automático del sistema de bombeo se cuenta con un tablero de control (ver figura 1.4) que posee decisiones preestablecidas almacenadas en un PLC, como respuestas a la activación de unos interruptores basculantes colocados a cuatro (4) alturas diferentes.



**Figura 1.4** Tablero de control del Sistema de Bombeo. Vista externa e interna

En los actuales momentos la empresa cuenta con dos tipos de flotantes: el ENH-10 y el ENM-10, ambos patentados por la empresa que suministra las bombas (Flygt) (figura 1.5).

**El ENH-10.** El movimiento pendular de este dispositivo, posiciona un interruptor de mercurio a objeto de controlar el arranque y parada alternado o simultaneo de las bombas, en función de la altura que alcance la columna de agua dentro de la cámara húmeda.

Constructivamente consiste de una carcasa en forma de bombillo hecha de polipropileno con peso de plomo dispuesto excéntricamente y con interruptor de mercurio conectado a un conductor de longitud variable (3,6 a 20 mts). Existen tantos interruptores como niveles se requiere medir (cuatro en total y en las líneas mas nuevas posee dos en el nivel 1).

El interruptor abre o cierra contactos por variación de la posición del centro de gravedad. En ausencia de líquido se encuentra colgado, basculando hacia la posición horizontal en presencia de éste (en la cual permanece aun cuando aumente el nivel de agua).

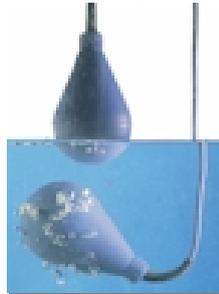
**El ENM-10.** El regulador de nivel ENM-10 se limpia automáticamente y no precisa mantenimiento, utiliza un micro interruptor para arrancar y parar el bombeo cuando el líquido alcanza los niveles predeterminados. El micro interruptor está protegido con polipropileno suave, resistente a los líquidos más abrasivos. El ENM-10 no flota en la superficie sino que permanece sumergido, limpiándose automáticamente en el líquido. Esto asegura que su operación no se vea afectada por grasa o sólidos que puedan adherirse a su superficie. En su fabricación no se utilizan materiales tóxicos (tales como

plomo o mercurio), y por lo tanto se pueden utilizar incluso en las condiciones más exigentes.

Al efecto de operación de las bombas se definen cuatro niveles de agua dentro de la cámara húmeda.

#### **Nivel de parada alternado (Nivel N1).**

Se establece cuando el nivel de la columna de agua dentro de la cámara húmeda desciende a 0,50 mts respecto del nivel de la losa piso de la cámara, llegada esta situación las bombas se detendrán automáticamente debido al cierre del contacto en el interruptor de nivel, que energiza el relé cuya acción desactivará ambas bombas con el objeto de evitar su funcionamiento en vacío.



**Figura 1.5** Interruptor de nivel ENM10

#### **Nivel de arranque alternado (Nivel N2).**

Este nivel se establece a una altura de 1,20 mts desde el nivel de losa piso de la cámara, cuando el volumen del líquido alcanza dicha altura el interruptor de nivel respectivo acciona el contacto necesario para el funcionamiento alternado de las dos (2) bombas.

#### **Nivel de operación simultánea (Nivel N3).**

Se establece una altura de 1,50 mts por encima de la losa piso de la cámara, de modo que al ser transcendida por la columna de agua, el interruptor de nivel acciona la lógica de control para la operación simultánea de ambas bombas.

#### **Nivel de alarma (Nivel N4).**

Se establece una altura de 1,80 mts del nivel de losa piso, llegada esta situación el sistema está concebido para que actúen las dos bombas simultáneamente

declarándose adicionalmente una alarma en el tablero de control de las bombas y en el de señalización mecánica (T.S.M), indicando alto nivel (rebose inminente).

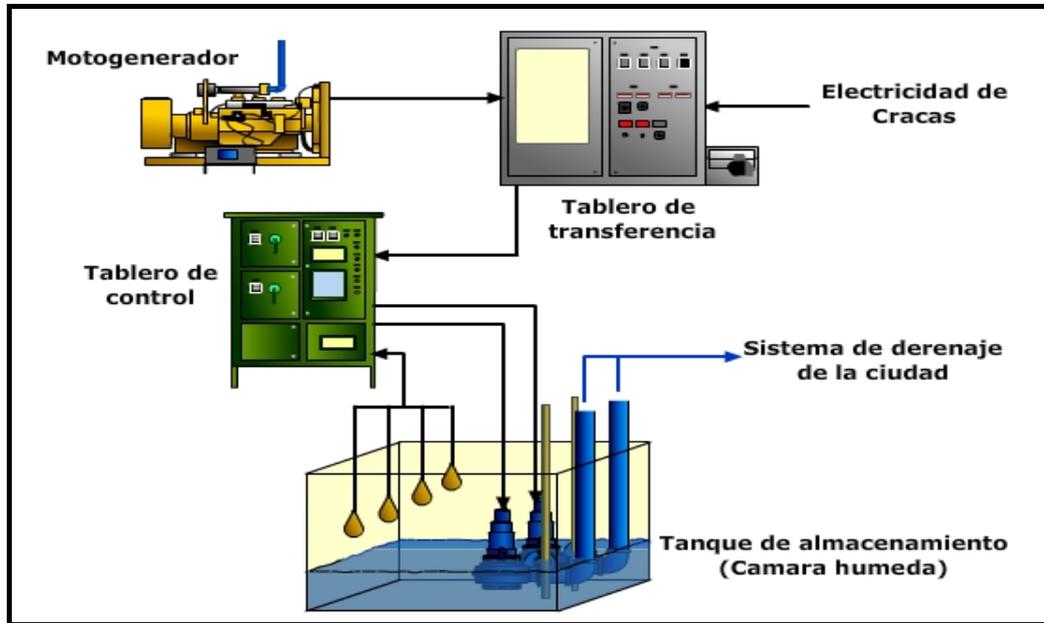


Figura 1.6 Sistema de drenaje de aguas pluviales.

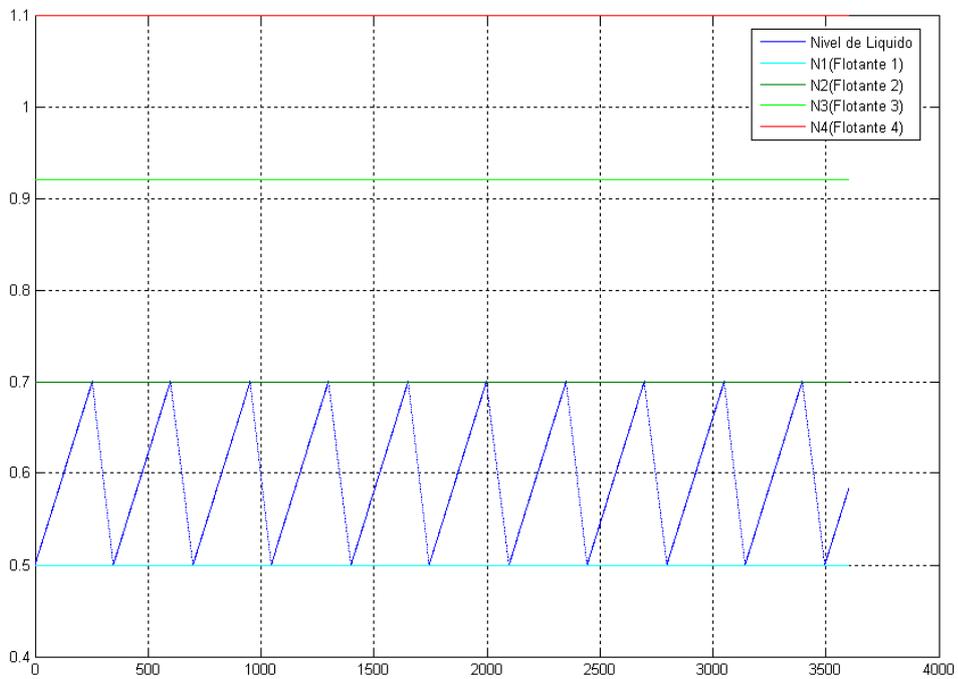


Figura 1.7 Simulación del Funcionamiento del Sistema de Control Actual.

El sistema de control actual adolece de las siguientes fallas:

- No existe criterio de eficiencia energética para efectuar el proceso de control.
- Los sensores de nivel funcionan con interruptores de mercurio, lo cual produce daños al medio ambiente.
- El paso de los trenes causa vibraciones que ocasionan arranques en falso de las bombas electrosumergibles.
- No existe control del pH y por tanto éste puede ser ácido en algunos casos causando corrosión en las tuberías, y básico en otros ocasionando formación de sales que obstruyen las tuberías provocando el funcionamiento de las bombas en condiciones forzadas.
- Como puede observarse en la figura 1.7, para la disposición de los sensores de nivel mostrada en la simulación, la bomba arrancó 10 veces en una hora ante una perturbación constante. Estos arranques frecuentes son causa de un mayor deterioro de las partes mecánicas y eléctricas de la bomba, ocasionando que sea necesario implementar rutinas de mantenimiento más costosas.

## 1.5 Conclusiones

En el presente capítulo quedó establecido el Marco – Teórico Metodológico de la Investigación. Se realizó un análisis de los trabajos precedentes como base en el desarrollo de la investigación, considerando primeramente la bibliografía teórica y luego la técnica, enmarcada en los análisis sobre la modelación, simulación y las diferentes estrategias de control, para establecer la metodología a seguir para la ejecución de la investigación.

Fue caracterizado el objeto de estudio, describiendo el estado actual del control del bombeo del Sistema de Drenaje del Metro de Caracas y poniendo de manifiesto sus deficiencias.

# **CAPITULO II**

# CAPITULO II

## Modelación y Simulación del Sistema de Drenaje

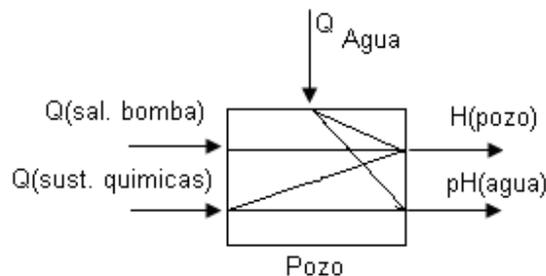
### 2.1. Introducción

Según Seborg (1989), el modelo no es más que una abstracción matemática del proceso real, donde la ecuación o conjunto de ecuaciones que componen el mismo es la mejor aproximación del proceso.

El objetivo del presente capítulo es realizar la modelación matemática y la simulación dinámica en lazo abierto del sistema de drenaje del metro de Caracas.

### 2.2. Flujo de señal para las principales variables del sistema de drenaje

En la figura 2.1 se muestra el gráfico del flujo de señales a partir del estudio de las principales variables del sistema que tienen importancia para la propuesta del sistema de control.



**Figura 2.1** Principales variables del sistema de los pozos de drenaje.

Las variables de importancia para el control en este sistema de drenaje son el nivel del pozo y el pH del agua, y las variables manipuladas son 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 agua que llega al pozo como perturbación del sistema. Sobre el

nivel del pozo es necesario tener un control estricto dado que estos se desbordan y provocan inundaciones en las vías férreas.

### **2.3. Modelo matemático dinámico para el nivel de los pozos de drenaje**

Los modelos matemáticos pueden ser utilizados en el control y análisis del proceso de la siguiente manera:

- i) entrenamiento del personal que opera el sistema de bombeo.
- ii) proyecto de estrategia de control para un nuevo proceso.
- iii) seleccionar los parámetros de sintonía de un controlador.
- iv) diseño de lazos de control.
- v) optimización de las condiciones de operación del proceso.

Los modelos pueden ser considerados en tres diferentes clasificaciones:

- i) modelos teóricos desarrollados a partir de los principios de la Química y de la Física.
- ii) modelos empíricos, obtenidos a partir del análisis matemático (estadístico) de datos de operación del proceso.
- iii) modelos semi-empíricos los cuales representan un compromiso entre (i) y (ii) con uno o más parámetros para ser validado a partir de los datos de la planta.

El modelo a ser desarrollado en la próxima sección es del tipo "v". Esta selección en la forma de modelación se debe a la necesidad que tiene el Metro de Caracas de realizar un estudio del comportamiento dinámico de cada uno de los principales parámetros del sistema de bombeo, debido a la falta de eficiencia en el control existente y a la protección del medio ambiente.

Para el desarrollo del mismo fue necesario realizar un estudio para darle solución a los problemas existentes.

Para conformar las ecuaciones de un sistema, las cuales representan complejos sistemas dinámicos, según Tjonov (1978), es necesario, por simplicidad, no tener en cuenta una serie de factores secundarios y si los principales factores de entrada y perturbación que influyen en la dinámica del proceso.

La primera premisa necesaria para la simulación dinámica de un sistema es la formulación de las ecuaciones que interrelacionan las variables de entrada y de salida

del mismo.

El modelo de un proceso, correspondiente al sistema de ecuaciones de balance de masa y energía que representan el mismo, está dado por (Lucenko, 1984):

$$\sum_{n=1}^N q_{jn}(t) + \sum_{k=1}^K r_{jk}(t) - \sum_{l=1}^L p_{jl}(t) = \frac{d}{dt} M_j(t) \quad (2.1)$$

donde:

$$j = 1, 2, \dots, S$$

$n, k, l$  -Flujos de masa o energía, que entran, generan o salen del volumen de control.

$q_{jn}(t)$  - $N$  flujos de sustancias o energía de tipo  $j$  que entran en el espacio modelado.

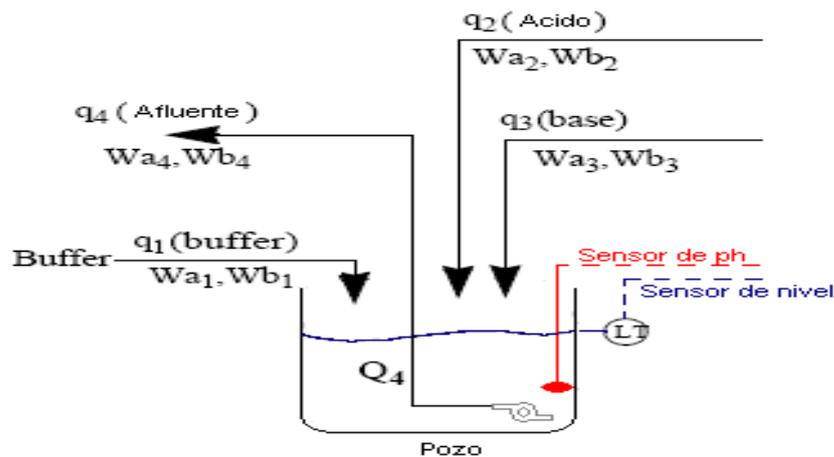
$r_{jk}(t)$  - $K$  flujos de sustancias o energía del tipo  $j$  que es generado en el espacio modelado.

$p_{jl}(t)$  - $L$  flujos de sustancias o energía de tipo  $j$  que salen del espacio modelado.

$M_j(t)$  -Cantidad de sustancia o energía del tipo  $j$  que sale del espacio modelado en el instante de tiempo  $t$ , medida en unidad de masa o energía.

$S$  -Número de tipos de sustancias o energía, que describen el modelo matemático.

En la figura 2.2 se muestra el esquema del pozo de drenaje empleado en la modelación.



**Figura 2.2** Esquema del pozo de drenaje para la modelación y simulación.

Teniendo en cuenta el diagrama de flujo de señales para el sistema de drenaje del pozo del metro de Caracas, mostrado en la figura 2.2 y como este representa un sistema hidráulico, se pueden escribir las ecuaciones para el balance de masa teniendo en cuenta las variaciones de las variables a controlar en la salida del mismo. Como fue descrito por Tijonov (1975); Seborg (1989); García (1997), para efectuar la modelación matemática de un sistema hidráulico, es necesario considerar las ecuaciones que describen el balance global de masa a través de los componentes que conforman el sistema líquido y de leyes de conservación de la masa.

Basado en Smith y Corripio (1989), se puede establecer el modelo de la bomba de la siguiente manera:

$$\frac{dQ_{sb}}{dt} = \frac{(k_p * m(t)) - Q_{sb}}{\tau_p} \quad (2.2)$$

Donde:

$Q_{sb}$  : Es el flujo de salida de la bomba, ( $m^3 / s$ ).

$k_p$  : Ganancia de la bomba.  $\frac{m^3}{s\%}$

$\tau_p$  : Constante de tiempo de la bomba, (s)

$m(t)$  : Parámetro que regula la velocidad de la bomba, %

Un balance de masa en el pozo permite escribir la siguiente ecuación para el nivel:

$$A \times \frac{dH}{dt} = Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_{sb} \quad (2.3)$$

Donde:

$Q_2$  y  $Q_3$  : Son los flujos ácidos y básicos respectivamente, ( $m^3 / s$ ).

$Q_1$  : Es el flujo de agua de entrada, ( $m^3 / s$ )

$A$  : Es el área de la sección transversal del pozo, ( $m^2$ ).

#### 2.4. Modelación Matemática Dinámica del pH de las aguas de escurrimiento

Fue necesario el estudio de los posibles flujos de sustancias que influyen sobre el pH del agua en los pozos de drenaje.

El objetivo principal del monitoreo del pH, a menudo mencionado en las literaturas de control del pH, es conservar la salida del proceso lo mas cerca posible de un punto determinado cuando hay disturbios.

La suposición básica es que si el pH está muy distante del punto determinado, pueden ocurrir daños y perjuicios para el proceso o para el medio ambiente.

Por ejemplo, los sistemas biológicos, con presencia de microorganismos, pueden ser muy sensitivos al pH pero no a la cantidad de ácido o base presente en el sistema.

El segundo objetivo principal del control de pH es relativo a la capacidad del buffer: Lo que implica que aunque el pH puede estar muy distante del punto determinado, la cantidad de ácido o de base necesaria para llevar al pH al equilibrio determinado puede ser muy pequeño. Una situación física donde puede tener importancia esto es en el tratamiento de aguas efluentes, donde el efluente tratado debe causar el mínimo daño posible para el río, el lago, etc. El agua efluente adecuadamente moderada con un pH cerca de un punto determinado deseado puede causar un daño menor que un efluente no amortiguado con un pH desemejante del punto determinado. Este objetivo es la determinación de la cantidad de ácido o la base necesaria para el alcance del punto determinado.

Cuando es realizado un análisis químico, el objetivo es determinar la cantidad de ácido (o base) en la solución añadiendo una base para un ácido (o viceversa) hasta que el ácido (o la base) sea neutralizado. Cuando las cantidades de ácido y base, medidos en topos, son iguales, es alcanzado el punto de equivalencia. Si el ácido y la base son ambos fuertes el pH es 7 en el punto de equivalencia. Si el ácido es débil y la base es fuerte, entonces el pH en el punto de equivalencia es mayor que 7. Por otra parte, si el ácido es fuerte y la base es débil, entonces el pH es más pequeño que 7 en el punto de equivalencia. En el control del pH, el punto de equivalencia no es importante. Lo que tiene importancia es el hecho de que el pH está en la cercanía o en la cuesta de la curva de titulación, cercano al valor del pH deseado, (Gustafsson, 1995.)

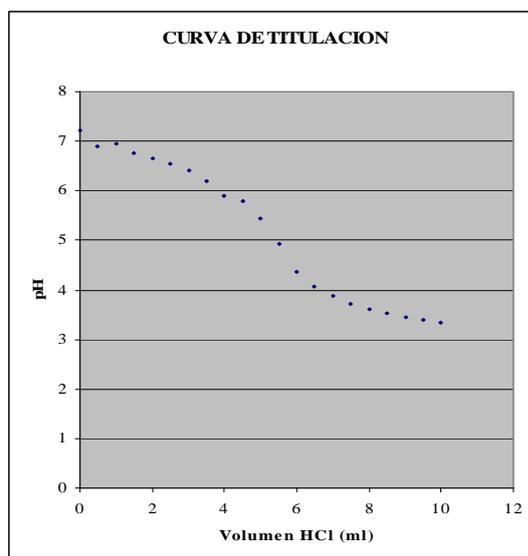
Para la determinación del modelo matemático del control del pH fue necesario un estudio de los posibles flujos de sustancias que pudieran influir sobre este.

### 2.4.1. Estudio experimental del pH de las aguas de escurrimiento de los pozos de drenaje del metro de Caracas

Para la realización del estudio se tomaron muestras del agua residente en un pozo de drenaje del metro, se sometieron a ensayos y los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Origen: Estructura De Ventilación N° 44 (El Valle)
- Color: Incolora
- Olor: Inodora
- Aspecto: Un Poco Turbio
- Ph: 7,22

La curva de titulación obtenida fue la siguiente:



**Figura 2.3** Curva de Titulación.

Se observa en la Curva de Titulación la forma característica de una grafica pH Vs. Volumen de titulante. En este caso el reactivo titulante es HCl. La forma de la curva es descendente debido a que la adición progresiva de HCl hace que el pH sea cada vez más ácido.

En la zona de pH entre 6,0 y 6,5 se observa un descenso ligeramente brusco, debido a la neutralización de la segunda función ácida.

En la zona de pH entre 4,0 y 5,5 se observa la neutralización de la primera función ácida del ácido carbónico.

#### 2.4.1.1 Concentración de elementos ácidos o básicos

Tomando en cuenta el pH inicial registrado en la muestra de agua suministrada (pH= 7,22) se puede inferir que el ácido presente en el agua sea el ácido carbónico cuya fórmula química es  $H_2CO_3$ .

El dióxido de carbono presente en la atmósfera es moderadamente soluble en agua. El resultado de esta reacción es el ácido carbónico.



El ácido carbónico es un ácido diprótico débil.

Por neutralización de soluciones de ácido carbónico es posible obtener dos tipos de sales: los carbonatos ácidos o bicarbonatos ( $HCO_3^-$ ) y los carbonatos ( $CO_3^{2-}$ )

La neutralización parcial del ácido carbónico produce iones bicarbonato



El ion  $HCO_3^-$  es más fuerte como base que como ácido ( $K_a = 5,6 \times 10^{-11}$ ;  $K_b = 2,3 \times 10^{-8}$ ). En consecuencia, las soluciones acuosas de  $HCO_3^-$  son débilmente alcalinas. Esta es la explicación por la que el pH inicial del agua sea de 7,22 que es un valor en la escala básica de pH.

#### 2.4.1.2 Constantes de equilibrio para el ácido, la base y el agua.

El ácido presente es el ácido carbónico. Su constante de equilibrio ( $K_a$ ) es:



$$K_{a1} = \frac{[H^+] \cdot [HCO_3^-]}{[H_2CO_3]} = 4,3 \times 10^{-7} \quad (2.7)$$

La segunda disociación produce



$$K_{a2} = \frac{[H^+] \cdot [CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} = 5,6 \times 10^{-11} \quad (2.9)$$

La otra especie que interviene es el agua. La constante de disociación ( $K_w$ ) es:



$$K_w = [H^+] * [OH^-] = 1,0 \times 10^{-14} \quad (2.11)$$

Teniendo en cuenta que el estudio esta basado en los pozos de drenaje del metro de Caracas, donde el flujo de estas aguas residuales esta conformado mayormente por los residuos de las precipitaciones que filtran el suelo, los arrastres, sedimentos y el nivel del manto freático, se determino que las sustancias que pueden influir sobre el pH son las sales existentes en el suelo..

¿Cómo pueden afectar estas sales al pH del flujo de agua?

Estas sales pueden afectar el pH del flujo de agua mediante el proceso de hidrólisis salina. Al ponerse en contacto con el suelo las precipitaciones, se produce un lavado natural del suelo es decir el exceso de sales existente en el suelo reacciona con el flujo de agua de las precipitaciones, dando lugar a la hidrólisis salina. Esto también sucede cuando sube el nivel del manto freático y se pone en contacto con el exceso de sales existentes en el suelo.

#### 2.4.2. Modelo matemático del pH

En la modelación matemática del pH se aplico el concepto de reacción invariante, definido por Aris (1965), es el resultado natural de la transformación de las variables estacionarias del sistema químico. Las variables estacionarias (concentración de especies) son transformadas en un grupo de variables las cuales dependen de las reacciones químicas (reacción variante) y de otro grupo, el cual es independiente a las reacciones (invariante de la reacción).

La invariante de la reacción tiene su origen en leyes básicas tales como la carga atómica y la conservación de la energía.

El método de las invariantes de la reacción fue generalizado por Waller y Makia (1980) y Gustafsson y Waller (1983) para sistemas con un arbitrario número de ácidos y bases.

Para determinar el pH, este se basa en su formula tradicional:

$$pH = -\log_{10} [H^+] \quad (2.12)$$

Donde:

$H^+$ : Es la concentración de los iones hidrogeno, ( $mol/m^3$ )

La obtención de la concentración de los iones  $H^+$  se realizo por la ecuación dada por Zanabria (1997):

$$Wb_4 \frac{\frac{ka_1}{H^+} + \frac{2ka_1ka_2}{[H^+]^2}}{1 + \frac{ka_1}{H^+} + \frac{ka_1ka_2}{[H^+]^2}} + Wa_4 + \frac{k_w}{H^+} - H^+ = 0 \quad (2.13)$$

Donde:

$Wb_4$ : Es la concentración de la invariante básica en el flujo de salida de la bomba, ( $mol/m^3$ ).

$Wa_4$ : Es la concentración de la invariante acida en el flujo de salida de la bomba, ( $mol/m^3$ ).

$ka_1$  y  $ka_2$ : Son coeficientes de velocidad de la reacción, ( $mol/m^3$ ).

$k_w$ : Es el coeficiente de velocidad de la reacción para el agua pura, ( $mol/m^3$ ).

Para esto es necesario primero obtener a  $Wa_4$  y  $Wb_4$ .

Según la investigación realizada por Zanabria (1997) estos se determinan de la siguiente manera:

$$A \times H \frac{dWa_4}{dt} = Q_1(Wa_1 - Wa_4) + Q_2(Wa_2 - Wa_4) + Q_3(Wa_3 - Wa_4) \quad (2.14)$$

$$A \times H \frac{dWb_4}{dt} = Q_1(Wb_1 - Wb_4) + Q_2(Wb_2 - Wb_4) + Q_3(Wb_3 - Wb_4) \quad (2.15)$$

Donde:

$Wa_1$ : Es la concentración de la invariante acida en el flujo de entrada, ( $mol/m^3$ ).

$Wa_2$ : Es la concentración de la invariante acida en el flujo de acido, ( $mol/m^3$ ).

$Wa_3$ : Es la concentración de la invariante acida en el flujo de base, ( $mol/m^3$ ).

$Wb_1$ : Es la concentración de la invariante básica en el flujo de entrada, ( $mol/m^3$ ).

$Wb_2$ : Es la concentración de la invariante básica en el flujo de acido, ( $mol/m^3$ ).

$Wb_3$ : Es la concentración de la invariante básica en el flujo de base, ( $mol/m^3$ ).

$A$ : Es el área de la sección transversal del pozo, ( $m^2$ ).

$H$ : Es la altura del pozo, ( $m$ ).

## 2.5. Simulación a Lazo Abierto ante Variaciones en las Variables Manipuladas

En la tabla 2.1 se muestra todos los datos necesarios para la simulación del control para el sistema de bombeo en los pozos del metro de Caracas.

Para realizar de forma metodológica la comprobación inicial del comportamiento de las variables de salida del sistema en presencia de perturbaciones constantes, se consideran para su análisis los siguientes casos:

**Tabla 2.1** Datos necesarios para la simulación.

$Q_1 = 0.00705 \text{ m}^3/s$	$Wa_3 = -3.05 \text{ mol/m}^3$
$Q_2 = 0.0004669 \text{ m}^3/s$	$ka_1 = 0.000447 \text{ mol/m}^3$
$Q_3 = 0.013242138 \text{ m}^3/s$	$ka_2 = 5.62 * 10^{-8} \text{ mol/m}^3$
$Wb_1 = 0 \text{ mol/m}^3$	$kw = 1 * 10^{-8} \text{ mol/m}^3$
$Wb_2 = 30 \text{ mol/m}^3$	$A = 24.7 \text{ m}^2$
$Wb_3 = 0.05 \text{ mol/m}^3$	$m(t) = 70 \%$
$Wa_1 = 3 \text{ mol/m}^3$	$k_p = 2.9656 * 10^{-4} \text{ (m}^3/s)/\%$
$Wa_2 = -3 \text{ mol/m}^3$	$\tau_p = 4 \text{ s}$

El software que se utilizó para la simulación dinámica del sistema de drenaje fue el Simulink de Matlab, a continuación en las figuras (2.25, 2.26, 2.27, 2.28) se muestran los esquemas desarrollados en el mismo. Este programa desarrollado, que tiene como base los modelos matemáticos del nivel y el PH constituyen una herramienta para realizar estudios similares en otras áreas o procesos y se puede utilizar por parte de los estudiantes como laboratorios virtuales, en la enseñanza de pregrado y postgrado, así como en centros de investigación.

En los trabajos analizados no se tiene referencia de un simulador de estas características, por su versatilidad y tener una cómoda interfase con el usuario.

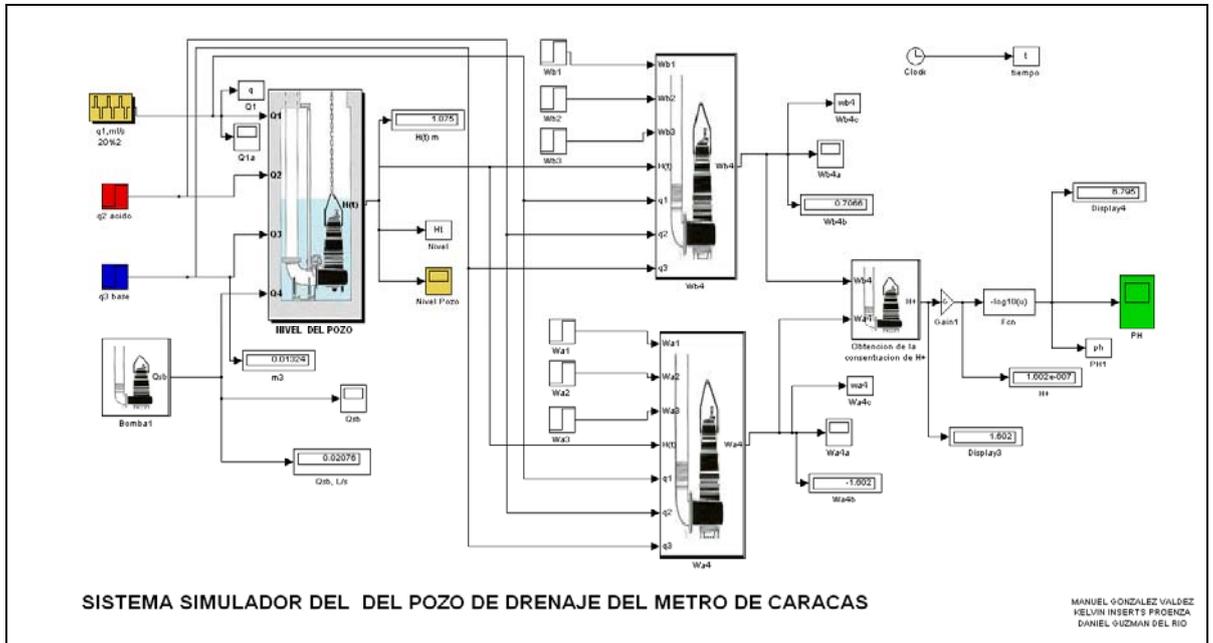


Figura 2.4 Ventana fundamental del Programa Simulador del Pozo en Matlab.

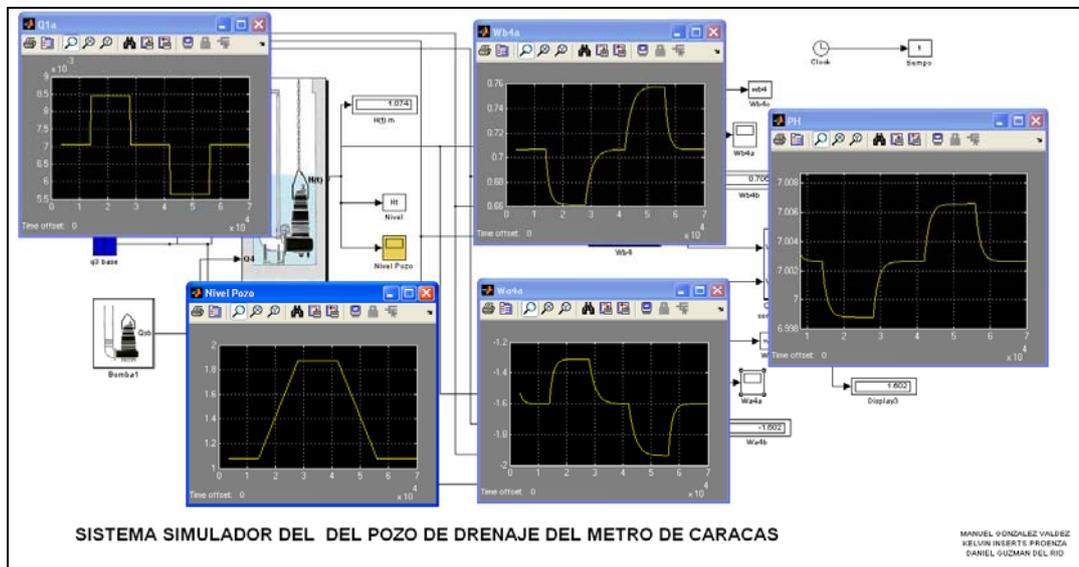
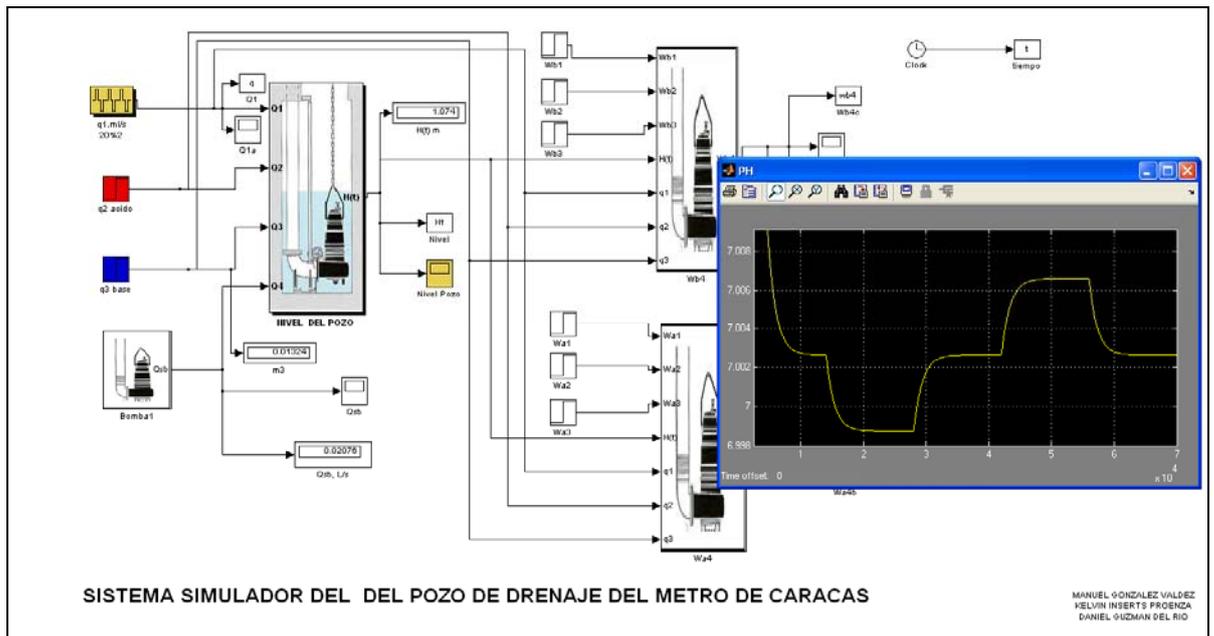
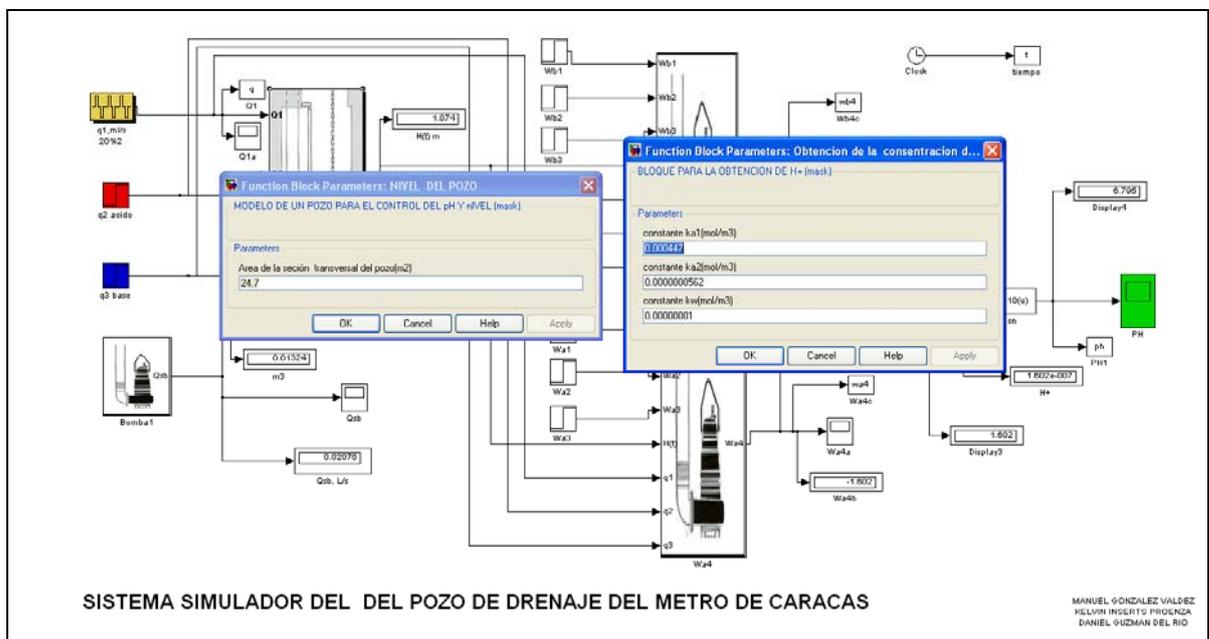


Figura 2.5 Ventana fundamental del Programa Simulador del Pozo en Matlab mostrando las principales variables de entradas y salidas.



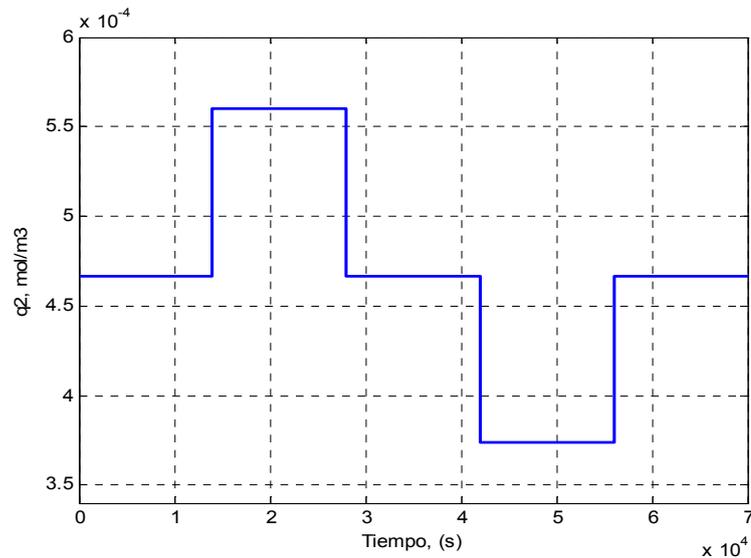
**Figura 2.6** Ventana fundamental del Programa Simulador del Pozo en Matlab mostrando las variaciones de la variable de salida *pH* .



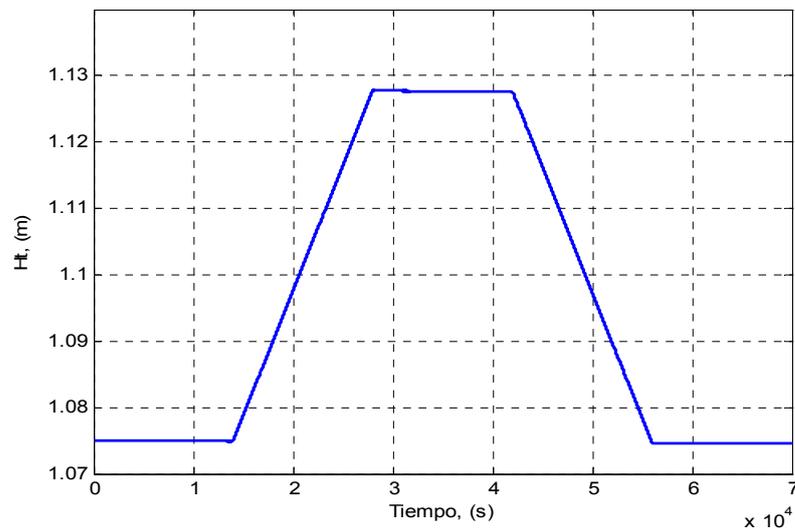
**Figura 2.7** Ventana fundamental del Programa Simulador del Pozo en Matlab mostrando los cuadros de interfase con el usuario.

Caso 1. . En las figuras (2.8, 2.9, 2.10, 2.11 y 2.12) se muestra el comportamiento de las

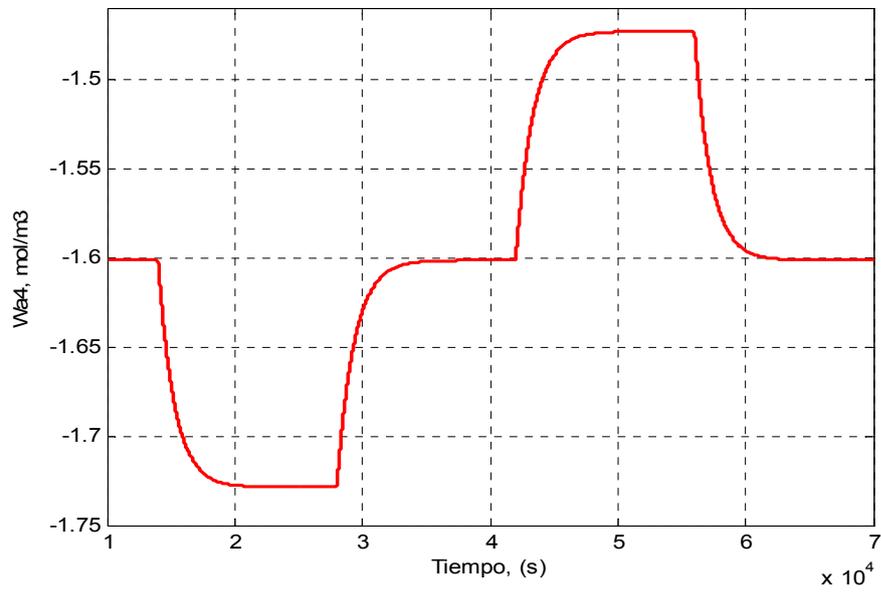
salidas  $H_t$ ,  $Wa_4$ ,  $Wb_4$  y  $pH$ , cuando se aplica una función paso escalón de  $\pm 20\%$  cada 14000 segundos en torno del valor nominal del flujo de ácido de entrada  $Q_2$ . Las entradas flujo  $Q_3$  (base) y  $Q_1$  son considerado como constantes y están en sus valores nominales de operación.



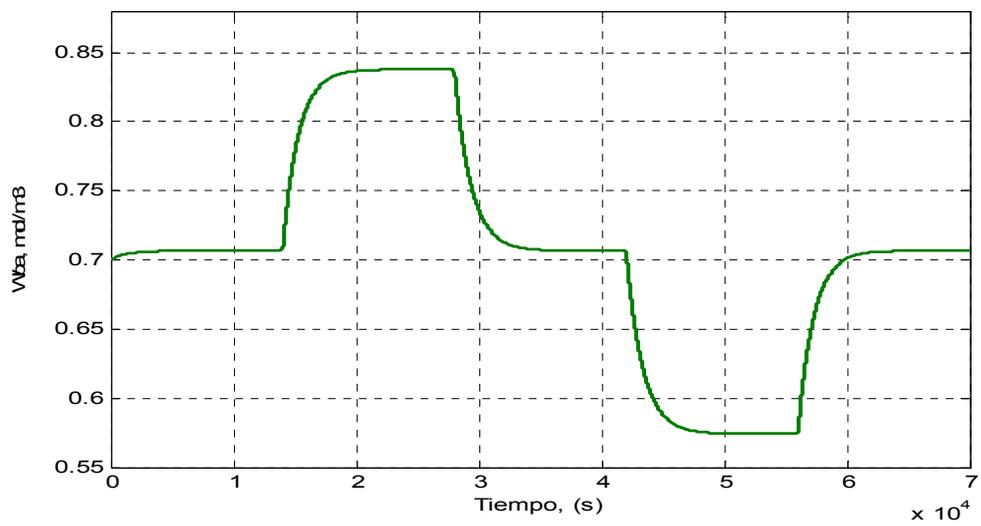
**Figura 2.8** Variaciones en el flujo ácido  $Q_2$  en la entrada del pozo.



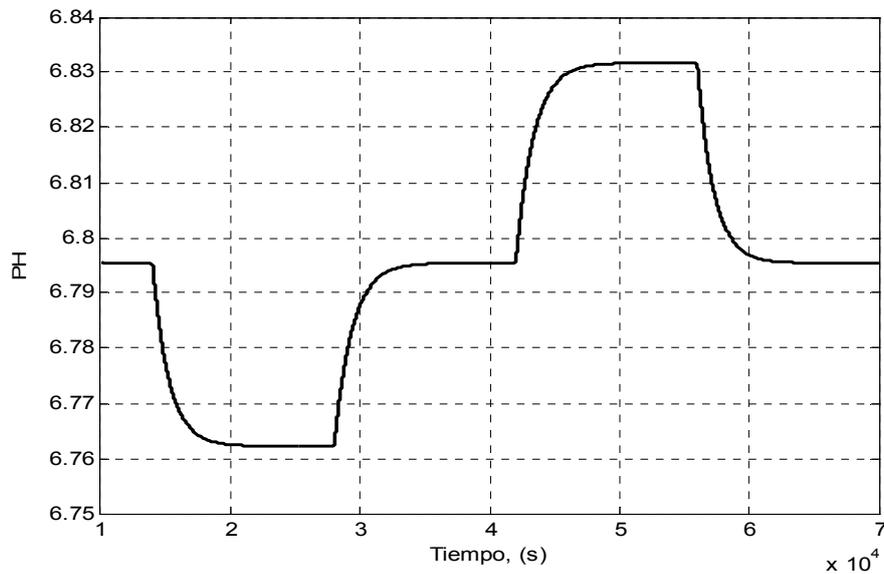
**Figura 2.9** Respuesta del nivel  $H_t$  ante variaciones en el flujo ácido  $Q_2$  a la entrada del Pozo.



**Figura 2.10** Respuesta de la concentración de invariantes ácidos ante variaciones en el flujo de ácido  $Q_2$  a la entrada del Pozo.



**Figura 2.11** Respuesta de la concentración de invariantes básicas ante variaciones en el flujo ácido  $Q_2$  a la entrada del Pozo.

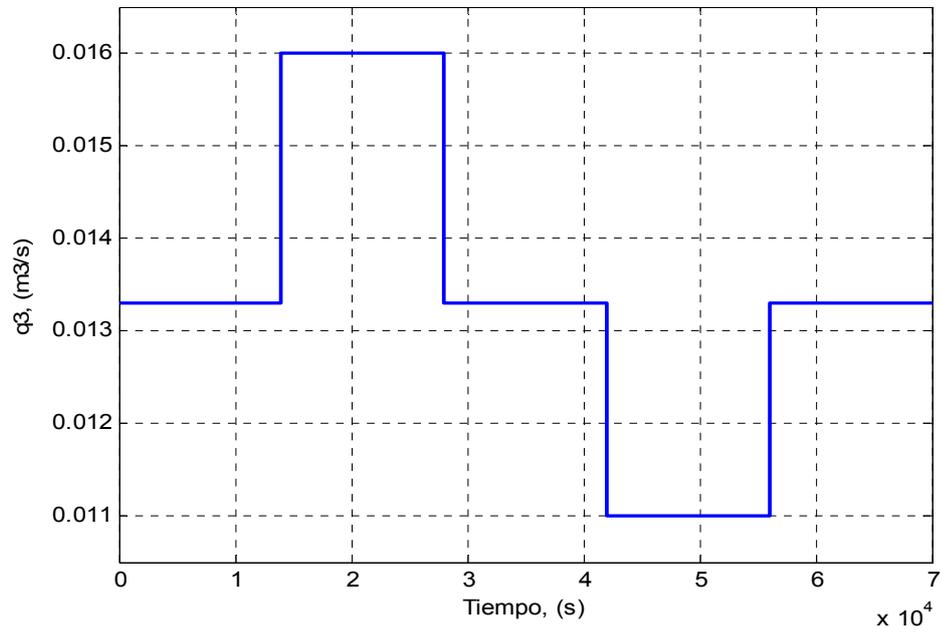


**Figura 2.12** Respuesta del  $pH$  del agua ante variaciones en el flujo ácido  $Q_2$  a la entrada del Pozo.

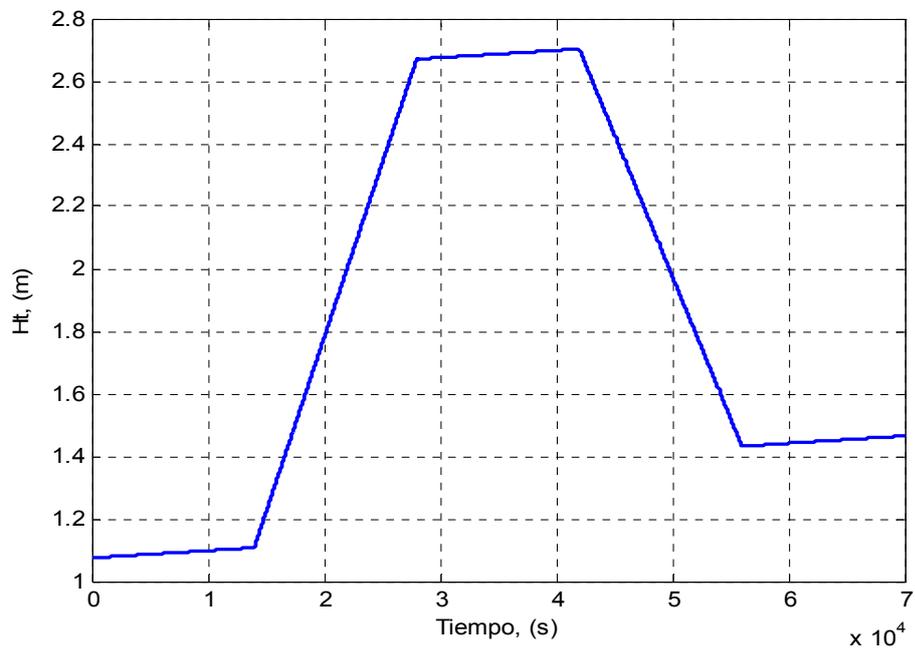
Caso 2. En las figuras (2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17) se muestra el comportamiento de las salidas  $H_t$ ,  $Wa_4$ ,  $Wb_4$  y  $pH$ , cuando se aplica una función paso escalón de  $\pm 20\%$  cada 14000 segundos en torno del valor nominal del flujo de base de entrada  $Q_3$ . Las entradas flujo  $Q_2$  (ácido) y  $Q_1$  son considerados como constantes y están en sus valores nominales de operación.

Caso 3. En la figuras (2.18, 2.19, 2.20, 2.21, 2.22) se muestra el comportamiento de las salidas  $Qsb$ ,  $H_t$ ,  $Wa_4$ ,  $Wb_4$  y  $pH$ , cuando se aplica una función paso escalón de  $\pm 20\%$  cada 14000 segundos en torno del valor nominal del parámetro que caracteriza la velocidad de la bomba  $m(t)$ . Las entradas flujo sustancias químicas  $Q_2$  (ácido),  $Q_3$  (base) y el flujo de entrada  $Q_1$  son considerados como constantes y están en sus valores nominales de operación.

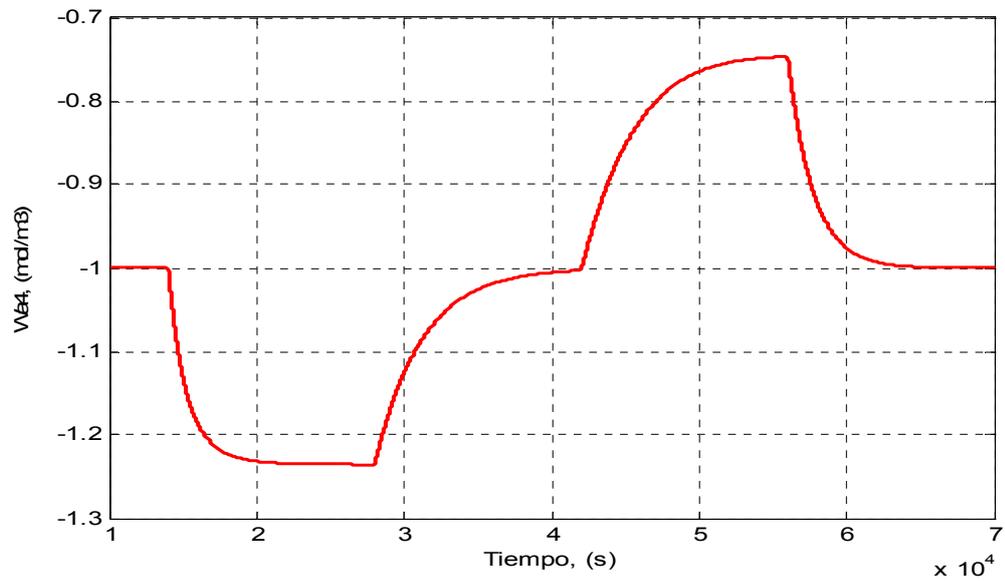
Caso 4. En la figuras (2.23, 2.24, 2.25, 2.26, 2.27) se muestra el comportamiento de las salidas  $H_t$ ,  $Wa_4$ ,  $Wb_4$  y  $pH$ , cuando se aplica una función paso escalón de  $\pm 20\%$  cada 14000 segundos en torno del valor nominal del flujo de líquido de entrada  $Q_1$  (perturbación). Las entradas flujo sustancias químicas  $Q_2$  (ácido) y  $Q_3$  (base) son considerado como constantes y están en sus valores nominales de operación.



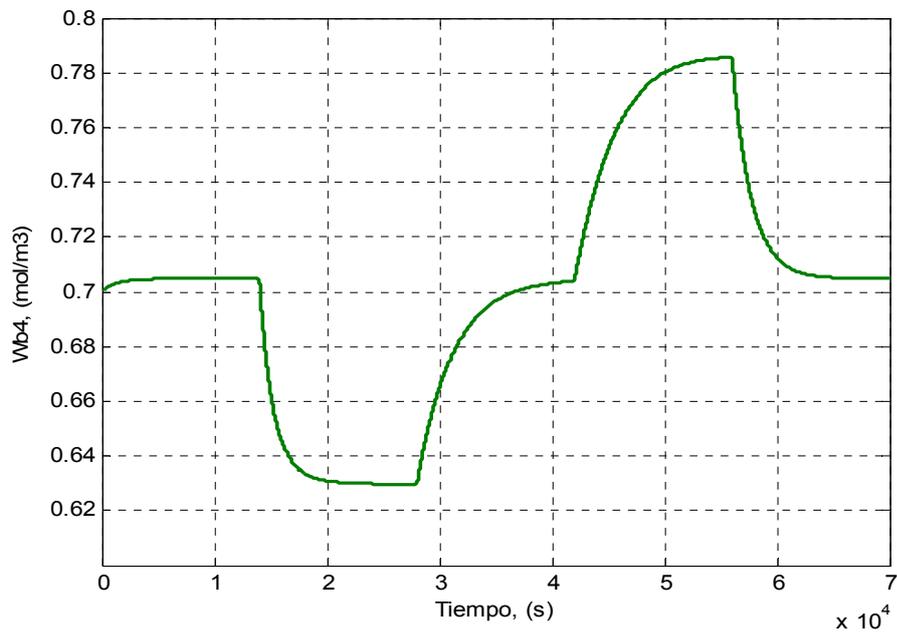
**Figura 2.13** Variaciones en el flujo base  $Q_3$  a la entrada del Pozo.



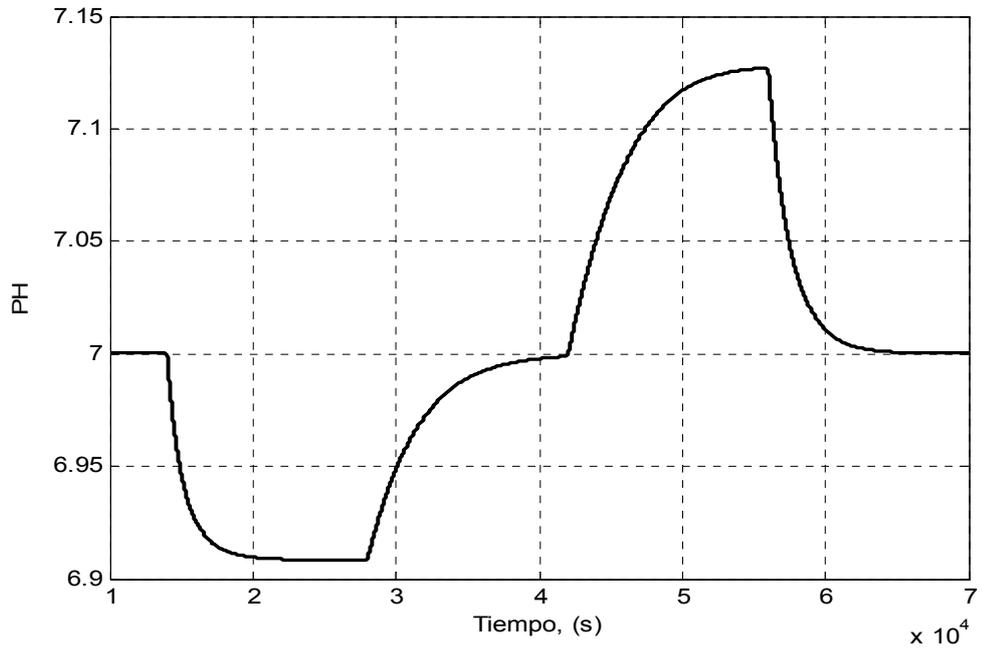
**Figura 2.14** Respuesta del nivel  $H_t$  ante variaciones en el flujo de base  $Q_3$  a la entrada del Pozo



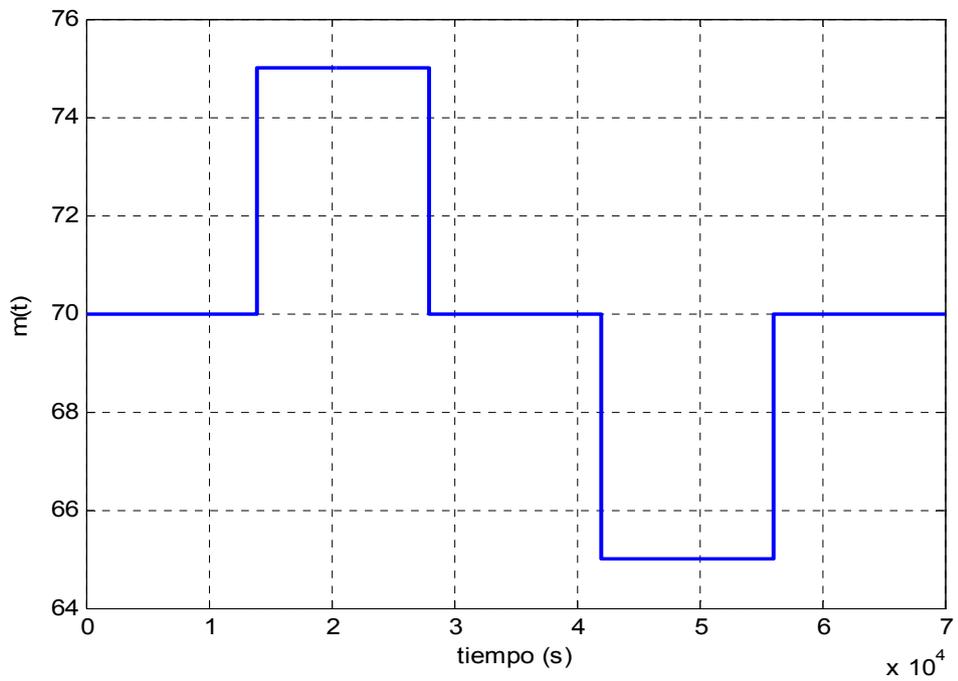
**Figura 2.15** Respuesta de la concentración de invariante ácido ante variaciones en el flujo de base  $Q_3$  a la entrada del Pozo.



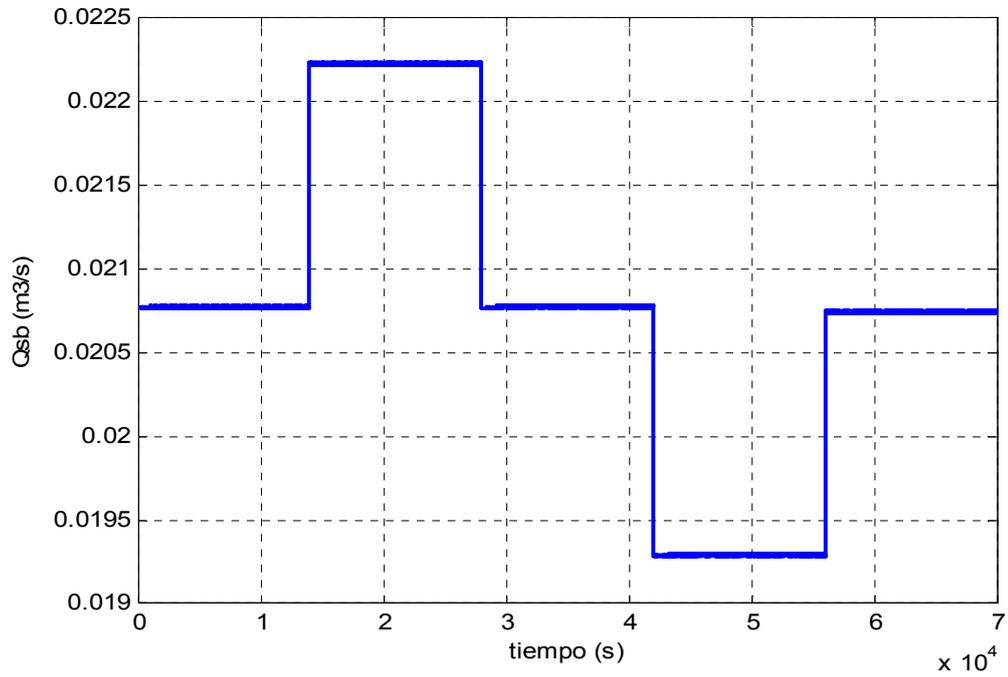
**Figura 2.16** Respuesta de la concentración de invariantes básicos ante variaciones en el flujo de base  $Q_3$  a la entrada del Pozo.



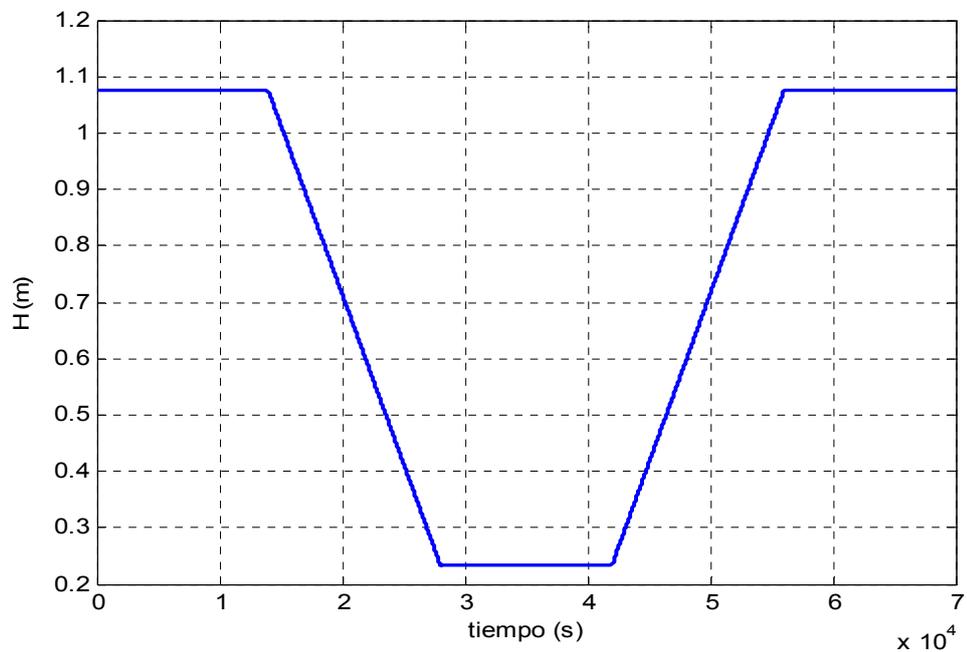
**Figura 2.15** Respuesta del  $pH$  del agua ante variaciones en el flujo de base  $Q_3$  a la entrada del Pozo.



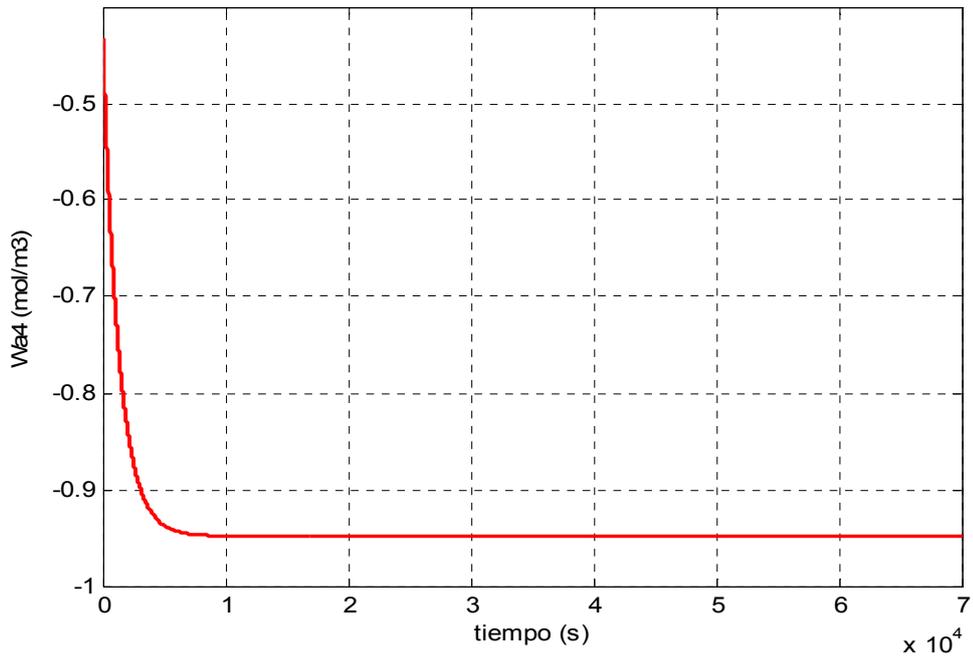
**Figura 2.18** Variaciones en el parámetro que caracteriza la velocidad de la bomba  $m(t)$  a la entrada.



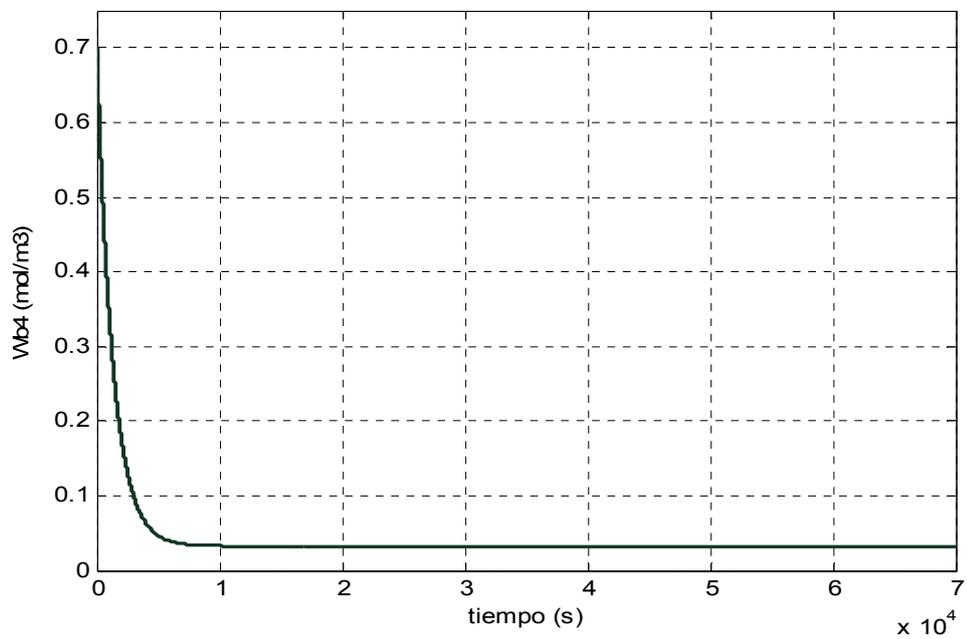
**Figura 2.19** Respuesta del flujo de salida de la bomba ante variaciones en el parámetro que caracteriza la velocidad de la bomba  $m(t)$  a la entrada



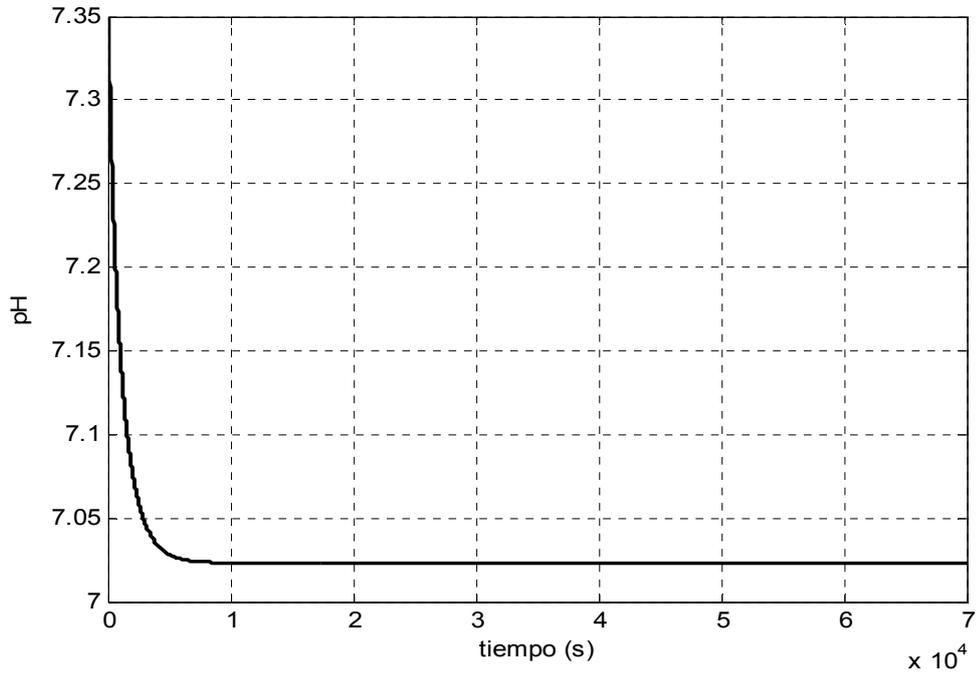
**Figura 2.20** Respuesta del nivel  $H_i$  ante variaciones en el parámetro que caracteriza la velocidad de la bomba  $m(t)$  a la entrada.



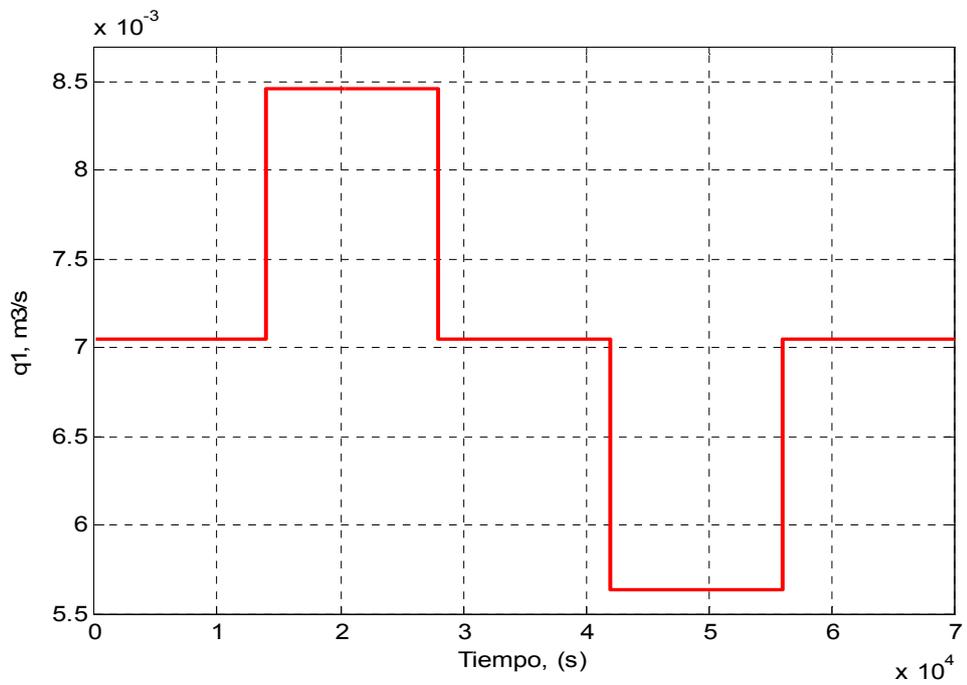
**Figura 2.21** Respuesta de la concentración de invariante ácido ante variaciones en el parámetro que caracteriza la velocidad de la bomba  $m(t)$  a la entrada.



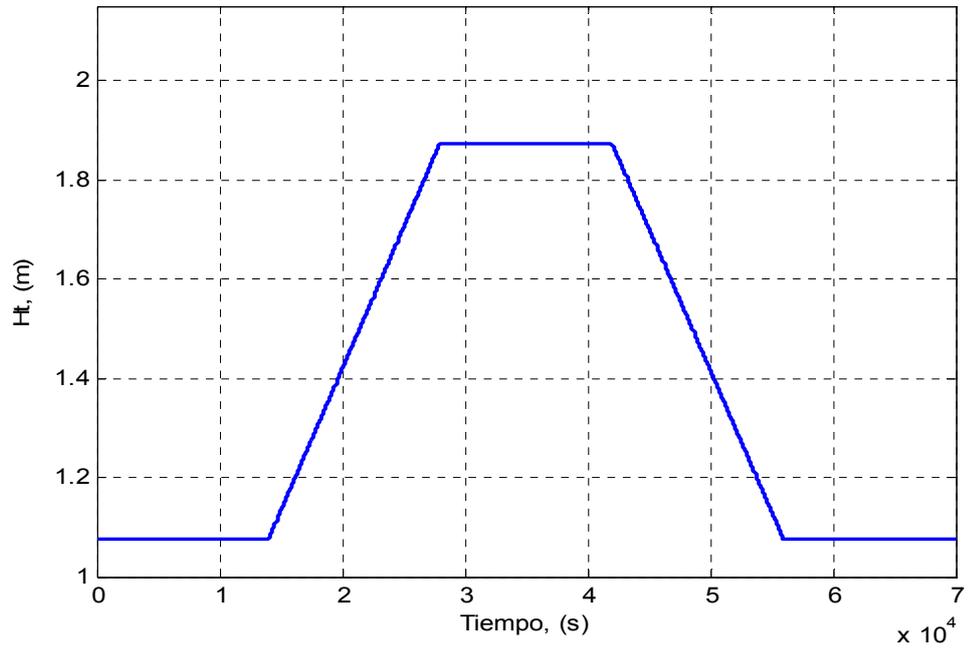
**Figura 2.22** Respuesta de la concentración de invariante básico ante variaciones en el parámetro que caracteriza la velocidad de la bomba  $m(t)$  a la entrada.



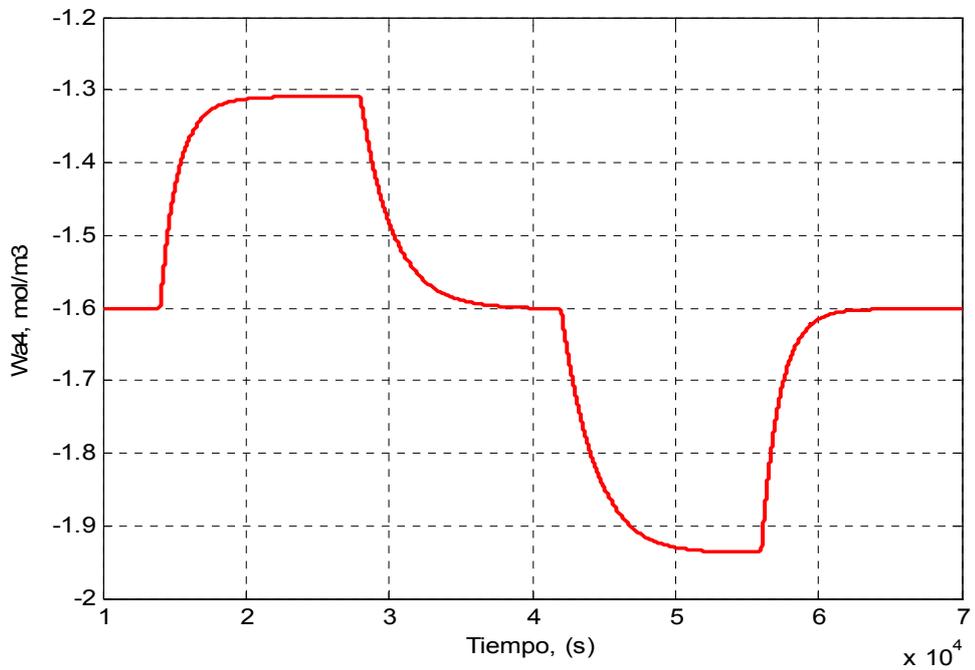
**Figura 2.23** Respuesta del  $pH$  del agua ante variaciones en el parámetro que caracteriza la velocidad de la bomba  $m(t)$  a la entrada.



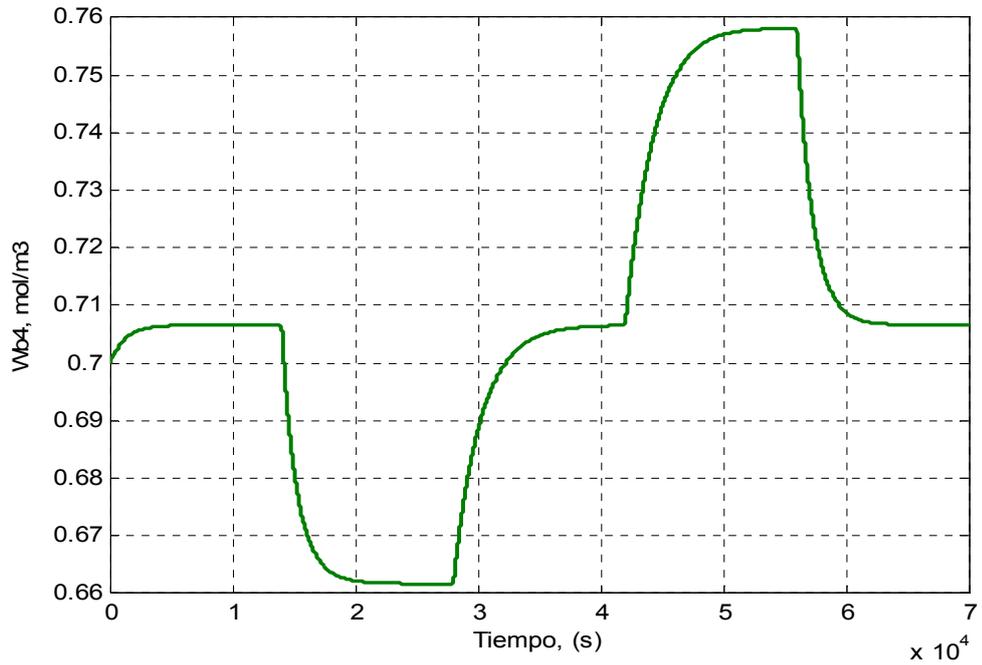
**Figura 2.24** Variaciones en la perturbación  $Q_1$  a la entrada del Pozo.



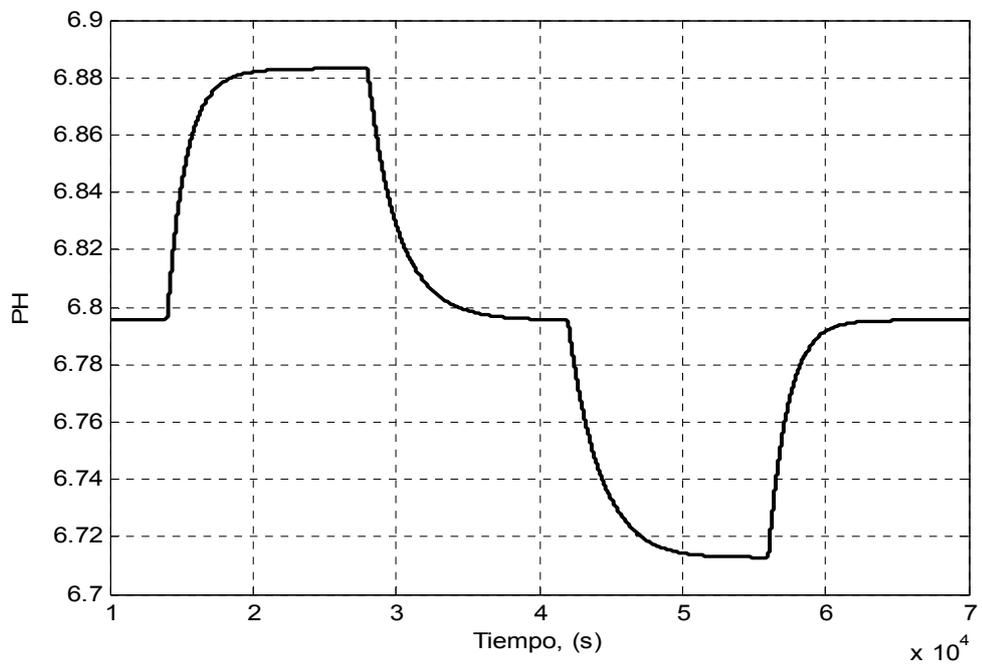
**Figura 2.25** Respuesta del nivel  $H_t$  ante variaciones en la perturbación  $Q_1$  a la entrada del Pozo.



**Figura 2.26** Respuesta de la concentración de invariantes acidas ante variaciones en la perturbación  $Q_1$  a la entrada del Pozo.



**Figura 2.27** Respuesta de la concentración de invariantes básicas ante variaciones en la perturbación  $Q_1$  a la entrada del Pozo.



**Figura 2.28** Respuesta del  $pH$  del agua ante variaciones en la perturbación  $Q_1$  a la entrada del Pozo.

En el caso 1, la respuesta del  $pH$  para una serie de variaciones tipo paso escalón en el flujo de entrada  $Q_2$  (ácido), muestra variaciones asimétricas de  $-0.00383$  y de  $0.00399$ . Esto permite detectar la presencia de no-linealidades en el sistema. En la respuesta de la concentración de las invariantes ácidas y básicas de salidas  $Wa_4$  y  $Wb_4$  se tiene un desempeño parecido, con asimetrías de  $0.1328 \text{ mol/m}^3$  y  $-0.1313 \text{ mol/m}^3$  para  $Wa_4$ , para  $Wb_4$  es de  $-0.0088 \text{ mol/m}^3$  y  $0.00913 \text{ mol/m}^3$ . El nivel  $H_t$  varió en rampa, incrementándose ante los aumentos en el flujo de entrada  $Q_2$  (ácido) y disminuyendo de la misma forma cuando el flujo es menor, alcanza un valor constante cuando el flujo de entrada  $Q_2$  (ácido), vuelve a su valor original de operación.

Esta respuesta del nivel  $H_t$  corresponde a la de un sistema integrador, lo que coincide con similares análisis realizados para depósitos o tanques por otros autores tales como Smith, C. A. y Corripio, A. B. (1997).

En el caso 2, la respuesta del  $pH$  para una serie de variaciones tipo paso escalón en el flujo de entrada  $Q_3$  (básico), muestra variaciones asimétricas de  $-0.0915$  y de  $0.1278$ . Esto permite detectar la presencia de no-linealidades en el sistema. En la respuesta de la concentración de las invariantes ácidas y básicas de salidas  $Wa_4$  y  $Wb_4$  se tiene un desempeño parecido, con asimetrías de  $-0.0751 \text{ mol/m}^3$  y  $0.0817 \text{ mol/m}^3$  para  $Wa_4$ , para  $Wb_4$  es de  $-0.235 \text{ mol/m}^3$  y  $0.25603 \text{ mol/m}^3$ . El nivel  $H_t$  varió en rampa, incrementándose ante los aumentos en el flujo de entrada  $Q_3$  (básico) y disminuyendo de la misma forma cuando el flujo es menor, alcanza un valor constante cuando el flujo de entrada  $Q_3$  (básico), vuelve a su valor original de operación.

En el caso 3, la respuesta del  $pH$  para una serie de variaciones tipo paso escalón en el parámetro  $m(t)$  a la entrada de la bomba, muestra variaciones que responden a una ecuación de primer orden. En la respuesta de la concentración de las invariantes ácidas y básicas de salidas  $Wa_4$  y  $Wb_4$  se tiene un desempeño parecido. El nivel  $H_t$  varió en rampa, disminuyendo ante los aumentos en el parámetro de entrada  $m(t)$  y incrementándose de la misma forma cuando es menor, alcanza un valor constante cuando el parámetro de entrada  $m(t)$ , vuelve a su valor original de operación.

En el caso 4, la respuesta del  $pH$  para una serie de variaciones tipo paso escalón en el flujo de entrada  $Q_1$  (perturbación), muestra variaciones asimétricas de 0.13639 y de  $-0.1118$ . Esto permite detectar la presencia de no-linealidades en el sistema, aunque no muy acentuadas como en otros procesos. En la respuesta de la concentración de las invariantes ácidas y básicas de salidas  $Wa_4$  y  $Wb_4$  se tiene un desempeño parecido, con asimetrías de  $-0.04492 \text{ mol/m}^3$  y  $0.05149 \text{ mol/m}^3$  para  $Wa_4$ , para  $Wb_4$  es de  $0.2551 \text{ mol/m}^3$  y  $-0.2912 \text{ mol/m}^3$ . El nivel  $H_t$  varió en rampa, incrementándose ante los aumentos en el flujo de entrada  $Q_2$  (ácido) y disminuyendo de la misma forma cuando el flujo es menor, alcanza un valor constante cuando el flujo de entrada  $Q_2$  (ácido), vuelve a su valor original de operación.

Partiendo de la teoría, según Deshpande (1989), se tienen las siguientes ecuaciones de transferencia para el sistema multivariable representado en la figura 2.1:

$$H_p(s) = G_{11}(s)Q_{sb}(s) + G_{12}(s)Q_{sust.quim.}(s) + Q_{agua}(s) \quad (2.16)$$

$$pH(s) = G_{22}(s)Q_{sust.quimica} + G_{21}(s)Q_{sb}(s) + Q_{agua}(s) \quad (2.17)$$

En su forma matricial:

$$Y(s) = \begin{bmatrix} H_p(s) \\ pH(s) \end{bmatrix} \quad M(s) = \begin{bmatrix} Q_{sb}(s) \\ Q_{sust.quim}(s) \end{bmatrix} \quad G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad D(s) = \begin{bmatrix} D_1(s) \\ D_2(s) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$Y(s) = G(s)M(s) + D(s) \quad (2.19)$$

Donde:

$Y(s)$  Vector de las variables de salida o controladas;

$M(s)$  Vector de las variables manipuladas o de control;

$G(s)$  Matriz de funciones de transferencia del proceso;

$D(s)$  Disturbios.

Entonces la Matriz de funciones de transferencia del proceso de drenaje del metro de Caracas, teniendo en cuenta como variables de salida el nivel del pozo y el pH de las aguas del mismo, puede ser escrita como:

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{H_p(s)}{Q_{sb}(s)} & \frac{H_p(s)}{Q_{sq}(s)} \\ \frac{pH(s)}{Q_{sb}(s)} & \frac{pH(s)}{Q_{sq}(s)} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Una vez obtenidos los resultados de las simulaciones con Matlab en lazo abierto del sistema no lineal mostradas en el capítulo 2, a partir de las curvas de reacción del proceso se obtienen las funciones de transferencias componentes de la matriz anterior, quedando:

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{1.47}{s(0.03s+1)} & \frac{0.0004}{s} \\ 0 & \frac{37}{6.05s+1} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Donde:

En el caso de  $G_{11}(s)$  y  $G_{22}(s)$   $K = \frac{\Delta E}{\Delta S}$  y  $\tau(s) = t$  para el 67% de  $\Delta S$ , para

$G_{12}(s)$ ,  $K = \tan(\alpha)$

$\Delta E$  Es la variación a la entrada.

$\Delta S$  Es la variación a la salida.

$\alpha$  Es el ángulo de inclinación de la curva de  $H_t$ .

Además se obtienen las funciones de transferencia de las perturbaciones:

$$D(s) = \begin{bmatrix} D_1(s) \\ D_2(s) \end{bmatrix} \quad D(s) = \begin{bmatrix} \frac{K}{\tau S} \\ \frac{K}{\tau S + 1} \end{bmatrix} \quad G_{(s)} = \begin{bmatrix} \frac{3}{s} \\ \frac{85}{6s+1} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

La Matriz de Funciones de Transferencia del Sistema de Drenaje, teniendo en cuenta las variaciones en el flujo básico, así como la matriz de sus ganancias tendrían la forma:

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{1.47}{s(0.03s+1)} & \frac{0.0004}{s} \\ 0 & \frac{37}{6.05s+1} \end{bmatrix} \quad K = \begin{bmatrix} 1.47 & 0.0004 \\ 0 & 37 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

## 2.6. Conclusiones

En este capítulo se realizó la modelación matemática y la simulación dinámica en lazo abierto del sistema de drenaje del metro de Caracas, caracterizándose las dos variables fundamentales, el nivel del pozo y el PH.

El modelo teórico desarrollado, que tiene su origen en trabajos anteriores se fundamenta en leyes de conservación de la masa, hace peculiar su aplicación al ser empleado para representar el sistema de drenaje del metro de Caracas en un entorno multivariable, aspecto del cual no se tiene referencia de otro trabajo anterior en este objeto.

La simulación dinámica muestra las no linealidades de los modelos empleados, especialmente el del PH, el cual es muy sensible a variaciones ante disturbios o cambios en la variable de entrada. El nivel muestra respuestas que corresponden a sistemas integrador con rápidas respuestas, no así el PH al cual se le determinó una lenta constante de tiempo, finalmente empleando el método de la curva de reacción se linealizó el modelo obtenido en forma de una Matriz de Funciones de Transferencia para las variables de salida y los disturbios.

# **CAPITULO III**

# CAPITULO III

---

## Control Multivariable para el Sistema de Drenaje

### 3.1 Introducción

Según Alegrechi (2004) el control de pH de una solución es crítico en una variedad de procesos. Los procesos de neutralización de pH son extremadamente difíciles debido a que exhiben un comportamiento no lineal debido a la curva estática de titración (que es la característica de salida del proceso), la cual puede variar varios órdenes de magnitud en un rango pequeño de valores de pH. Asimismo si esto se combina con el control del nivel, permite la solución de un problema multivariable interesante, asociado al objeto de estudio, en este caso el control del sistema de drenaje de los pozos del metro de Caracas.

El objetivo del presente capítulo es diseñar, basado en técnicas de control multivariable clásico y de avanzada, una estrategia que permita valorar el comportamiento en lazo cerrado del control del sistema de drenaje de las aguas residuales (nivel y pH) en el metro de Caracas.

### 3.2 Clasificación actual de los sistemas de control

Actualmente existen diferentes técnicas de control entre las cuales se encuentran las de control clásico y avanzado, las que tienen diferentes grados de aplicación en la industria. Una clasificación que muestra estos índices la refiere Seborg, D. E. (1994 y 2000), donde hace referencia a estas subdividiéndolas en cinco grupos. Aquí aún no se tienen en cuenta las combinaciones de técnicas surgidas últimamente como los neuropid, neurofuzzy, etc.

A continuación se presenta una clasificación, propuesta por Seborg, D. E. (1994 y 2000), acerca de las técnicas de control que son actualmente usadas en los procesos industriales.

1.- Estrategias de control convencional:

- control PID
- control de razón o relación
- control en cascada
- control anticipatorio (feedforward)

2.- Métodos de control avanzado. Técnicas clásicas:

- ganancia programada (gain scheduling)
- compensación de tiempo-muerto
- control por desacoplamiento
- control selectivo

3.- Métodos de control avanzado. Técnicas bastante usadas:

- control adaptivo
- control predictivo basado en modelo (MPC)
- control estadístico de calidad
- control por modelo interno (IMC)

4.- Métodos de control avanzado. Técnicas con algunas aplicaciones industriales recientes:

- control óptimo (LQR)
- sistema especialista
- control no lineal
- neurocontroladores
- control fuzzy

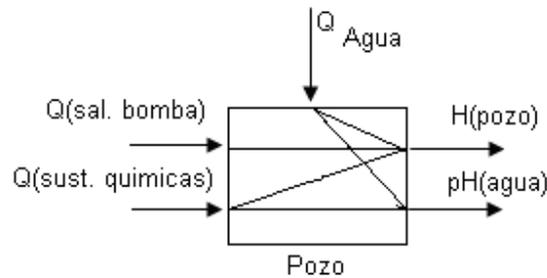
5.- Métodos de control avanzado: técnicas con pequeña aplicación industrial:

- control robusto ( $H_{\infty}$ , síntesis- $\mu$  )

### 3.3 Forma de definir los mejores pares de entrada salida.

A partir del análisis realizado en el epígrafe 2.2 del capítulo 2, como se muestra en la figura 3.1, se observa la presencia de un sistema multivariable de dos entradas y dos salidas con interacciones entre las mismas, de ahí que sea necesario desarrollar

técnicas para definir los mejores pares de variables de entrada y salida para el control del sistema.



**Figura 3.1** Dinámica de las variables del sistema de los pozos de drenaje.

En este aspecto, con el RGA mencionado en el capítulo 1, Deshpande, P. B. (1989) realiza un análisis superior extendiéndolo a sistemas con  $n$  entradas y  $n$  salidas, así como presenta la aplicación de otro método matemático ya existente a problemas concretos de control el cual ha tenido éxito en la industria; la Descomposición en Valores Singulares ó SVD, el cual está direccionado solamente a la naturaleza en lazo abierto del sistema, recomendando los mejores pares para los cuales el sistema en lazo abierto tiene mayores ventajas en términos de sensibilidad y de interacción de los lazos, esta propiedad lo hace superior al RGA, además de que permite evaluar alternativas de diseño tomando como vía el factor de la controlabilidad.

Al igual que el RGA su desventaja sigue radicando en no evaluar el factor dinámico. Un aspecto importante en los problemas prácticos de control multivariable es como las variables controladas y manipuladas tienen que ser escogidas en pares (paired), debido a que una incorrecta selección de los pares puede afectar el desempeño del sistema de control y reducir los márgenes de estabilidad. El número de posibles pares de variables a escoger es  $n!$ , donde  $n$  es el número de variables de entrada, supuesto igual al de variables de salida, Ogunnaike, P. B. (1994).

### 3.3.1. Técnica de la Descomposición en Valores Singulares (SVD)

Según Deshpande, P. B. (1989), la técnica de la Descomposición en Valores Singulares o SVD (Singular Value Decomposition), es un algoritmo numérico, desarrollado para minimizar los errores de computo cuando es preciso realizar muchas operaciones con

matrices. Partiendo entonces de la descomposición de la matriz de ganancia de régimen estacionario  $K$ , el SVD de esta matriz resulta en tres matrices componentes como sigue:

$$K = U\Sigma V^T \quad (3.1)$$

Donde:

$K$  - Matriz  $n \times m$  (matriz de las ganancias de la función de transferencia del proceso, cuando la frecuencia compleja  $s = 0$ ).

$U$  - Matriz ortonormal  $n \times n$ , cuyas columnas son llamadas vectores singulares de la izquierda.

$\Sigma$  - Matriz diagonal  $n \times m$ , de escalares, llamada de valores singulares y organizada en orden decreciente tal que  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq \dots \geq \sigma_m \geq 0$ .

$V$  - Matriz ortonormal  $m \times m$ , cuyas columnas son llamadas vectores singulares de la derecha.

Descomponiendo la matriz de las ganancias de la función de transferencia obtenida en el capítulo 2 en sus valores singulares (SVD), según la ecuación (3.1), se tiene:

Para el caso del flujo básico:

$$U = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} 37 & 0 \\ 0 & 1.47 \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Tomando el mayor componente de cada uno de los vectores de la izquierda ( $U$ ), con el mayor componente de cada uno de los vectores de la derecha ( $V$ ), aparecen los siguientes pares de variables manipuladas y controladas:

$Q_{sust.quimicas}(1) \Rightarrow pH(1)$  (Flujo de sustancias químicas con el pH a la salida).

$Q_{sb}(-1) \Rightarrow H_t(-1)$  (Flujo de salida de la bomba con nivel de pozo).

La relación entre el mayor valor singular y el menor  $(\sigma_m/\sigma_1)$  es denominada Número de Condicionamiento (Condition Number) CN, de la matriz de las ganancias, lo cual da una medida de las dificultades de desacoplamiento en problemas de control multivariable.

$$CN = \frac{\sigma_m}{\sigma_1} \quad (3.2)$$

Según las ecuaciones (3.1) y (3.2), el Número de Condicionamiento calculado es:

$$CN = 25,17$$

Un CN muy grande, indica que los objetivos de control especificados para un sistema pueden ser difíciles de obtener o físicamente inalcanzables.

De aquí concluimos que el sistema para flujo básico es el apropiado para efectuar el desacoplamiento, según Deshpande, P. B.(1989).

### **3.4 Propuesta de control clásico. Control PID Multilazo**

Según Amaya (2004), el pH es una magnitud de mucha importancia en un sin número de procesos biotecnológicos, como por ejemplo en la neutralización de desperdicios alimenticios. También ha cobrado gran relevancia en la minería y en el control de la contaminación, como es el caso de la neutralización de desechos industriales. *El control de esta variable es en general difícil de realizar debido a la dependencia altamente no lineal entre los reactivos que ingresan al sistema y el pH que se establece.* Esta no linealidad ya aparece en la definición, puesto que  $pH = -\log(H^+)$ . Además, el control de pH en ocasiones presenta un comportamiento de fase no mínima [13]; de ahí que a veces al disminuir el flujo de algún reactivo, se produce una disminución de pH y en otras al aumentar este flujo se produce de igual modo una disminución de pH. Usualmente el *objetivo de control del PH es regular el de la solución de salida a través de la manipulación del flujo de la solución base, compensando los posibles cambios en el flujo del buffer que se considera como una perturbación no medible. El flujo de la solución ácida, y el volumen del tanque se asumen constantes.* Usualmente para resolver el problema propuesto se utilizan métodos de control no lineal tales como el control por linealización exacta, el control adaptativo, control por ganancia programada y control óptimo.

No solo estas técnicas mencionadas podrían ser empleadas si no también los controladores PID convencionales, dentro de los cuales se encuentran los multilazos, cuyas técnicas de sintonía han encontrado un mayor desarrollo en la última década (Seborg, D. E. y otros (1989); Hwang, D. Sh. (1997); Weng, K. H. (1997); Shing-Jia, S. y otros (1998).

En los sistemas multivariables una de las formas de utilizar los controladores PID es utilizándolos como Controladores PID Multilazo. Esta variante ha tenido problemas con su sintonía o ajuste. Para el diseño y sintonía de un sistema que emplea el Control PID Multilazo, existen varios métodos como el utilizado por Niederlinski, A. (1971) y el método heurístico, basado en la generalización del método que para sistemas SISO fue desarrollado por Ziegler-Nichols. Este método no alcanza una amplia aceptación por su complejidad y por presentar en algunos casos un bajo desempeño. Seborg, D. E. (1989), propone determinar el ajuste del controlador para cada lazo con los otros lazos de control operando en forma manual.

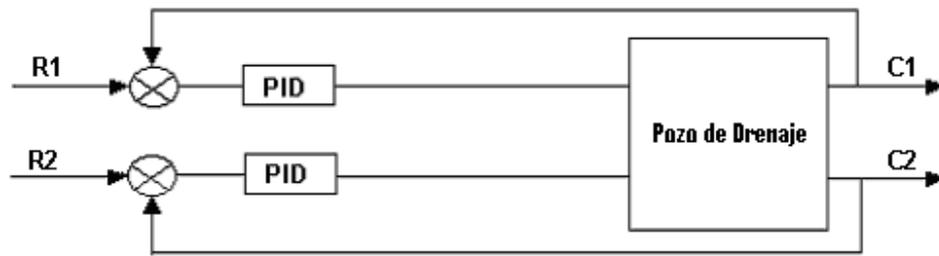
Otro de los métodos de sintonía del Controlador PID Multilazo es el llamado BLT (Biggest Log Modulus Tuning) desarrollado por Luyben, V. L. (1986). El se basa en el uso del criterio de estabilidad de Nyquist. Aquí es preciso determinar el valor exacto de la ganancia, para cuando el ángulo de defasaje es exactamente  $-180$  grados, para así poder comenzar los cálculos de los parámetros de los controladores SISO, a través de las fórmulas de sintonía de Ziegler-Nichols, (Desphande, P. B. (1989)). Esto provoca que su empleo sea limitado.

El método desarrollado por Basualdo, M. S. y Marchetti, J. L. (1990), es otra forma de sintonía del Controlador PID Multilazo. El representa una modificación del método BLT. La desventaja de estos dos últimos métodos, es que los mismos necesitan de un esfuerzo muy grande en la modelación, buscando una matriz de funciones de transferencia lo más completa posible.

### **3.4.1 Técnicas de Control PID Multilazo**

El empleo de una estrategia de control convencional para el control del sistema de bombeo de los pozos de drenaje del metro de Caracas, consiste en el uso de controladores PID SISO en cada uno de los lazos. Este sistema de control va a ser referido como un sistema de Control PID Multilazo, porque emplea más de un lazo simple utilizando en cada uno de ellos un controlador PID, figura 3.2. Aquí surgen algunos problemas que necesitan de solución, tales como:

- i) ¿El ajuste de una de las variables en un controlador afecta el otro y viceversa?
- ii) ¿Serian las interacciones de los lazos de control, un problema en el desempeño de los controladores?



**Figura 3.2** Sistema de control 2x2 con Controlador PID Multilazo.

El trabajo de Zanabria, O. (1997), hace referencias acerca de la utilización de los controladores PID en la industria, lo que es referido también por Clarke, D. W. y Gawthrop, D. J. (1981) y Cameron, F. y Seborg, D. E. (1983), donde mencionan también el suceso de tales controladores.

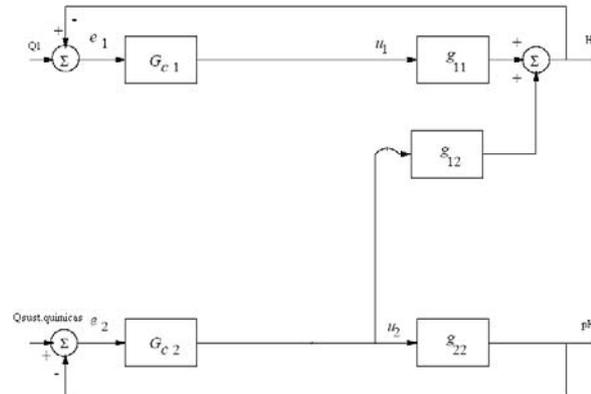
El Control PID Multilazo convencional es probablemente el método predominante para controlar sistemas multivariables en procesos industriales.

En esta sección se considera el Control PID Multilazo aplicado al proceso de bombeo de las aguas en los pozos del metro de Caracas, lo cual va a ser compuesto de dos controladores PI analógicos. El Control PID Multilazo será la base con la cual la técnica de control avanzado (Control Multivariable con Desacoplamiento), será comparada en este trabajo, de forma semejante a la propuesta por Shing-Jia, S. y otros (1998).

Como productos de avanzada en este campo aparecen el método de diseño y sintonía del Controlador PID Multilazo basado en las especificaciones de margen fase y de ganancia para sistemas multivariables, desarrollado por Weng, K. H., Tong, H. L. y Oon, P. G, (1997), el cual tiene su fundamento también en la idea de la formación de las bandas de Gershgorin, para a través de ellas medir la estabilidad y el desempeño de un sistema en lazo cerrado; solamente en el trabajo de estos autores, se muestran ejemplos de aplicación utilizando la simulación en sistemas previamente linealizados. El método basado en la sintonía secuencial propuestos por Shing-Jia, S. y Shyh-Hong, H (1998), propone que la sintonía del Controlador PID Multilazo se realice de forma secuencial iterativamente, utilizando una de las técnicas de sintonía SISO conocida.

### 3.4.2 Métodos de Diseño y Sintonía para el Controlador PID Multilazo

Para el diseño y sintonía del Controlador PID Multilazo, figura 3.3, se emplean el método desarrollado por Weng, K. H. (1997) y Shing-Jia, S. (1998), que garantizan la estabilidad y desempeño del sistema no lineal investigado en lazo cerrado.



**Figura 3.3** Esquema del Control PID Multilazo propuesto.

#### 3.4.2.1 Método de la Sintonía Secuencial

La idea de un diseño secuencial fue empleada para el control de sistemas multilazo recientemente, O'Reilly, J. y Leithead, W. E. (1991); Chiu, M. S. y Arkun, Y. (1992); Loh, A. P. y otros (1993); Shen, S. H. y Yu, C. C. (1994). El problema de diseño multivariable es descompuesto en secuencias de diseño de problemas SISO.

Según Shing-Jia, S. (1998), la sintonía del Controlador PID Multilazo, se puede hacer de forma secuencial de manera iterativa, empleando una de las técnicas de sintonía SISO conocidas. El problema presentado tiene que dar solución a dos cuestiones: ¿En que secuencia van a ser sintonizadas los múltiples lazos de control? y ¿Por qué una de las secuencias es ventajosa sobre la otra?.

Estas cuestiones pueden ser resueltas examinando el efecto mutuo entre los lazos, debido a la interacción. Según McAvoy, T. J. (1983); Loh, A. D. y otros (1993), Hwang, S. H. (1995) en los sistemas de control multilazo, el lazo que tenga una respuesta más rápida es menos afectado por las interacciones con un lazo de desempeño más lento, de forma inversa esto no se aplica.

Para el desarrollo de la sintonía secuencial Shing-Jia, S. (1998), propone estimar la velocidad de respuesta de los lazos basado en la frecuencia crítica. Tales

consideraciones resultan en la regla en la cual la secuencia de sintonía parte del lazo más rápido y con mayor frecuencia crítica, después se realiza la sintonía del lazo más lento. Otra regla es considerar aquel lazo más rápido, como desacoplado del resto del sistema y hacer la sintonía de ella independientemente, efectuando posteriormente variaciones de los parámetros de sintonía en el lazo más lento.

En este algoritmo de sintonía secuencial propuesto, el diseño del sistema de control multivariable se reduce al de múltiples lazos simples, donde la optimización del controlador PI proyectado es previamente escogida a partir del índice de desempeño, basado en el Peso de la Integral del Error Cuadrático (Weighted Integral of the Square Error, WISE) propuesto por Nishikawa, Y. y otros (1984), combinado con el Control por Modelo Interno IMC-PID (Internal Model Control), a partir de una serie de ecuaciones analíticas propuestas.

Para determinar la ganancia del controlador según Shing-Jia, S. (1998) sería:

$$K_{ci} = \frac{\tau_{ii}}{K_{pi} (0,005\tau_{ii} + 1,53\theta_{ii})} \text{ para } \theta_{ii}/\tau_{ii} < 0,25 \quad (3.3)$$

$$K_{ci} = \frac{1}{K_{pi} (0,292 + 0,482(\theta_{ii}/\tau_{ii}) + 0,023(\theta_{ii}/\tau_{ii})^2)} \text{ para } \theta_{ii}/\tau_{ii} \geq 0,25 \quad (3.4)$$

El tiempo integral sería:

$$\tau_{I_i} = 0,095 + 0,386(\theta_{ii}/\tau_{ii}) \text{ para } \theta_{ii}/\tau_{ii} \geq 0,25 \quad (3.5)$$

$$\tau_{I_i} = 1 \text{ para } \theta_{ii}/\tau_{ii} < 0,25 \quad (3.6)$$

Así la sintonía del controlador PI es realizada ajustando los parámetros  $Kc$  y  $Ti$ , para llegar a un desempeño aceptable.

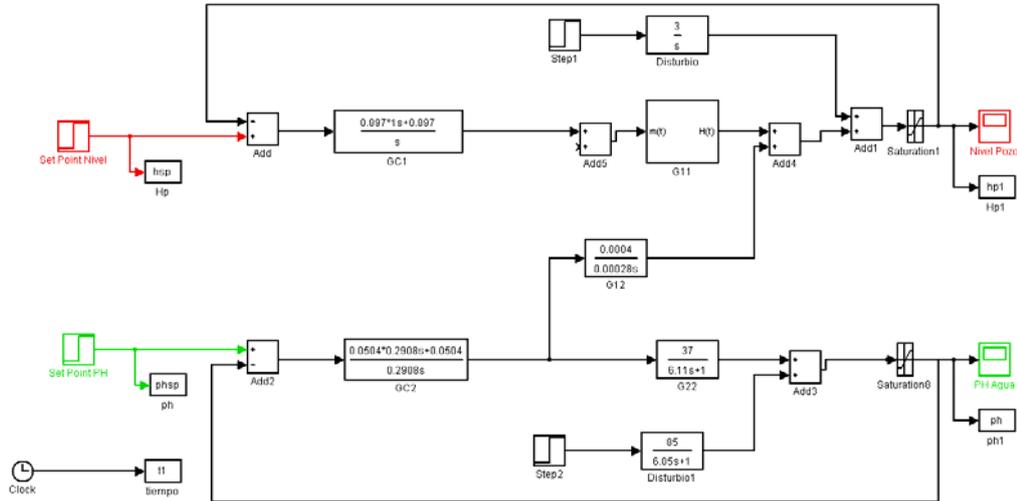
Una técnica común para a sintonía de controladores PID é adicionar  $T_A/2$  al tiempo muerto del proceso. Según Marlin (1995) esto da la posibilidad de tener un tiempo muerto para calcular los parámetros de los controladores.

$$\theta' = \theta + \frac{T_A}{2} \quad (3.7)$$

Donde  $T_A$  es el tiempo de muestreo, este según Seborg (1989) debe ser 0,1 menor que la constante de tiempo dominante del proceso.

Según las simulaciones la constante de tiempo dominante es de 22000 segundos, entonces  $T_A$  es  $=0,1 \times 22000 = 2200 \text{seg}$ .

Partiendo de las ecuaciones 3.3 hasta la 3.7 se obtienen los resultados de diseño mostrados en la tabla 3.1, expresados en el esquema de simulación del sistema multivariable controlado en la figura 3.4.



**Figura 3.4** Esquema del Control PI Multilazo propuesto en Simulink/Matlab.

**Tabla 3.1** Parámetros de ajustes del Controlador PI Multilazo a través de la sintonía secuencial para el sistema de drenaje.

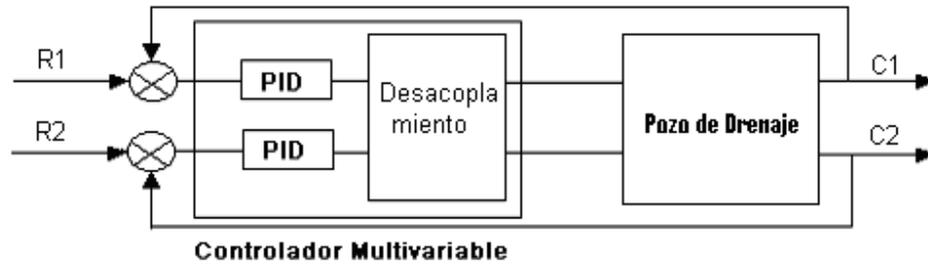
Lazo de control	$K_c$	$\tau_I$	Tipo de acción de control
$Q_{sust. químicas} \Rightarrow pH$	0.05	0.291	Directa
$Q_{sb} \Rightarrow H_t$	0.897	0.481	Directa

**3.5 Control Multivariable con Desacoplamiento.**

Para problemas de control moderno con grandes interacciones entre las variables controladas y manipuladas, según Guzmán (2001), las configuraciones de un Control PID Multilazo convencional pueden no estar aptas a proveer el control más adecuado. En estos casos, otras estrategias de control multivariable tales como la estrategia de control por desacoplamiento ofrecen potencial para mejoras significativas.

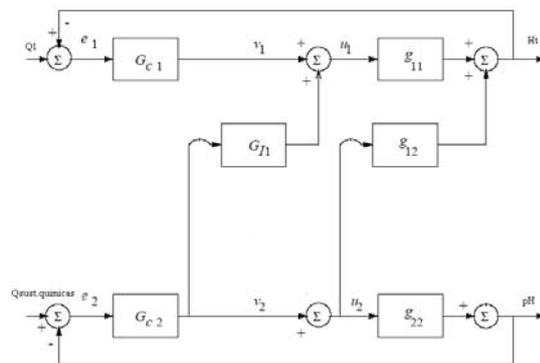
En el control por desacoplamiento, el objetivo principal es reducir las interacciones, adicionando un controlador, denominado desacoplador a la configuración convencional multilazo. Esto es realizado por la introducción de una función de transferencia adicional

o compensadora de interacciones, junto con el controlador de lazo simple, constituyendo entonces el Controlador Multivariable Desacoplado como es mostrado en la figura (3.5).



**Figura 3.5** Sistema de Control Multivariable con Desacoplamiento incorporando un compensador de interacciones.

En la figura 3.6, se muestra el esquema del Control Multivariable con Desacoplamiento propuesto.



**Figura 3.6** Esquema del Control Multivariable con Desacoplamiento propuesto.

### 3.5.1 Método de Diseño y Sintonía del Controlador Multivariable Desacoplado Convencional.

Las principales características para el diseño y sintonía del Controlador Multivariable Desacoplado Convencional están dadas en el trabajo de Harold, L. (1997), donde se aprecia que la técnica de desacoplamiento puede ser aplicada a procesos con muchas entradas y muchas salidas. Genéricamente un sistema  $n \times n$ , conduce a  $n^2 - n$  compensadores.

A partir de las consideraciones de Ogunnaike, P. B. (1994), para procesos  $n \times n$ , el desacoplamiento convencional (sea estático o dinámico), tomando como ejemplo el

caso del sistema de bombeo de los pozos, puede ser implementado a partir de la determinación de la matriz de desacoplamiento o compensador de interacciones como:

$$G_I(s) = G_p^{-1}(s)G_R(s) \quad (3.8)$$

Donde:

$G_I(s)$  - Matriz de desacoplamiento o compensador de interacciones.

$G_p^{-1}(s)$  - Matriz inversa de las funciones de transferencia del proceso.

$G_R(s)$  - Matriz de los elementos de la diagonal de la matriz de funciones de transferencia del proceso  $G_p(s)$ .

Como este ejemplo el sistema de bombeo de los pozos es **2x2**, la matriz de compensación tiene la forma:

$$G_I(s) = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Como este desacoplamiento de acuerdo a los estudios realizados es simplificado, la forma deseada para su matriz de compensación  $G_I(s)$ , puede ser determinada según Harold, L. (1997), resultando para el ejemplo del sistema de bombeo de los pozos:

$$G_{I_s}(s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ D_{21} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Donde:

$G_{I_s}(s)$  - Matriz de desacoplamiento o compensador de interacciones simplificado.

Para el caso del desacoplamiento estático solo están presentes las ganancias de régimen estacionario  $K_{ij}$ , de la función de transferencia del proceso, representados por  $K$ , en este caso el operador de Laplace  $s$ , se toma  $s=0$ . Entonces la expresión para determinar la matriz de desacoplamiento o compensador de interacciones estático a partir de la ecuación 3.8 resulta:

$$G_I = K_p^{-1}K_R \quad (3.11)$$

Donde:

$K_p^{-1}$  - Matriz inversa de las ganancias de régimen estacionario del proceso.

$K_R$  -Matriz de las ganancias de la diagonal de la matriz de régimen estacionario.

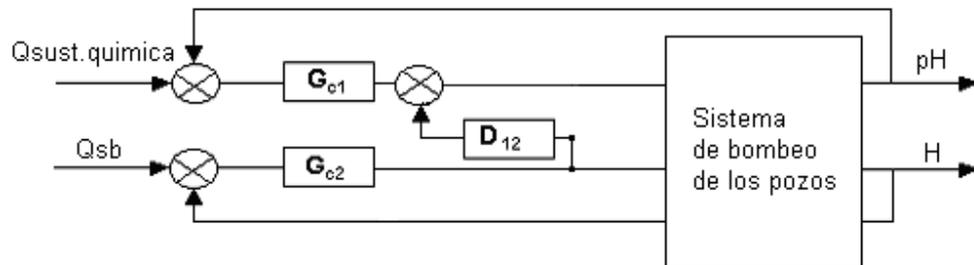
Resultando:

$$G_I = \begin{bmatrix} 1 & -0.0003 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

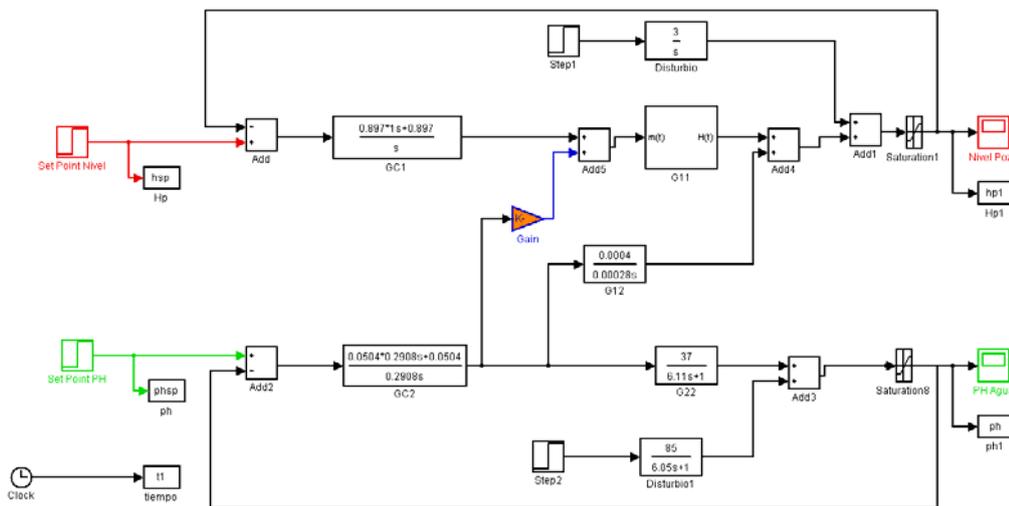
De la matriz  $G_I$  se obtiene el desacoplador estático:

$$D_{12} = -0.0003.$$

En el caso del ejemplo del sistema de bombeo de los pozos, el sistema con un desacoplamiento simplificado tiene la forma que se muestra en las figuras 3.7 y 3.8.



**Figura 3.7** Sistema con Desacoplamiento Simplificado, en el sistema de bombeo de los pozos.



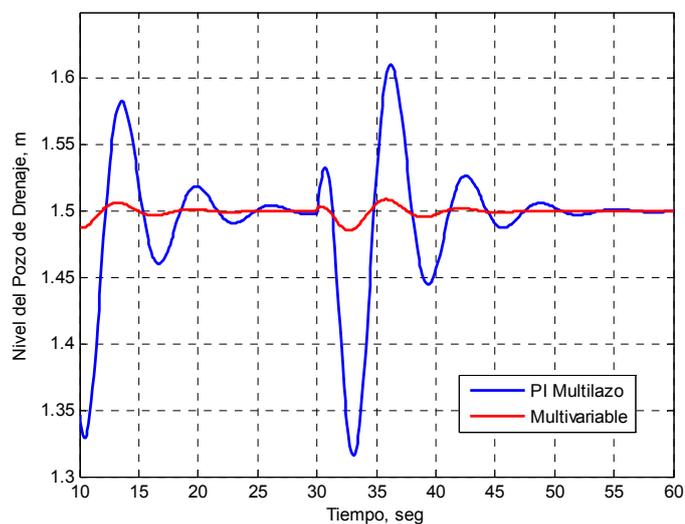
**Figura 3.8** Esquema del Control Multivariable con Desacoplamiento propuesto en Simulink/Matlab.

La ventaja de este tipo de desacoplamiento reside en su facilidad para ser determinado y implementado. Los parámetros de sintonía para este tipo de controlador van a ser los mismos empleados en la sintonía del Controlador PID Multilazo, con el objetivo de poder evaluar la acción de los desacopladores empleados.

### 3.6 Simulación de los Sistemas de Control

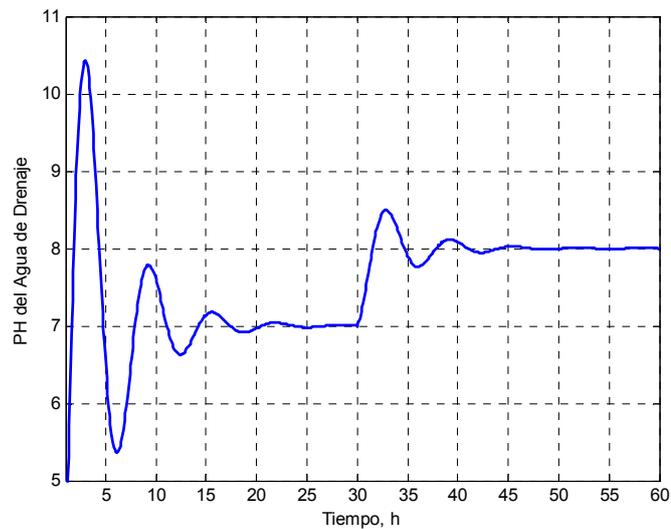
#### 3.6.1 Simulación ante Variaciones en las Variables Manipuladas

A continuación se muestran en las figuras de las respuestas de los controles diseñados para variaciones en la señal de referencia.



**Figura 3.9** Respuesta del Nivel en el sistema con Control PI Multilazo y Control Multivariable con Desacoplamiento ante variaciones de su referencia y de la del PH (muestra de interacciones entre los lazos).

Como se aprecia, la respuesta del Nivel en el sistema con Control PI Multilazo y Control Multivariable con Desacoplamiento ante variaciones de su referencia y de la del PH muestra interacciones entre los lazos, obteniendo un mejor desempeño con el Controlador Multivariable, dado el desacoplamiento introducido en la interacción existente, lo que permite que al manipular el flujo de sustancias químicas a la entrada del tanque este no afecte el nivel del mismo.



**Figura 3.10** Respuesta del PH del agua de drenaje en el sistema de Control PI Multilazo ante variaciones de su referencia.

El desempeño del Controlador PI Multilazo en este caso muestra muchas oscilaciones, lo que en si ya muestra poca estabilidad, es decir un acercamiento de sus polos al eje imaginario, pudiendo saturar al elemento final de control.

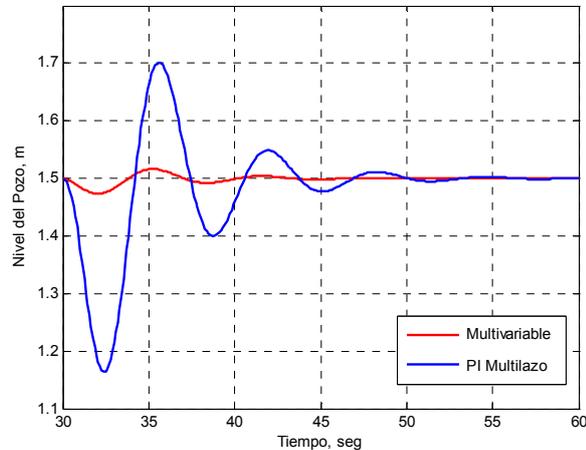
La respuesta del PH del agua de drenaje en el sistema de Control PI Multilazo ante variaciones de su referencia muestra un comportamiento aceptable dada la naturaleza de comportamiento lento de la variable, la sobreseñal esta dentro de los límites permitidos y la acomodación de la respuesta es realizada.

### 3.6.2 Simulación ante Variaciones en las Perturbaciones

A continuación se muestra en la figura 3.11 las respuestas del Control PI Multilazo y Multivariable con Desacoplamiento Estático ante variaciones en la perturbación correspondiente al lazo de la variable PH.

En este caso la respuesta del Nivel del Pozo de Drenaje en el sistema, con Control PI Multilazo y Control Multivariable con Desacoplamiento, ante variaciones en la perturbación correspondiente al lazo de la variable PH muestra el desempeño de los dos controladores empleados en la simulación, teniendo una mejor respuesta en el caso del Controlador Multivariable, dado que se minimiza la afectación causada por la interacción

existente entre los lazos, al ocurrir una perturbación en el lazo correspondiente a la sustancia química y el PH.



**Figura 3.11** Respuesta del Nivel del Pozo de Drenaje en el sistema con Control PI Multilazo y Control Multivariable con Desacoplamiento ante variaciones en la perturbación correspondiente al lazo de la variable PH.

### 3.7 Conclusiones

En el presente capítulo fue diseñada, basado comparativamente en técnicas de control clásico y de avanzada multivariable, una estrategia de control para el sistema de drenaje del Metro de Caracas que permita valorar el comportamiento en lazo cerrado del control del sistema de las aguas residuales (nivel y pH) para mejorar el desempeño operacional del mismo y así garantizar además una protección adecuada al medio ambiente.

Para esto a partir del modelo matemático desarrollado en el capítulo 2 se conformó el programa simulador basado en la herramienta Simulink del Matlab que permitió observar la dinámica de variación de estas dos variables, ante diferentes condiciones de operación, es decir ante variaciones en la señal de referencia y ante perturbaciones, tales como un aumento del flujo de agua. El desempeño mostrado por las dos técnicas de control empleadas mostró un mejor desempeño en el Controlador Multivariable con Desacoplamiento, en comparación con el Controlador PID Multilazo, siendo entonces ésta la estrategia de control a emplear finalmente en este sistema. Se comprobó que la oscilación de la respuesta al control del nivel, con un Controlador Multivariable con Desacoplamiento, es de una amplitud 10 veces menor que con un Controlador PID Multilazo.



# **CAPITULO IV**

## CAPITULO IV

---

### Valoración económica, social y ambiental

#### 4.1. Introducción

En este acápite se realiza un estudio económico, ambiental y social del sistema de drenaje del Metro de Caracas. Se analizan las pérdidas actuales existentes en el mismo por no contar con un control eficiente que permita su explotación racional, con mínimos costos operativos y de mantenimiento de los sistemas de bombeo. También son objeto de estudio, los impactos actuales sobre el medio ambiente y la sociedad.

El objetivo de este capítulo es realizar una valoración económica, social y ambiental de la propuesta de control para el sistema de bombeo de los puntos bajos del Metro de Caracas

#### 4.2. Valoración Económica

En toda la extensión de las cuatro líneas del Metro de Caracas funcionan sesenta y un sistemas de drenaje de aguas pluviales, los cuales se encargan de recoger el agua que se filtra a través de las paredes de las edificaciones subterráneas, proveniente del nivel freático del subsuelo.

La presencia de estos sistemas garantiza el desalojo del agua para que no se acumule en las vías y/o estaciones, lo que puede ocasionar daños a otros equipos e instalaciones, incluyendo la interrupción del servicio comercial. Son de especial atención los llamados "Puntos Bajos", que no son más que cambios de pendiente en la vía que provocan que los torrentes de agua de ambos extremos confluyan en un solo punto. Estos lugares son muy delicados, ya que cualquier falla que ocurra en los equipos de drenaje de este lugar pone en riesgo la operación comercial, debido a que la acumulación de agua crea un pozo que es imposible de atravesar por los trenes.

El tipo de bombas utilizadas para el propósito descrito es la llamada “bomba sumergible”, la cual es introducida dentro del tanque de recolección y acoplada a las tuberías del sistema a través de ganchos de sujeción o de bridas con tuercas. La marca predominante en los sistemas de drenaje es la “Flygt”, de origen sueco y con representación en el país. Se utilizan también este mismo tipo de bombas para el desalojo de las aguas negras de las estaciones y edificaciones hacia la red de cloacas de la ciudad, con un total de 50 sistemas de aguas negras en todo el Metro.

La construcción de los diferentes tramos del sistema Metro se ha realizado durante distintas épocas, lo que trae como consecuencia que hoy se presenten ciertas situaciones que disminuyen la confiabilidad de estos sistemas y dificultan la ejecución de un mantenimiento apropiado. Tal es el caso del tramo 1 de la línea I (PROPATRIA-CAÑO AMARILLO), donde se instalaron bombas marca PACO. El envejecimiento y deterioro de estos equipos, así como la ausencia de representantes y repuestos para esta marca en el mercado nacional, constituyen razones para una sustitución masiva.

Del mismo modo, en el caso de las bombas Flygt está prevista la sustitución de un lote importante de equipos que han envejecido mucho y han llegado al fin de su vida útil, y en la dotación de repuestos para reparar y repotenciar otro lote que puede seguir utilizándose por varios años.

Los costos asociados al mantenimiento del Sistema de bombeo de aguas acumuladas en los puntos bajos del Metro de Caracas pueden ser desglosados de la siguiente manera:

- ✓ Adquisición de bombas de repuesto.
- ✓ Reemplazo de partes y componentes para bombas Flygt.
- ✓ Desensamble e Inspección de la Bomba Completa
- ✓ Ensamble e Inspección de toda la Bomba.
- ✓ Tratamiento Superficial, Interno y Externo de la Bomba.
- ✓ Ajuste y Pruebas de Funcionamiento.
- ✓ Transporte de los Equipos.

En la tabla siguiente se indican los precios estimados de adquisición de 30 bombas Fligt de diferentes modelos.

**Tabla 4.1** precios estimados de adquisición de 30 bombas Fligt de diferentes modelos.

<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Cant.</b>	<b>Precio Estimado (Bs)</b>	<b>Total Estimado (Bs)</b>
Flygt	3152-HT	6	5.500.000,00	33.000.000,00
Flygt	3152-MT	6	5.500.000,00	33.000.000,00
Flygt	3127-HT	10	3.500.000,00	35.000.000,00
Flygt	3102-MT	4	2.300.000,00	9.200.000,00
Flygt	3085-HT	4	1.600.000,00	6.400.000,00
Flygt	2151-LT	2	6.500.000,00	13.000.000,00
<b>TOTAL</b>				<b>130.600.000,00</b>

En la tabla que se muestra a continuación se especifica la cantidad de bombas por modelo que es preciso reparar.

**Tabla 4.2 Cantidad a Intervenir**

<b>Modelo</b>	<b>Cantidad</b>
3152	7
3127	4
3126	6
3101	3
3085	4
2151	1
2125	1
<b>TOTAL</b>	<b>26</b>

En la tabla 4.3 que se muestra a continuación se efectúa el cálculo de las horas hombre anuales necesarias para el mantenimiento preventivo de los sistemas de drenaje de las estaciones y estructuras de ventilación.

**Tabla 4.3** Cálculo de las horas hombres anuales necesarias para el mantenimiento Preventivo de los Sistemas de Drenaje de las Estaciones y Estructuras

Equipos	Cant.	Rutina	Pers.	Descripción	Prev.	Dur.	Tot.H/H	
Sistemas de Drenaje	61	B	2	Verificar el funcionamiento de los tableros. Verificar el funcionamiento de los flotantes.	11	0:30	671:00	
		C	2	Rutina B Limpieza interna y externa de los tableros. Prueba de funcionamiento manual y automático Medición de amperaje y voltaje de las bombas	10	1:00	1220:00	
		F1	2	Rutina C Verificar funcionamiento de Válvulas Check. Ajuste de partes internas de los tableros. Medición de caudal.	1	6:15	762:30	
		F2	3	Verificación del estado del aceite. Verificación del aislamiento del estator.	1	2:45	503:15	
							SUB-TOTAL A	3156:45
							20% O.T.C	631:21
							10% O.S.M	315:40
							SUB-TOTAL B	4103:46
							10% ENT	410:22
							20% Otros	820:45
							TOTAL HH	<b>5334:54</b>
							TOTAL TEC	3:37

Equipos	Cant.	Rutina	Pers.	Descripción
Sistemas de Drenaje	61	C	2	Verificar el funcionamiento de los tableros.
				Verificar el funcionamiento de los flotantes.
				Limpieza interna y externa de los tableros.
				Prueba de funcionamiento manual y automático
				Medición de amperaje y voltaje de las bombas

En la tabla 4.4 se ilustra la frecuencia con la cual se realizan las labores de mantenimiento predictivo programadas.

**Tabla 4.4** Frecuencia con la cual se realizan las labores de mantenimiento predictivo

A: Diaria	365
B: Quincenal	24
C: Mensual	12
D: Trimestral	4
E: Semestral	2
F: anual	1

Es necesario invertir 5334,54 horas-hombre, comprometiendo el trabajo de 3,37 técnicos para realizar el mantenimiento preventivo anual de las 61 estructuras de ventilación o puntos bajos que se encuentran en las cuatro líneas del Metro de Caracas. En la tabla que se muestra a continuación se muestra el precio estimado de los repuestos necesarios para la reparación y repotenciación de 40 bombas electrosumergibles.

**Tabla 4.5** Precio estimado de los repuestos necesarios para la reparación y repotenciación

<b>Descripción</b>	<b>Precio Estimado (Bs.)</b>
Lote de repuestos para bomba 3201	6.000.000,00
Lote de repuestos para bomba 3152	30.000.000,00
Lote de repuestos para bomba 3127	3.500.000,00
Lote de repuestos para bomba 3126	10.500.000,00
Lote de repuestos para bomba 3101	2.800.000,00
Lote de repuestos para bomba 3085	3.200.000,00
Lote de repuestos para bomba 2151	2.100.000,00
Lote de repuestos para bomba 2125	1.800.000,00

Mangueras y niples para instalación cámara húmeda	5.000.000,00
<b>TOTAL</b>	<b>64.900.000,00</b>

**Tabla 4.6** Análisis de precios unitarios para Reemplazo de Bombas y Componentes para bombas Fligt.

Costo Materiales	Costos Equipos	Costos Mano de Obra	Costos Indirectos	Total Costo Unitario
1.543.150,00	51.200,00	114.800,00	452.924,75	2.162.074,75

Los criterios utilizados para realizar el reemplazo de partes y componentes necesarios para repotenciar las bombas instaladas en la compañía anónima Metro de Caracas, así como la sustitución de algunas de ellas, toman en cuenta cuatro razones fundamentales, siendo estas las que se señalan a continuación:

- Necesidad de sustitución de partes y piezas debido al **desgaste** de elementos que están sometidos al roce constante durante la operación tales como: Anillos de desgaste, rodamientos, bujes, etc.
- Necesidad de sustitución de partes y piezas debido a la **deformación** de elementos pasivos encargados de garantizar el sellado y hermeticidad del equipo así como por ejemplo empaaduras, anillos, etc.
- Necesidad de sustitución de partes y piezas debido a la **corrosión** por haber estado operando en ambientes alcalinos, tales como por ejemplo: El impulsor, el eje, la carcasa, etc.
- Necesidad de sustitución o reparación de partes y piezas debido a daños ocasionados por **golpes** durante la operación, instalación y/o mantenimiento del equipo, trayendo como consecuencia fracturas o deformaciones permanentes.

Dentro de las cuatro razones arriba enumeradas, las tres primeras determinan la necesidad de una Reparación Mayor, en virtud del tiempo que tienen estos equipos en operación. La cuarta razón se da dependiendo del estado actual que cada equipo presente de manera individual, ya que se vincula con el régimen de trabajo al que han sido sometidos dichos equipos, como también con la ocurrencia de accidentes y hechos fortuitos que han afectado las bombas.

La implementación del sistema de control propuesto contempla la instalación de un sistema de adquisición de datos para el monitoreo del proceso, así como una serie de equipos cuyos costos se detallan a continuación:

**Tabla 4.7** Análisis de precios unitarios para la nueva propuesta de sistema de control multivariable

<u>Equipos/ Instrumentos</u>	<u>Cantidad</u>	<u>Costo (Bs F.)</u>
Sensores de Nivel	1	2.000
Unidad RTU (Terminal remoto)	1	4.000
Controlador lógico programable	1	1.000
Sensores de pH	1	2.000
Caudalímetros	1	2.000
Computadora portátil	1	4.000
Tarjeta de adquisición de datos	1	1.500
Software de Scada	1	12.000
Sistema de comunicación	1	5.000
Controladores PID	2	4.000
Total		38.500

La suspensión del servicio en una línea del metro debido a una inundación puede prolongarse por lapsos de hasta 8 horas. Ello ocasiona pérdidas en la facturación de boletos cuya magnitud viene dada por la cantidad de pasajeros que dejan de usar el servicio en ese lapso. Tomemos como ejemplo la línea 1, donde se moviliza la mayor cantidad de pasajeros. Si asumimos que todo el Metro moviliza diariamente alrededor de dos millones de pasajeros, en la línea 1 se movilizan como mínimo 500000.

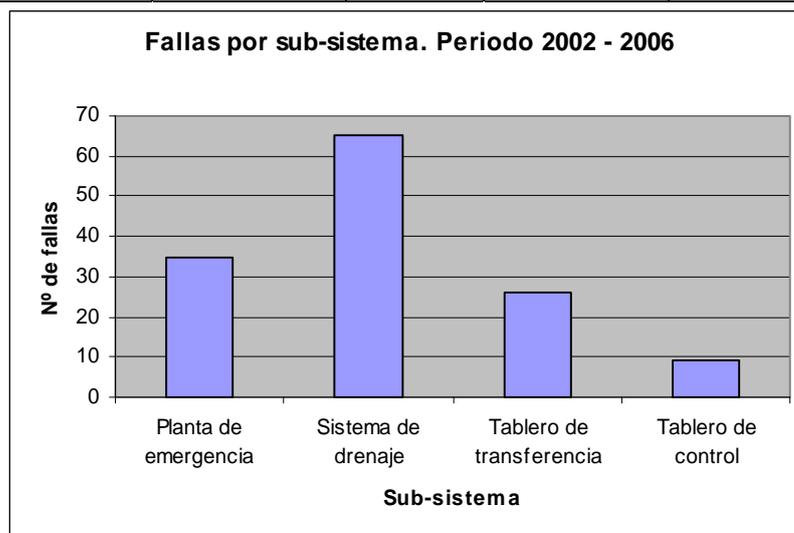
Esta línea factura por concepto de boletería diariamente 250 mil bolívares fuertes, en un horario de servicio de 16 horas. Una parada de 4 horas ocasiona una pérdida en la facturación de 62 mil quinientos bolívares fuertes.

Por otra parte, en la línea 1 se encuentran instalados 8 estructuras de ventilación o puntos bajos, los cuales requieren de una inversión conjunta de 120.000,00 bolívares

fuerzas en el sistema de control multivariable, a los cuales debemos adicionar los costos de software de Scada, sistema de comunicación y tarjeta de adquisición de datos, los cuales suman 17.500,00 bolívares fuertes, para un total de 137.500,00 bolívares fuertes de inversión total. En el siguiente cuadro se observan de forma detallada estos cálculos.

**Tabla 4.8** Análisis de pérdidas y tiempo de amortización

Pérdidas por facturación al ocurrir un evento	Inversión en Sistema de Control propuesto	N <sup>a</sup> de eventos por año según estadísticas	N <sup>a</sup> de eventos por año por línea	Pérdidas por facturación por año por línea	Pérdidas totales por año	Tiempo de amortización
62.500,00	137.500,00	13	3,25	203.125,00	812.500,00	0,17 años



**Figura 4.1** Numero de fallas por sub-sistemas en el periodo 2002 al 2006

### 4.3. Valoración Social

La compañía anónima Metro de Caracas, fue creada con la finalidad de contribuir al desarrollo del transporte colectivo en el área metropolitana de Caracas, mediante la planificación, construcción y explotación comercial de un sistema integrado de transporte, conformado por una red ferroviaria metropolitana (METRO), y una red

alimentadora de transporte superficial, que preste el servicio público de transporte en forma efectiva, eficiente y confiable. El metro de Caracas tendrá para el año 2010 una extensión de 90 kilómetros lineales y dispondrá de 76 estaciones distribuidas en cuatro líneas, y está proyectado para movilizar la cantidad de dos millones cien mil pasajeros por día. En su construcción se han generado 107 mil empleos directos.

El impacto social generado por el Metro sobre los habitantes de Caracas puede apreciarse en tres dimensiones:

- a) El acceso rápido, seguro y económico de sus usuarios a los grandes centros culturales, educacionales, comerciales, de esparcimiento y recreación, servicios de salud y fuentes de empleo existentes en la ciudad, independientemente del lugar donde vivan y el estrato social al que pertenezcan.
- b) La creación y fortalecimiento de un servicio público estatal que funciona con altos estándares de calidad de servicio, lo cual genera en la población un sentido de pertenencia y orgullo por la satisfacción de una necesidad vital.
- c) La promoción y patrocinio por parte de la compañía Cametro de actividades culturales, educativas y artísticas. Esto trajo como consecuencia un redimensionamiento socio – cultural de la ciudad que permite la apertura de nuevos sitios de encuentros y el acceso a centros económicos, sociales y culturales de miles de personas que antes no lo hacían por las dificultades con el transporte.

La propuesta que se presenta consiste en el diseño e implementación de un sistema de control multivariable, el cual permita racionalizar los parámetros de operación del Sistema de drenaje de aguas de escorrentía en los túneles del Metro de Caracas.

Con la ejecución de un sistema de control multivariable mejorara la confiabilidad de los sistemas de bombeo en los puntos bajos, con lo cual se lograrán los siguientes objetivos:

- ✚ Ofrecer un servicio de mayor seguridad tanto para los usuarios como para el personal que labora en la empresa.
- ✚ Garantizar un funcionamiento eficiente y constante de los equipos asociados a

estos sistemas que están relacionados directamente con la prestación del servicio comercial.

- ✚ Mayor eficiencia económica mediante la reducción de costos de mantenimiento, asociado a la utilización de personal para tareas de supervisión.

#### 4.4. Valoración Ambiental

Al realizar un estudio del comportamiento ambiental del sistema de drenaje del Metro de Caracas se realizará un análisis con todos sus factores (tabla 4.9), actividades e impactos, abordando para ello:

1. Identificación de las acciones o actividades con repercusión ambiental.
  - ✓ Drenaje de las aguas del nivel freático hacia el sistema de cloacas de la ciudad.
  - ✓ Contaminación del río Guaire.
  - ✓ Erosión de los suelos por causa de inundaciones.

**Tabla 4.9** Identificación de los factores ambientales susceptibles a afectaciones.

Medio Físico	Medio Socioeconómico
Suelo	Hombre
Agua	Aspectos Sociales

#### 1) Identificación de los Impactos Ambientales.

Los impactos ambientales están dados por la interacción de las acciones y los factores ambientales presentados anteriormente.

#### 2) Caracterización de los impactos.

El proceso de caracterización de los impactos ambientales es de gran importancia, pues posibilita la comprensión de la dimensión exacta del análisis desarrollado, determinando cómo repercute sobre el medio ambiente cada uno de los impactos ambientales que tienen lugar tanto en el objeto como en los elementos externos a este. Drenaje de las aguas del nivel freático hacia el sistema de cloacas de la ciudad. La influencia de esta acción sobre el sistema de cloacas repercute en la calidad de las aguas que fluyen por las tuberías. Un agua con un pH ácido influye en mayor o menor

medida en la corrosión de las tuberías, mientras que un pH muy básico influye sobre la formación de sales que causan obstrucción en las tuberías.

Contaminación del río Guaire. Las aguas del sistema de cloacas de la ciudad de Caracas son vertidas al río Guaire, el cual actualmente se encuentra sometido a un proceso de saneamiento por el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente. El deterioro ambiental del Guaire repercute ampliamente en la calidad de vida de los habitantes de Caracas.

Erosión de los suelos por causa de inundaciones. En un estudio realizado por Alfredo Cilento, profesor de Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la UCV, en Venezuela el 95% de la población vive en ciudades, 40% vive en ciudades mayores de 500.000 h y más del 50% en barrios pobres de esas ciudades. El 50% de la población vive en zonas de riesgo.

El Instituto de Mecánica de Fluidos de la UCV, junto con el Centro de Estudios de Desastres Ambientales, elaboró en el marco del Plan Nacional para la Reducción de Riesgos Ante Amenazas de Origen Natural y Tecnológico, el Proyecto Mapas de Riesgos El Ávila, donde se evidencian las amenazas por aludes torrenciales en las quebradas del Estado Vargas y en Caracas.

Al utilizar el simulador obtenido puede predecirse el comportamiento dinámico del sistema de drenaje y ajustar las variables operacionales ante las perturbaciones, de tal manera que optimice la extracción del agua y minimice las pérdidas operacionales.

#### **4.5. Conclusiones**

La valoración económica revela la necesidad de implementar un simulador y posteriormente diseñar un sistema de control para minimizar las pérdidas o gastos existentes en el sistema de drenaje, permitiendo que no se detenga el servicio comercial de trenes subterráneos por inundaciones de la vía, sobre todo en los días de intensas lluvias, así mismo permite al controlar el PH un mejor tratamiento a las aguas residuales de escorrentías disminuyendo la contaminación del río Guaire.

La inversión en el costo de implementación del sistema propuesto tiene un tiempo de recuperación de dos meses, y este sistema minimiza un impacto económico por pérdidas de facturación que alcanzan la cantidad de 812.500,00 bolívares fuertes al

año. A este monto es necesario añadir los montos por concepto de mantenimiento preventivo y correctivo, los cuales se verían disminuidos con la implementación del sistema propuesto. Para calcular la disminución en estos costos será necesario un estudio posterior a la implementación del sistema propuesto.

El sistema simulador del pozo es de gran importancia para el entrenamiento y capacitación del personal de operaciones en el metro, dado que permite a este no estar expuesto durante las clases a una cantidad considerable de emisiones de gases nocivos y ruidos de los equipos existentes que afectan negativamente al medio ambiente y la salud de los trabajadores

El trabajo tiene un impacto positivo para la sociedad, las investigaciones y para la Educación Superior Venezolana al obtener un simulador que es fácil de manejar por los estudiantes e investigadores y a la vez responde a la tendencia de desarrollo tecnológico del país, la informatización de los sistemas.

**CONCLUSIONES  
Y  
RECOMENDACIONES**

## CONCLUSIONES

---

En el presente trabajo de investigación se llegó a las siguientes conclusiones:

- ✓ Se caracterizó el proceso a ser controlado, determinándose que el control existente no cumple los requerimientos necesarios para todo el sistema, que integre aspectos como la disminución de los costos y de la frecuencia de mantenimiento de las bombas, el consumo energético de las mismas y aspectos de protección del medio ambiente. Se realizó para esto un análisis de las principales variables a partir de su análisis como objeto de regulación automática en un diagrama de flujo de señales, obteniéndose un sistema multivariable de dos entradas y dos salidas. Se seleccionan los mejores pares de variables de entrada-salida para los lazos de control, a partir de un análisis con técnicas novedosas como la Descomposición en Valores Singulares, resultando ser éstas el nivel (H) controlado por el caudal de salida de la bomba (Qsb), y el pH controlado por el caudal de sustancias químicas.
- ✓ Se conformó el modelo matemático dinámico del sistema de drenaje de los puntos bajos o pozos del metro de Caracas, quedando éste conformado por 6 ecuaciones diferenciales no lineales, que describen su comportamiento dinámico. Esto se realizó a partir de un balance de masa para los fluidos, llegándose a obtener un modelo integral científicamente fundamentado que responde a la dinámica de este tipo de objeto. Se realizó además un análisis químico a una muestra de las aguas contenidas en un tanque ubicado en la estructura de ventilación de la estación del Valle, obteniéndose un valor de 7,22, lo cual corresponde a un pH básico. De este valor se puede inferir que el ácido presente en el agua es el ácido carbónico ( $H_2CO_3$ ), el cual al neutralizarse produce iones bicarbonato, cuyas soluciones acuosas son débilmente alcalinas.
- ✓ Se realizó la simulación del modelo matemático propuesto en lazo abierto, determinándose los acoplamientos existentes entre las variables (caudal de la bomba de salida con nivel, flujo de sustancias químicas con el nivel y el PH), así como el grado de influencia de estas, quedando conformada la matriz de funciones de transferencia del proceso. El programa simulador diseñado (POZOMET V.1), basado en el Simulink del Matlab es de vital importancia para los estudios actuales del trabajo referentes al diseño de la estrategia de control del proceso y estudios posteriores, incluso de capacitación para el personal del metro. Este puede ser empleado además como laboratorio virtual en la enseñanza de pregrado y posgrado.
- ✓ Fueron seleccionadas, diseñadas e implementadas en el modelo simulado a lazo cerrado del sistema investigado, las técnicas de Control PID Multilazo y la de Control Multivariable con Desacoplamiento (estático). El mejor de los controladores implementados resultó ser el Control Multivariable con Desacoplamiento estático, a pesar de ser la variable PH difícil de controlar, dada su naturaleza no lineal. En la simulación del control del nivel ante una perturbación,

aplicando la técnica de Control PID multilazo, se observó una oscilación del nivel de un 20 % alrededor de un valor de referencia de 1,5 metros, mientras que aplicando la técnica de Control Multivariable con Desacoplamiento, la oscilación del nivel fue de 2%.

- ✓ Se realizó una valoración económica, partiendo de las pérdidas actuales del sistema, valorando el costo inicial y las ganancias de una posible variante de automatización; El análisis de los costos de la inversión en la automatización del proceso demostró que el tiempo de amortización de la misma es de 2 meses; se estableció una matriz para evaluar el impacto ambiental y se analizó el social.

## RECOMENDACIONES

---

En la presente investigación se proponen las siguientes recomendaciones:

- ✓ Explotar el programa simulador del proceso que ocurre en el Pozo de Drenaje en lazo abierto y cerrado, a partir del modelo matemático dinámico obtenido, de forma tal que contribuya a la mejor dirección del proceso de drenaje, mediante el apoyo en la toma de decisiones durante su operación en los 61 puntos existentes a partir del análisis dinámico de sus principales variables, para la investigación y en la docencia.
- ✓ Aplicar el Control Multivariable con Desacoplamiento estático como algoritmo, para lograr la automatización integral del proceso de drenaje de los pozos del Metro de Caracas, lo que como quedó demostrado en el trabajo, garantiza estabilidad en el comportamiento del nivel de los pozos y el PH del agua que en estos es bombeada al sistema de evacuación urbana de la ciudad de Caracas, lo que va a permitir una mayor eficiencia en el sistema de bombeo y protección adecuada del medio ambiente.
- ✓ Como punto importante de continuidad de esta investigación proseguir con el estudio, la evaluación y control de la eficiencia energética de las bombas, que sería la tercera variable de importancia para el sistema de drenaje.

# **BIBLIOGRAFÍA**

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

1. AGUADO, A.: Identificação y Control de Procesos Industriales, Curso IX International Congress on Research in Electrical Sciences. Torreón Coahuila, México, 1995.
2. ALVAREZ-RAMIREZ, J.; MONROY-LOPERENA, R. Y OTROS.; A Novel Proportional-Integral-Derivative Control Configuration with Application to the Control of Batch Distillation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, V. 39, Nro 2, p. 378-386. 2000.
3. ARZOLA RUIZ, J.: Sistemas de Ingeniería. La Habana: Editorial "Felix Varela", 2000.
4. BARMAN, B. N.; CEBOLLA, V. L.; MEMBRADO, L.; *Crit. Rev. Analytical Chemistry* 2000,30, 75.
5. BIRAN, A., MOSHE, B.: *Matlab for Engineers*. Adison-Wesley, Cambridge, 1996.
6. BRISTOL, E.H.; HANSEN, P. D.: *Modular Multivariable Control Apparatus*. The Foxboro Company, Patente Nro 5043863, EEUU, 1991.
7. CHEN, C, L, MUNRO, N, "Procedure to Achieve Diagonal Dominance Using a PI/PID Controller Structure", *International Journal of Control*, v.50, n.5, 1989, pp. 1771-1792.
8. Chen,D,Seborg,D, "Control Theory and Applications", *IEEE Proceedings*, volume 149, Issue 1, pp:68-73, 2002.
9. COLUMBIÉ NAVARRO, A., GUZMÁN DEL RÍO, D., MUÑOZ MONER A. Análisis del proceso de calcinación del C.B.N como objeto de regulación automática. *Revista Minería y Geología* No.2, 1991.
10. COLUMBIÉ, A. Modelación matemática del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel en el horno tubular rotatorio. Tesis doctoral. ISMMANJ, Moa. 2001. 98p.
11. COOLEY, J.H., LEE, B.L.; *Integrated Identification and Robust Control*. *Journal of Process Control*, [8 \(5-6\)](#), p. 431-440, 1998.
12. DENN, M. M.: "Process Modeling". Harlow, Longman, 1986.
13. DESHPANDE, P. B.: "Multivariable Process Control". North Carolina, Instrument Society of America, 1989.
14. ECONOMOU, C. G. MORARI, M.: *Internal Model Control: 6. Multiloop Design*. *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev*, 1986. 25.
15. Eslami,P, Jahed,M, Sarang,R, "Disturbance Rejection of Distillation Columns using Multiloop NonLinear Adaptive PID Controller", *Proceedings of the International Conference on Computational Intelligence for Modeling Control and Automation*, IEEE Computer Society, USA, 2006.
16. FAVOREEL, W. DE MOOR, B. VAN OVERSCHEE, P. S *Subspace State Space System Identification for Industrial Processes*. Preprints of the 5<sup>th</sup> IFAC Symposium On Dynamics and Control of Process Systems (DYCOPS-5), Corfur, Greece, p.359-364, 1999.

17. FAVOREEL, W., DE MOOR, B., VAN OVERSCHEE, P. Subspace State Space System Identification for Industrial Processes. *Journal of Process Control* [10 \(2-3\)](#), p. 149-155, 2000.
18. FITT, A. D. : Mixed Systems of Conservation Laws in Industrial Mathematical Modelling. *Industrial Mathematics Institute Johannes Kepler Universitat*. Vol. 6, Nro. 1, 1996.
19. FOSS, B. A, LOHMANN B., MARQUARDT W.: A field study of the industrial modeling process, *Journal of Process Control* v. 8, n. 5 (6) p. 325-338, 1998.
20. FRANKS, R. G. E.: "Modeling and Simulation in Chemical Engineering". New York, Wiley Interscience, 1972.
21. GAMBIER, A. UNBEHAVEN, H. ; Multivariable Generalized State-Space Receding Horizont Control in a Real-Time Environment. *Automatica*, v. 35, p.1787-1797, 1999.
22. GARCIA, C. E., MORARI, M.: Internal Model Control 2-Design Procedure for Multivariable Systems. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* n.24 , p 484-494. 1985.
23. GARCIA, C.: Identificação de Sistemas e Estimação de Parâmetros. Capítulo 5. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Eletrônica, Laboratório de Automação e Controle, São Paulo - SP, Brasil, 2000.
24. GARCIA, C.: Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos. São Paulo, EDUSP, 1997.
25. GARCIA, C.: Resenha do livro: Identificação de sistemas dinâmicos lineares. *Revista Controle & Automação*, Vol.15 no.4, Outubro, Novembro e Dezembro 2004.
26. GRAY, J. B., OLDSHUE, J. Y.: "Agitation of Particulate Solid-Liquid Mixtures". s/a.
27. GREEN, L. E.; SCHMAUCH, L. J.; WORMAN, J. C.; *Analytical Chemistry* 36, 1512, 1964.
28. GUSTAVSSON, I.: Survey of Applications of Identification in Chemical and Physical Processes. *Automatica*, v.11, n.1, p.3-24, 1975.
29. Guzmán D. Modelación, simulación y control del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación carbonato amoniacal. Tesis doctoral. ISMMANJ, Moa, Cuba. 2001. 124p.
30. GUZMÁN, D.: Modelagem e Simulação de Sistemas Multivariáveis de Emprego Industrial e Docente. Relatório do Projeto DCR CNPq - FAPEAM. Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Estado do Amazonas. Manaus, 102p. 2005.
31. GUZMÁN, D.: Modelagem e Simulação de Sistemas Multivariáveis de Emprego Industrial e Docente. Relatório do Projeto DCR CNPq - FAPEAM. Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Estado do Amazonas. Manaus, 106p. 2006.
32. GUZMÁN, D.: Modelagem matemática e Controle Multivariável do Tanque de Contato empregado no processo de lixiviação dos minerais níquelíferos. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 160p. 1999.
33. GUZMÁN, D.: Modelagem matemática e controle Multivariável do tanque de contato empregado no processo de lixiviação dos minerais níquelíferos. *Boletín Técnico BT/PEE/9904*, ISSN-1413-2206. Universidade de São Paulo, Brasil, 1999.

34. GUZMÁN, D.: Sobre la Modelação Matemática del Proceso de Lixiviação Carbonato Amoniacal de los Minerales Niquelíferos. Memorias del II Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales. Sao Paulo, Octubre, 1997.
35. HALL, R. CH.: Development of a Multivariable pH Experiment. Santa Bárbara,. Disertação de maestría. University of California, 120p, 1987.
36. HAROLD, L, "Inverted Decoupling: A neglected Technique", *Wades Associates, Inc. ACOS Newsletter*, ISA, 1997.
37. HIMMELBLAU, D. M.: "Engenharia Química, Princípios e Cálculos". Prentice-Hall do Brasil, Ltda, Rio de Janeiro, 1984.
38. HO, W, K, HANG, C, C, CAO, L, S, "Tuning of PID Controllers Based on Gain and Phase Margins Specifications" *Automatica*, Vol, 31, 1995, pp. 497-502.
39. Hsiao, P, H, Jyh, Ch, J, "Dynamic Loop Interactive and Multi-Loop PID Controller Design", 27<sup>th</sup>. Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.
40. HWANG, D. SH.; HSU, P. L.: A Practical Design for a Multivariable Proportional-Integral Controller in Industrial Applications. *Ind. Eng. Chem. Res.*, n.36, 1997.
41. HWANG, S. H.: Geometric Interpretation and Measures of Dynamic Interactions in Multivariable Control Systems. *Ind. Eng. Chem. Res.*, n.34, p.225, 1995.
42. IKEDA, I.: Automatic Adjustment Method of Controller for Multiplex Loop Control. Toshiba Corporation, Patente Nro JP 08286707 19961101, Japón, 1996.
43. ISERMANN, R.: Practical Aspects of Process Identification. *Automatica*, v.16, n.5, p.575-87, 1980.
44. Jinghui, Ch; Yi-Chun, Ch; Yuezhi, Y: "Multiloop PID Controller Design Using Partial Least Squares Decoupling Structure", Department of Chemical Engineering, Chung-Yuan Christian University, China, 2004.
45. JUNG J.; W.; CHO, J; LEE, J.; One-Parameter Method for a Multiloop Control System Design. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, V. 38, Nro 4, p. 1580-1588. 1999.
46. KHANBAGHIA M, ALLISON B.: Modeling and control of an industrial pressure screen, *Control Engineering Practice*, 11, p. 517-529, 2003.
47. KREITH F.: "Principios da Trasmisso de Calor". 3ra Ed. Edgar Blucher, Sao Paulo, 1977.
48. Liu, Y, Y, Zhang, W, D, Ou, L, L, "Analytical Decoupling PI/PID Controller Design for two- by-two processes with time delays." *IET Control Theory & Applications*, vol.1, pp. 409-416, 2007.
49. LJUNG L. Y T. GLAD.: *Modeling of Dynamic Systems*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1994.
50. LJUNG L.: *System Identification - Theory for the User*. 2<sup>nd</sup> Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1998.
51. LJUNG L.: *System Identification Toolbox User`s Guide*, The Mathworks Inc. Natick, M. A. 1997.
52. LUYBEN, W. L.: *Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers*. 2da Ed., New York, McGraw Hill, 1990.
53. MANDLER J. A.: Modelling for control analysis and design in complex industrial, separation and liquefaction processes, *Journal of Process Control*, 10, p.167-175, 2000.

54. MANDLER, J. A.; Modelling for Control Analysis and Design in Complex Industrial Separation and Liquefaction Processes. *Journal of Process Control* [10 \(2-3\)](#), p. 167-175, 2000.
55. MARLIN, T. E.: *Process Control: Designing Process and Control Systems for Dynamic Performance*, McGraw-Hill, Inc. New York, 1995.
56. MCAVOY, T. J.: *Interaction Analysis, Principles and Applications*. Instrument Society of America, North Carolina, 1983.
57. OGUNNAIKE, B. A.; RAY, W. H.: "Process Dynamics, Modeling and Control". New York, Oxford University Press, 1994.
58. O'REILLY, J.; LEITHEAD, W. E.: Multivariable Control by Individual Channel Design. *International Journal of Control*, v.54, n.1, 1991.
59. Qing, G, W, Zhen, Y, Wen, J, C, "PID Control for Multivariable processes", Springer, 2008.
60. RAY, W. H.: Multivariable Process Control-A Survey, *Computers & Chem. Eng.* v.7, n.367, 1983.
61. ROSENBROCK, H. H.: *State Space and Multivariable Theor*, John Wiley & Sons, New York, 1970.
62. SCHRIBER, T. J.: Introduction to GPSS. In: Winter Simulation Conference, Proceedings. p. 13-15, 1984.
63. SEBORG, D. E.: A Perspective on Advanced Strategies for Process Control. *Modeling, Identification and Control*, v.15, n.3, p 179-189, 1994.
64. SEBORG, D. E.: A Perspective on Advanced Strategies for Process Control, Reviseted. *Process and Control*,. 2000.
65. SEBORG, D. E.; EDGAR, T.F.; MELLICHAMP, D.A.: "Process Dynamics and Control". John Wiley & Sons. New York, 1989.
66. SHEN, S. H.; YU, C. C.: Use of Relay Feedback Test for Automatic Tuning of Multivariable Systems. *AIChE Journal*, 40,627, 1994.
67. SHING-JIA, S, SHYH-HONG, H, "Sequential Design Method for Multivariable Decoupling and Multiloop PID Controllers", *Ind. Eng. Chem. Res.*, n.37, 1998, p 107-119.
68. SHINSKEY, F. G.: "Process Control Systems". New York, McGraw-Hill, 1988.
69. SMITH, C, A, CORRIPIO, A, B, "Principles and Practice of Automatic Process Control", *John Wiley & Sons, Inc*, New York, 1997.
70. SÖDERSTRÖM T. STOICA, P.: "System Identification". Prentice Hall International, London, 1989.
71. Thomas F, Jietar, L, " Multiloop PI/PID Control System Improvement Via Adjusting the Dominant Pole or the Peak Amplitude Ratio, *Chemical Engineering Science*, n. 5, 2006, pp. 1658-1666.
72. TIJONOV, O.: *Modelos Matemáticos Sencillos en los Procesos Metalúrgicos*, Instituto de Minas de San Petersburgo, 1978.
73. VANECEK, A. MSCINSKI, J. OGONOWSKI, Z.: *Advanced Control with MATLAB and SIMULINK*. Automatica, V35, n.6, 1999.
74. Vásquez, F.; Morilla, F. "Tuning Decentralized PID Controller for MIMO System With Decouplers"; IFAC, 15<sup>th</sup> Triennial World Congress, Barcelona, SPAIN, 2002.
75. WENG, K, H, TONG H, L, OON, P, G, "Tuning of Multiloop Proportional-Integral-Derivative Controllers on Gain and Phase Margin Specifications", *Industrial & Engineering Chemistry Research*., n.36, 1997, pp 2231-2238.