



*Instituto Superior Minero Metalúrgico
Dr. Antonio Núñez Jiménez
Facultad Metalurgia y Electromecánica
Ingeniería Eléctrica.*

TRABAJO DE DIPLOMA.

En opción al título de
ingeniero eléctrico



*Título: Estudio Preliminar para el Control del Sistema
de Drenaje de los Pozos del Metro de Caracas.*

Autor: Kelvin M. Iserns Proenza.

Tutor: Dr. C. Daniel Guzmán

Moa 2008



Instituto Superior Minero Metalúrgica de Moa.
Dr. Antonio Núñez Jiménez.

Nosotros:

Diplomante: *Kelvin Maikel Iserns Proenza*.
Tutor: Dr. *Daniel Guzmán Del Río*.

Autores de este trabajo certificamos su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa Dr. Antonio Núñez Jiménez el cual podrá hacer uso del mismo con fines docentes y educativos.

Diplomante: Kelvin M. Iserns Proenza.

Tutor: Dr. Daniel Guzmán Del Río.

AÑO 50 DE LA REVOLUCIÓN.

2007-2008

Pensamiento:

A black and white portrait of Che Guevara, wearing his iconic black beret with a white star and a dark jacket. The image is centered and serves as a background for the text.

..... cuando el trabajo no sea solamente un medio de vida, sino la primera necesidad vital; cuando con el desarrollo de los individuos en todos sus aspectos, crezcan las fuerzas productivas, entonces correrán a chorro los manantiales de riquezas colectivas.....

Che.

DEDICATORIA

A mis padres Diana M. Proenza y Víctor Ierns

A mi esposa Ariuska Ross

A mi hermano Karel M. Ierns

A mi sobrino Víctor M. Ierns

El Autor.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor, *Dr. Danie Guzmán Del Río* del Departamento de Eléctrica del ISMM, por su apoyo y ánimo en los momentos difíciles; deseo dejar constancia en estas líneas, de mi gratitud al Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, en especial a los profesores *Lic. Carlos Vinardel, M. Sc. Yordan*.

Mi agradecimiento también a mis compañeros y amigos del grupo por el voto de confianza y apoyo en los momentos difíciles, particularmente a *Yeixon Cuenca Ramírez, Roilier Rodríguez Lores, Yumisander Escobar, Yanier Ricardo, Daniel Tarrago, Jorge Oscar, Alexander Martínez, José B. Pérez, Yorgan Sánchez, Julio, José*, en fin a todos los que me soportaron tantos años y me brindaron su amistad y confianza desinteresadamente.

A mis padres *Diana Marta Proenza y Víctor Iserns*, a mi esposa *Ariuska Ross*, a mi hermano *Karel M. Iserns* y toda la familia, por todo, que es mucho.

Más que agradecer, me gustaría dividir los méritos de este trabajo con todos los que en su momento en el ISMM ayudaron a construirlo.

Mis sinceros agradecimientos, muchas gracias.

El autor.

Índice:

Marco teórico metodológico.....	1
-Introducción:.....	1
-Trabajos Precedentes:.....	2
-Marco teórico:.....	3
Descripción del proceso:.....	3
-Planteamiento de la situación problemática:.....	4
-Problema:.....	4
-Hipótesis:.....	4
-Justificación:.....	4
-Novedad científica:.....	5
-Objetivo general:.....	5
-Objetivos específicos:.....	5
-Tareas a desarrollar para el cumplimiento de los objetivos:.....	6
-Métodos de investigación:.....	6
Capítulo I:	7
1.1 Introducción.....	7
1.2 Principales características del metro de Caracas.....	8
1.3 Sistema de drenaje del metro de Caracas.....	10
1.4 Sistema de control actual en el drenaje del metro de Caracas.....	12
Capítulo II:	13
2.1 Introducción.....	13
2.2 Modelo matemático para el nivel de los pozos de drenaje del metro de Caracas.....	15
2.3 Modelo matemático del control dinámico del pH.....	16

2.4 Simulación a Lazo Abierto ante Variaciones en las Variables Manipuladas.....	19
2.5 Esquema de simulación a lazo abierto en simulink.....	34
Capitulo III:.....	38
3.1 Introducción.....	38
3.2 Clasificación actual de los sistemas de control.....	39
3.3 Forma de definir los mejores pares de entrada salida.....	40
3.3.1 Técnica de la Descomposición en Valores Singulares (SVD).....	41
3.4 Propuesta de control clásico. Control PID multilazo.....	46
3.4.1 Técnicas de Control PID Multilazo.....	47
3.4.2 Métodos de Diseño y Sintonía para el Controlador PID Multilazo.....	49
3.4.2.1 Método de la Sintonía Secuencial.....	49
3.5 Técnicas de Desacoplamiento de Variables Entrada-Salida.....	52
3.5.1 Control multivariable con desacoplamiento.....	53
3.5.2 Método de Diseño y Sintonía del Controlador Multivariable Desacoplado Convencional.....	56
3.6 Algunas Recomendaciones antes de Implementar el Desacoplamiento.....	59
Capitulo IV:.....	60
4.1 Introducción.	60
4.2 Valoración ambiental.....	60
4.3 Valoración económica.....	60
4.4 Valoración de las condiciones Sociológicas.....	63
4.5 Valoración técnico científica.....	63
Conclusiones y Recomendaciones.	



Marco teórico metodológico.

-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 es establecer el Marco Teórico - Metodológico de la Investigación, a partir del 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.

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 controlar en procesos industriales, sólo que al aplicarla en un proceso real con peculiaridades específicas, combinando más de un agregado y aplicando métodos novedosos en la simulación y sintonía de los controladores empleados hacen novedoso el estilo de trabajo seguido.

Una investigación científica de acuerdo a lo planteado por Aróstegui, J. M. y otros en 1975 [1], 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.



-Trabajos Precedentes:

Para desarrollar la investigación fueron consultados diferentes trabajos y estudios, orientando en 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 y el control desde el punto de vista científico, técnico y práctico se han realizado para estos tipos de procesos.

En lo que respecta al primer elemento anteriormente mencionado, resultó muy útil la revisión de los trabajos de Mesarovich, M. en 1996 [34] 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, G. en 1999 [18] 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.

Una vez definida la teoría de sistema, como base teórica de la investigación, fue necesaria la búsqueda de métodos que permitieran la identificación y el análisis de los diferentes aspectos (subsistemas) que tributan al proceso como sistema integrado.

De mucho interés resulta el modelo matemático de nivel de un tanque realizado por el Dr. Daniel Guzmán [15] en su tesis de doctorado, con excelentes resultados; el trabajo que venía realizando el ing. Manuel Valdez por la caracterización y el análisis que le realiza al metro de Caracas, las publicaciones de Zanabria [53] por el desarrollo del modelo matemático para realizar el control del PH, así como los trabajos de Louis M. Thompson en su libro "El Suelo y su Fertilidad" [27] por la definición y caracterización de los suelos que el realiza.



Es necesario destacar que además de los trabajos que son de gran importancia para el desarrollo de la investigación, también fue necesaria la revisión de páginas Web y textos para la documentación teórica respecto al tema.

-Marco teórico:

- ✓ Descripción del proceso.
- ✓ Situación problemática.
- ✓ Problema.
- ✓ Hipótesis.
- ✓ Justificación.
- ✓ Novedad científica
- ✓ Objetivo General.
- ✓ Objetivos específicos:
- ✓ Tareas de la investigación.
- ✓ Métodos.
- ✓ Resultados.

Descripción del proceso:

El proceso que es objeto de estudio en la presente investigación no es más que el control del bombeo de las aguas servidas en el metro de Caracas:

Estas aguas son el producto de las precipitaciones y las filtraciones debidas a que como el metro es subterráneo se encuentra muy por debajo del manto freático, lo que provoca niveles de filtraciones críticos. Este caudal circula por el sistema de alcantarillado del metro, lo que implica que de no ser eficiente el bombeo del mismo, provocaría inundaciones severas, con resultados críticos tanto para la estructura, como para la población.



-Planteamiento de la situación problemática:

La ausencia de un sistema de control eficiente de los parámetros de operación, que permita efectuar el proceso de evacuación de aguas acumuladas en los pozos de los túneles del Metro de Caracas con parámetros racionales de operación y de protección al medio ambiente.

-Problema:

Insuficiente sistema de control del nivel de los pozos de drenaje del Metro de Caracas y cierta contaminación provocada por las aguas residuales, por lo que se hace necesario aplicar técnicas de control que permitan controlar todas las variables que influyen sobre el sistema de bombeo y las variables que permitan definir el nivel de contaminación de estas aguas para evitar los daños al medio ambiente.

-Hipótesis:

Con la caracterización adecuada del sistema de drenaje de los pozos del metro de Caracas conformar su modelo matemático dinámico, que permitirá evaluar el comportamiento e interrelación de todos sus principales parámetros y diseñar las técnicas de control que cumpla los requerimientos del proceso.

-Justificación:

El desarrollo de esta investigación permitirá dos cosas importantes: una automatizar completamente un proceso que actualmente se ejecuta en parte de forma manual, consumiendo tiempo y recursos económicos y por otra con técnicas de control poco eficientes y defectuosas por los años de explotación, además de ser engorrosas, por la dificultad para darle mantenimiento y el espacio que ocupan ya que usan paneles con dimensiones ordinarias.



Esto provoca que se realice dicho bombeo de una manera poco eficiente e insegura para las miles de personas que transitan en tiempos lluviosos por las estaciones del metro.

Lo segundo es que al hacerse necesario saber el nivel de contaminación de estas aguas, se decidió realizar un muestreo dinámico del PH ya que este es un indicador primordial en la contaminación, por lo que se hace necesario aplicar un Control Multivariable, ya que muchas de las variables presentes en este sistema influyen tanto en el nivel de los pozos como en el PH del agua.

-Novedad científica:

La aplicación de un sistema de control multivariable a partir del modelo matemático obtenido para racionalizar los parámetros de operación del Sistema de drenaje del Metro de Caracas con una disminución en los costos de explotación del Sistema y un reducido índice de contaminación.

-Objetivo general:

Realizar un estudio preliminar a través de la modelación y simulación del sistema de drenaje de los pozos del Metro de Caracas para proponer una técnica de control multivariable. (Proyecto II Cuba-Venezuela).

-Objetivos específicos:

- ✓ Realizar un estudio de las principales características de los pozos de drenaje del Metro de Caracas.
- ✓ Realizar un estudio de las principales variables que inciden en el proceso, a través de un grafico de flujo de señales.



- ✓ Modelar el proceso de drenaje de las aguas de los pozos del Metro de Caracas.
- ✓ Simular el modelo matemático obtenido y observar las variaciones del nivel y el PH en el tiempo, obteniendo las funciones de transferencia correspondientes a los juegos de variables de entrada, salida y perturbaciones.
- ✓ Basado en el modelo matemático obtenido, proponer un sistema de Control Multivariable para el Proceso.
- ✓ Realizar la evaluación técnica, económica, social y medioambiental de la investigación realizada.

-Tareas a desarrollar para el cumplimiento de los objetivos:

- ✓ Realizar la investigación bibliográfica a fin de establecer el estado del arte sobre el tema.
- ✓ Seleccionar las variables de supervisión y control del Sistema de drenaje.
- ✓ Conformar un modelo para simular el proceso de drenaje.
- ✓ Simular el proceso de drenaje observando las variaciones del nivel y el PH en el tiempo, lo que permitirá obtener la matriz de funciones de transferencia.
- ✓ Realizar los estudios de impacto económico, social y medioambiental del proyecto a realizar.

-Métodos de investigación:

- ✓ Método de investigación bibliográfica.
- ✓ Método de investigación teórico para la caracterización del objeto de estudio, así como determinar las principales características de los elementos del sistema.
- ✓ Métodos de modelación matemática y simulación de los elementos componentes del sistema.



Capítulo I:

1.1 Introducción.

El Metro de Caracas posee dentro de sus instalaciones Sistemas de Drenaje de Aguas Pluviales y de Aguas Negras, los cuales están conformados por un conjunto de Bombas, tanques de almacenamiento y tableros de control; instalados en las estaciones de pasajeros, estructuras de Ventilación cuyo objetivo es de 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 agua se produzca la inundación de la vía férrea y los ambientes donde están instalados.

Entre los Sistemas de Drenaje de aguas pluviales, existen unos 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 la supervisión permanente de ellos.

En ocasiones el sistema de bombeo ha fallado y se ha producido inundación en la vía, lo que a su vez produce paralización del servicio comercial y dado que el sistema Metro de Caracas es de suma importancia para el traslado de personas en la ciudad, su paralización produce un colapso de transporte superficial.

Con la ejecución de un sistema de supervisión a distancia se mejorara la confiabilidad de los sistemas de bombeo en los puntos bajos.



1.2 Principales características del metro de Caracas.

En las **tablas (1.1, 1.2, 1.3)** que se muestran a continuación se encuentran los datos generales del sistema de drenaje.

Tabla 1.1: Características de las tuberías que conforman el sistema de drenaje.

Tuberías de descarga	Normal	Tubo principal	6"
		Tubos instalados	1 tipo Y
		Conector	6"
		Conectores instalados	2
	Emergencia	Tubo principal	6"
		Tubos instalados	1
		Conector	3"
		Tipo de conector	Rápido
		Conectores instalados	2
	Tubería seca	Tubo principal	4, 5"
		Tubos instalados	1x cada Vía
		Conector	2, 5"
		Tipo de conector	Roscado
		Conectores instalados	4



Tabla 1.2: Datos esenciales de los pozos donde se acumulan las aguas.

Pozos	Largo (mts)	9.50
	Ancho (mts)	2.60
	Alto (mts)	2.15
	Cap (lts)	53 110
	Cap real de Reboso (lts)	41 990
	Tiempo de reboso	45 min
	Nivel de ceba	0.50 mts

Tabla 1.3: Datos generales del sistema de bombeo.

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



1.3 Sistema de drenaje del metro de Caracas.

En la **figura (1.1)** se muestra el esquema del sistema de drenaje del metro de Caracas.

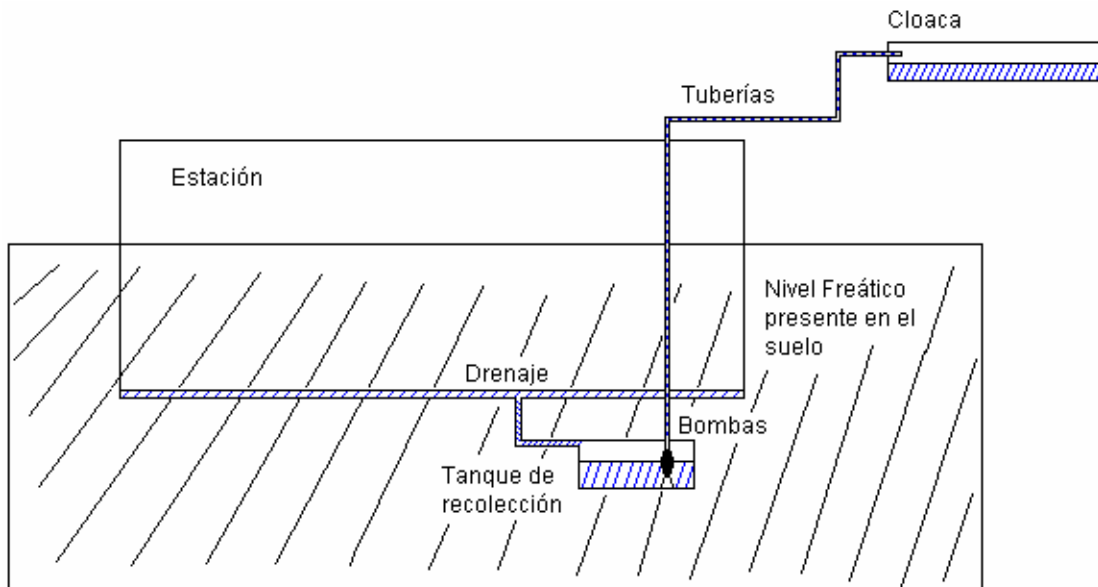


Figura 1.1: Esquema del sistema de drenaje.

¿Para que se utiliza un Sistema de Drenaje?

El objetivo principal de los Sistemas de Drenaje es el de realizar el desalojo o la extracción permanente del agua acumulada en el subsuelo (Nivel Freático) hacia el Sistema Público de aguas servidas, a fin de evitar que por la acumulación de agua se produzca la inundación de las Vías Férreas y los ambientes de las Estaciones donde estas van instaladas.

Los sistemas de drenajes están ubicados en las estructuras de ventilación y en las estaciones. Estos constan de dos bombas conectadas en paralelo con potencias de 20 Hp cada una, en unos casos, y para los mayores caudales de 47 Hp, cada una de ellas con sus respectivas tuberías de succión y descarga. Estas últimas convergen en una sola tubería común que lleva al alcantarillado nivel calle, es de hacer notar que en las estructuras de la línea III, cada bomba posee su propia tubería de descarga.

¿Dónde están ubicados los puntos bajos en el sistema de drenaje?

Existen un total de **61 puntos bajos** es necesario tener un control estricto de la evacuación de las aguas, en la **figura (1.2)** se muestra la ubicación de estos.

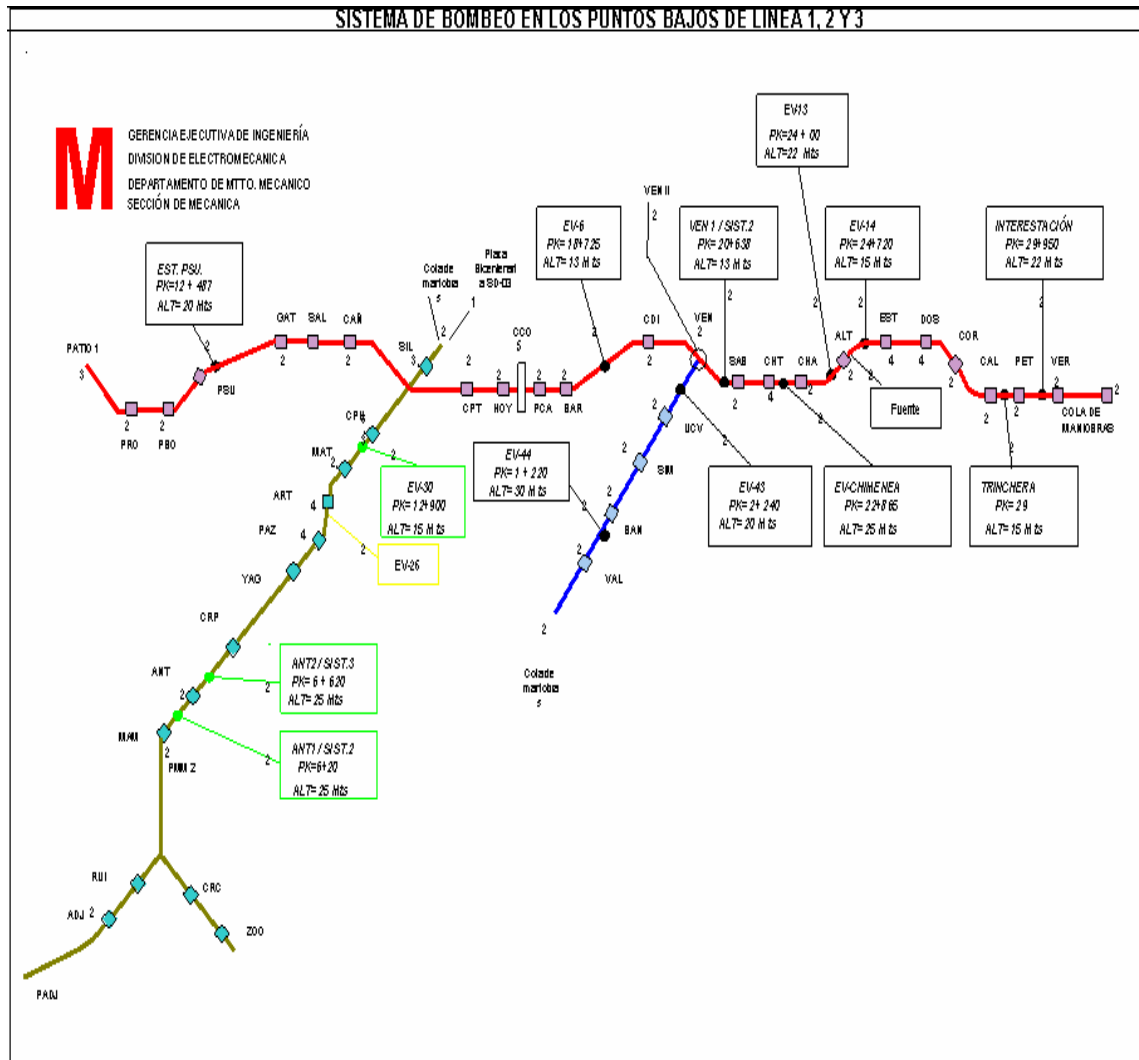


Figura 1.2: Plano de la ubicación de los puntos bajos en el Metro de Caracas.

1.4 Sistema de control actual en el drenaje del metro de Caracas.



En la **figura (1.3)** se ilustra el esquema de control actual en los pozos.

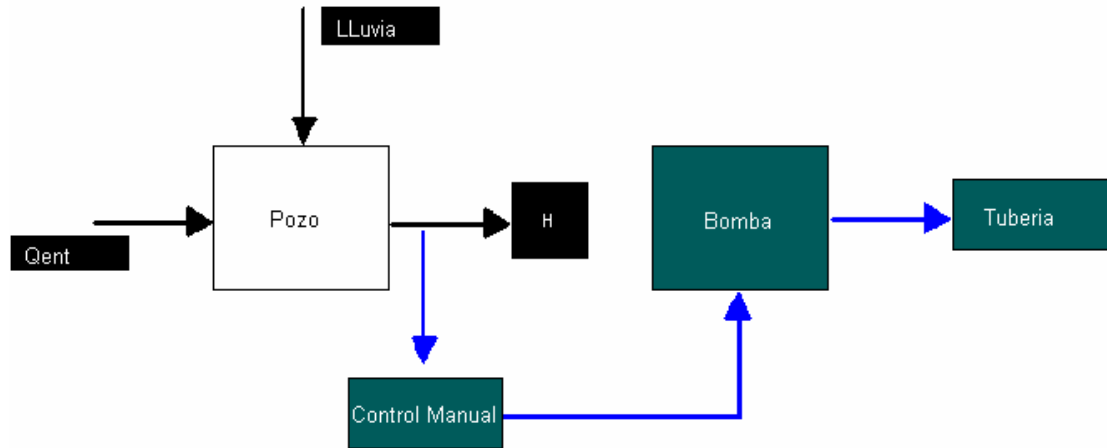


Figura 1.3: Esquema que existe actualmente en el metro de caracas.



Capítulo II:

2.1 Introducción.

Según Seborg, D. E. en 1989 [45], 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 dinámica, la simulación y la identificación parcial del sistema de bombeo del Metro de Caracas.

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:

Modelos teóricos desarrollados a partir de los principios de la Química y de la Física.

Modelos empíricos, obtenidos a partir del análisis matemático (estadístico) de datos de operación del proceso.

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 del proceso.

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 sus principales parámetros, debido a la falta de eficiencia en el control del sistema de bombeo.

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

Según Guzmán, D [14], para el desarrollo de su tesis de doctorado, el llega a un sistema de ecuaciones para determinar el nivel de un tanque de contacto con buenos resultados, este sistema de ecuaciones será utilizado para el desarrollo de este capítulo.

También fue necesario el estudio de los posibles flujos de sustancias que pudieran influir sobre el pH del agua en dichos pozos.

En la **figura (2.1)** se muestra el esquema del pozo realizado para el análisis de su modelación y simulación.

En la **figura (2.2)** se muestra el grafico del flujo de señales a partir del estudio de las principales variables del sistema que tienen importancia para la propuesta del sistema de control.

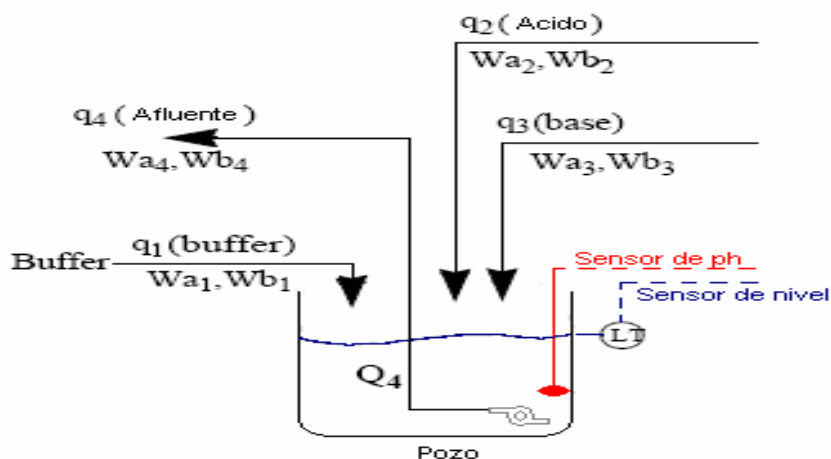


Figura (2.1): Esquema del proceso para la modelación y simulación.

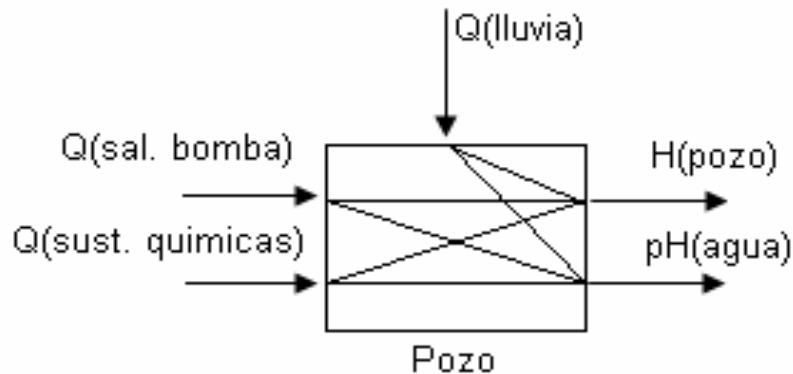


Figura (2.2): Principales variables del sistema de los pozos de drenaje.

2.2 Modelo matemático para el nivel de los pozos de drenaje del metro de Caracas.

Sobre el nivel de estos pozos es necesario tener un control estricto ya que si estos se desbordan provocarían inundaciones en las vías férreas y en todo el metro, esto sería algo grave para el funcionamiento de mismo para esto a continuación se muestra las ecuaciones de nivel y de la bomba.

Basado en la teoría del Dr. D. Guzmán, las ecuaciones para determinar el nivel del pozo y la de bomba quedan de la siguiente manera:

$$\frac{dQ_{sb}}{dt} = \frac{(k_p * m(t)) - Q_{sb}}{t_p} \quad (2.1)$$

$$A \times \frac{dH}{dt} = Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_4 \quad (2.2)$$

Donde:

Q_4 : Es el flujo de salida de la bomba, (m^3 / s).

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



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

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

2.3 Modelo matemático del control dinámico del pH.

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, los daños y perjuicios pueden ocurrir para el proceso o para el medio ambiente.

Por ejemplo, los sistemas biológicos (conteniendo a los microorganismos) pueden ser muy sensitivos al pH pero no a la cantidad presente de ácido o base 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, etcétera. 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 un análisis químico es realizado, el objetivo usual es determinar la cantidad del presente de ácido (o la base) en la solución. Añadiendo una base para un ácido (o viceversa) asta que el ácido (o la base) sea neutralizado. Cuando las cantidades de ácido y la base, medido en topos, son iguales, el punto de equivalencia es alcanzado. Si el ácido y la base son ambos fuertes, entonces el pH es 7 en el punto de equivalencia. Sino, 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 usualmente importante. Lo que tiene importancia es el hecho que el pH está en la cercanía o posiblemente también en la cuesta de la curva de titulación (o cerca) por el valor del pH deseado, (Gustafsson Et Al1995.)

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.

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

Louis M. Thompson en su Libro “El Suelo y su Fertilidad” [27] da una definición exacta de los suelos salinos y alcalinos, que son de mucha utilidad en el desarrollo de la investigación ya que con un análisis del suelo en Caracas se puede determinar que tipos de sales son las que en realidad están presentes en el agua.

¿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.

Es necesario tener en cuenta que las sales pueden tener hidrólisis acidas o básicas. Esto se determina con un estudio detallado del suelo donde esta ubicado el Metro de Caracas para saber las sales existentes en el suelo, con lo cual no podemos constar, por lo que la investigación se enmarco en desarrollar una metodología de solución.



En la modelación matemática del pH se aplicó 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 la investigación se basa en su fórmula tradicional:

$$pH = -\log_{10}[H^+] \quad (2.3)$$

Donde:

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

La obtención de la concentración de los iones H^+ se realizó por la ecuación dada por Sanabria [53]:

$$Wb4 \frac{\frac{ka_1}{H^+} + \frac{2ka_1ka_2}{[H^+]^2}}{1 + \frac{ka_1}{H^+} + \frac{ka_1ka_2}{[H^+]^2}} + Wa4 + \frac{k_w}{H^+} - H^+ = 0 \quad (2.4)$$

Donde:

$Wb4$: Es la concentración de la invariante básica en el flujo de salida de la bomba, (mol / m^3).



$Wa4$: 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).

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

Para esto es necesario primero obtener a $Wa4$ y $Wb4$.

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

$$A \times H \frac{dWa4}{dt} = Q1(Wa1 - Wa4) + Q2(Wa2 - Wa4) + Q3(Wa3 - Wa4) \quad (2.5)$$

$$A \times H \frac{dWb4}{dt} = Q1(Wb1 - Wb4) + Q2(Wb2 - Wb4) + Q3(Wb3 - Wb4) \quad (2.6)$$

Donde:

$Wa1$: Es la concentración de la invariante acida en el flujo de entrada, (mol/m^3).

$Wa2$: Es la concentración de la invariante acida en el flujo de acido, (mol/m^3).

$Wa3$: Es la concentración de la invariante acida en el flujo de base, (mol/m^3).

$Wb1$: Es la concentración de la invariante básica en el flujo de entrada, (mol/m^3).

$Wb2$: Es la concentración de la invariante básica en el flujo de acido, (mol/m^3).

$Wb3$: 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).

2.4 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.

$Q1 = 0.00705 \text{ m}^3 / \text{s}$	$Wa3 = -3.05 \text{ mol} / \text{m}^3$
$Q2 = 0.0004669 \text{ m}^3 / \text{s}$	$ka1 = 0.000447 \text{ mol} / \text{m}^3$
$Q3 = 0.013242138 \text{ m}^3 / \text{s}$	$ka2 = 5.62 * 10^{-8} \text{ mol} / \text{m}^3$
$Wb1 = 0 \text{ mol} / \text{m}^3$	$k_w = 1 * 10^{-8} \text{ mol} / \text{m}^3$
$Wb2 = 30 \text{ mol} / \text{m}^3$	$A = 24.7 \text{ m}^2$
$Wb3 = 0.05 \text{ mol} / \text{m}^3$	$m(t) = 70 \%$
$Wa1 = 3 \text{ mol} / \text{m}^3$	$kp = 2.9656 * 10^{-4} \text{ (m}^3 / \text{s)} / \%$
$Wa2 = -3 \text{ mol} / \text{m}^3$	$\tau_p = 4 \text{ s}$

Caso 1. . En las Figuras (2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7) se muestra el comportamiento de las salidas H_t , $Wa4$, $Wb4$ 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 $Q2$. Las entradas flujo $Q3$ (base) y $Q1$ son considerado como constantes y están en sus valores nominales de operación.

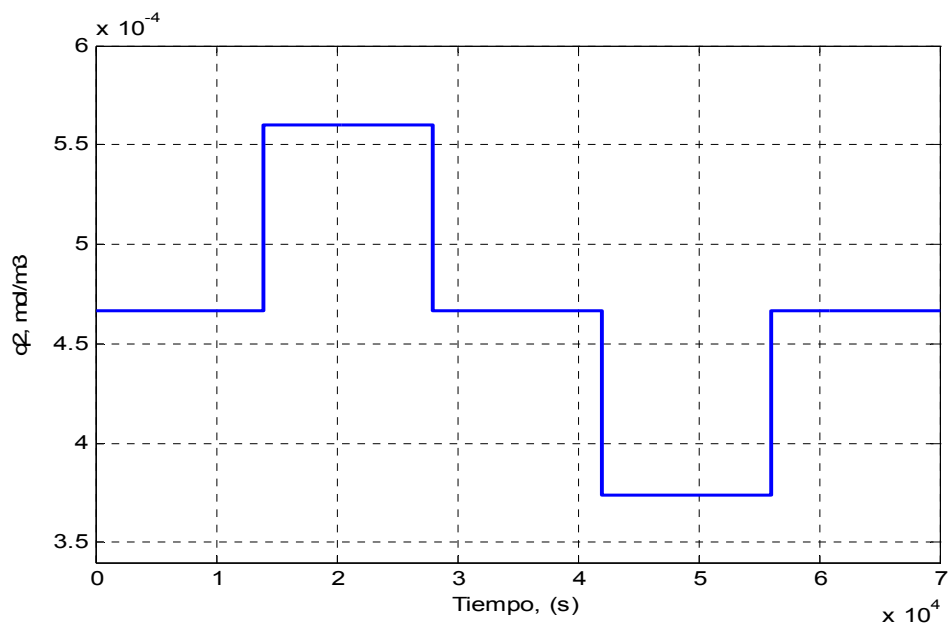


Figura (2.3): Variaciones en el flujo ácido Q_2 en la entrada del pozo.

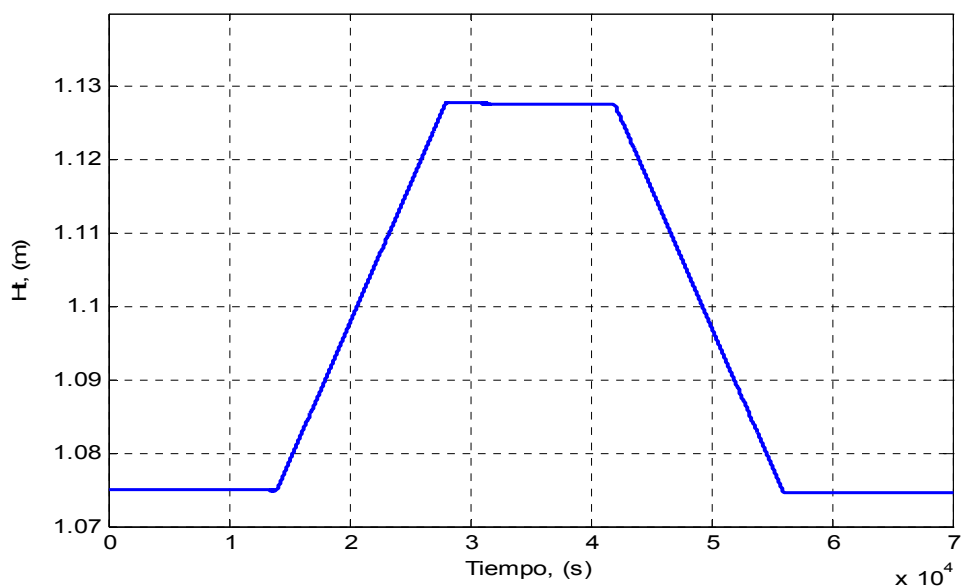


Figura (2.4): Respuesta del nivel H_t ante variaciones en el flujo ácido Q_2 a la entrada del Pozo.

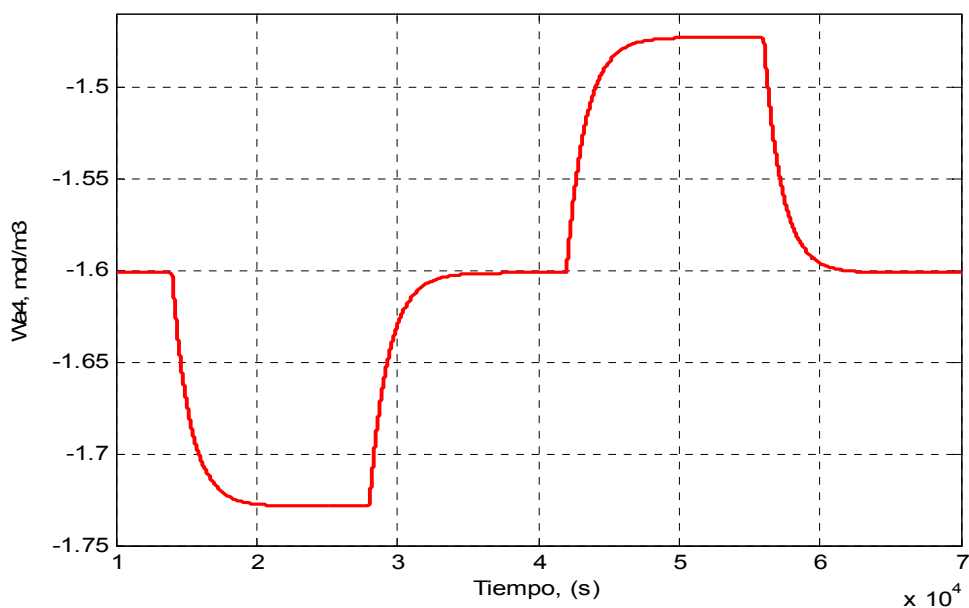


Figura (2.5): Respuesta de la concentración de invariantes ácidos ante variaciones en el flujo de ácido Q_2 a la entrada del Pozo.

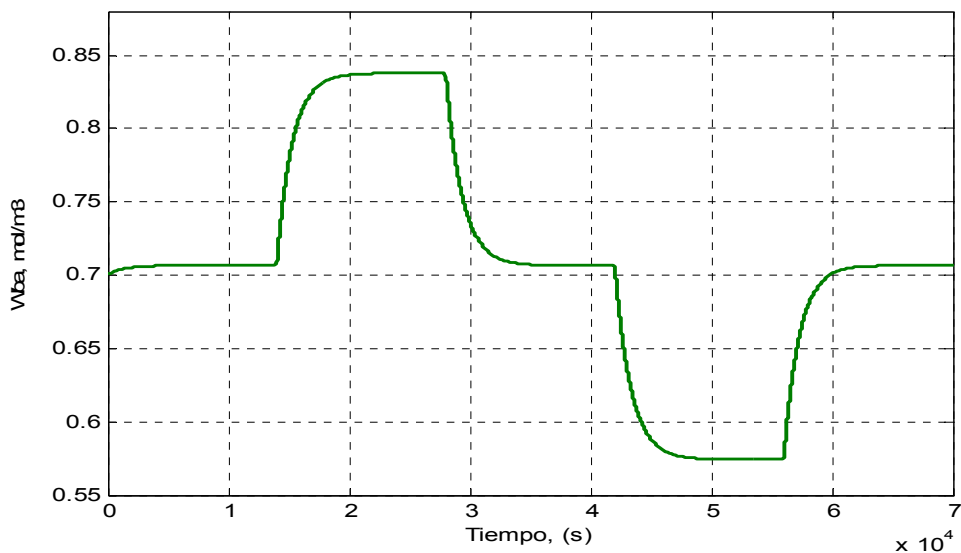


Figura (2.6): Respuesta de la concentración de invariantes básicas ante variaciones en el flujo ácido Q_2 a la entrada del Pozo.

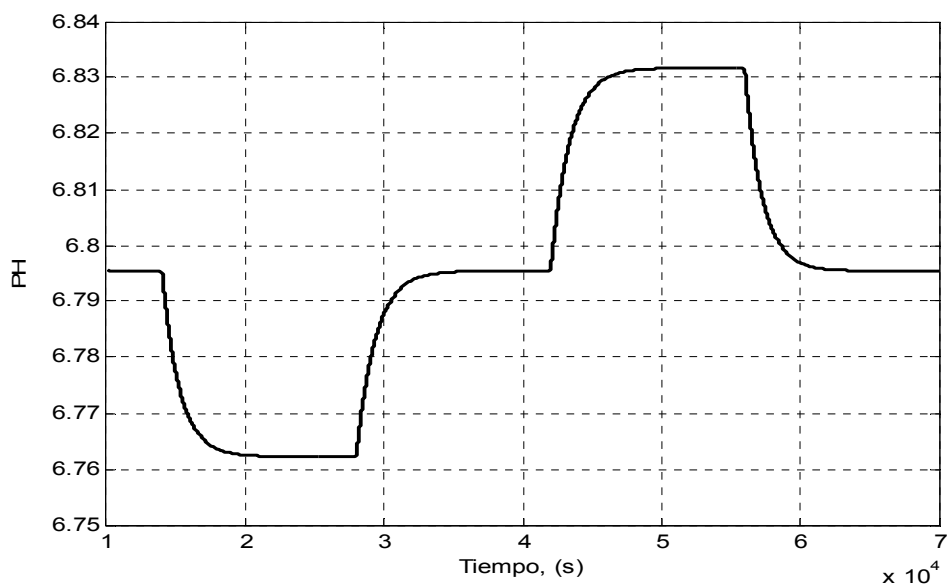


Figura (2.7): Respuesta del pH del agua ante variaciones en el flujo ácido $Q2$ a la entrada del Pozo.

Caso 2. En las **figuras (2.8, 2.9, 2.10, 2.11, 2.12)** se muestra el comportamiento de las salidas H_t , $Wa4$, $Wb4$ 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 $Q3$. Las entradas flujo $Q2$ (ácido) y $Q1$ son considerado como constantes y están en sus valores nominales de operación.

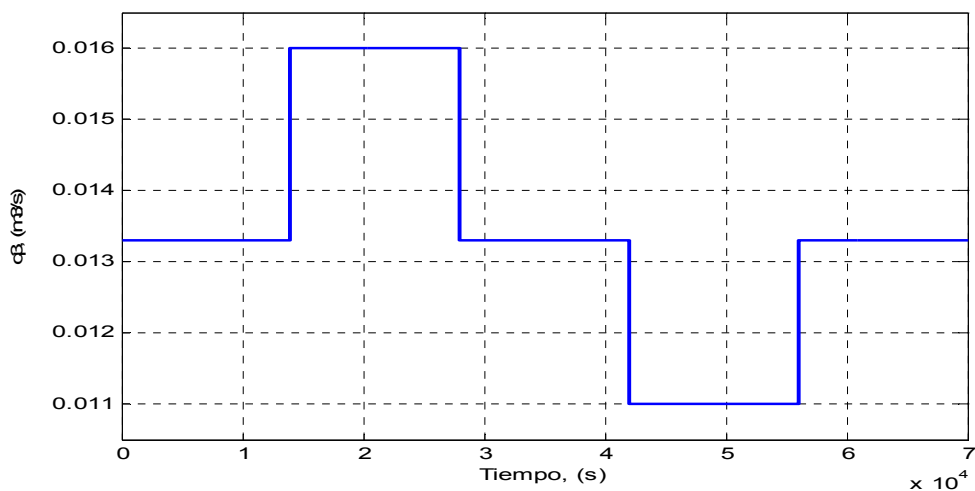


Figura (2.8): Variaciones en el flujo base Q_3 a la entrada del Pozo.

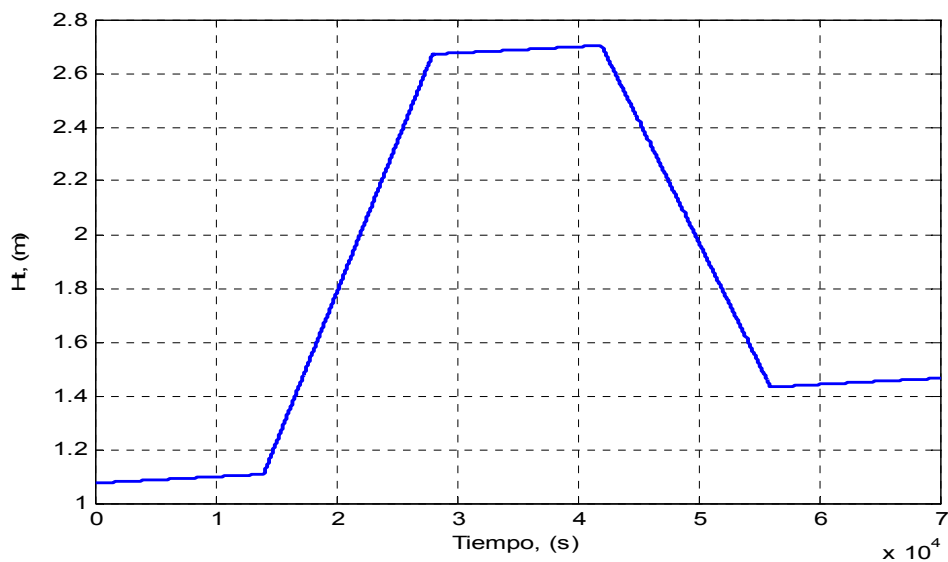


Figura (2.9): Respuesta del nivel H_t ante variaciones en el flujo de base Q_3 a la entrada del Pozo.

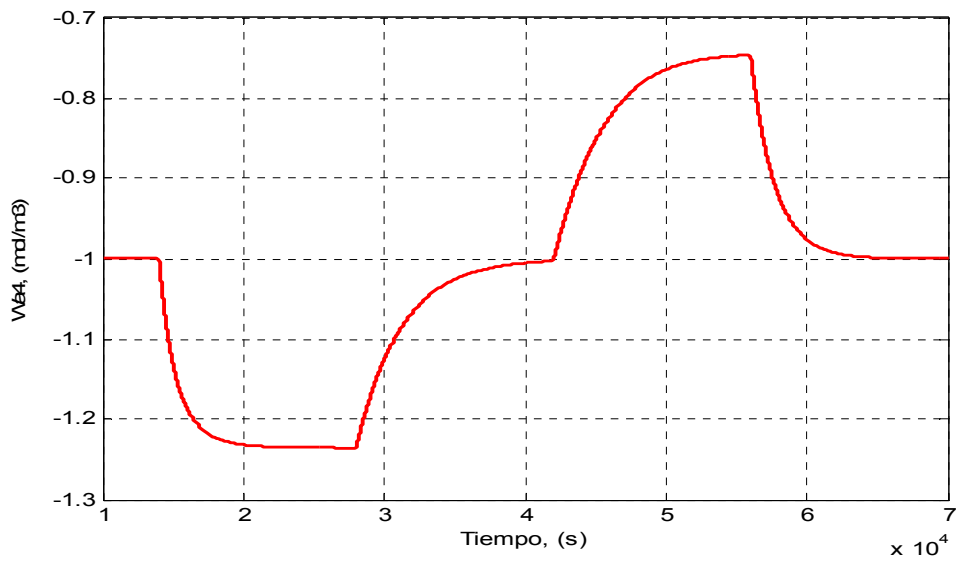


Figura (2.10): Respuesta de la concentración de invariante acidas ante variaciones en el flujo de base Q_3 a la entrada del Pozo.

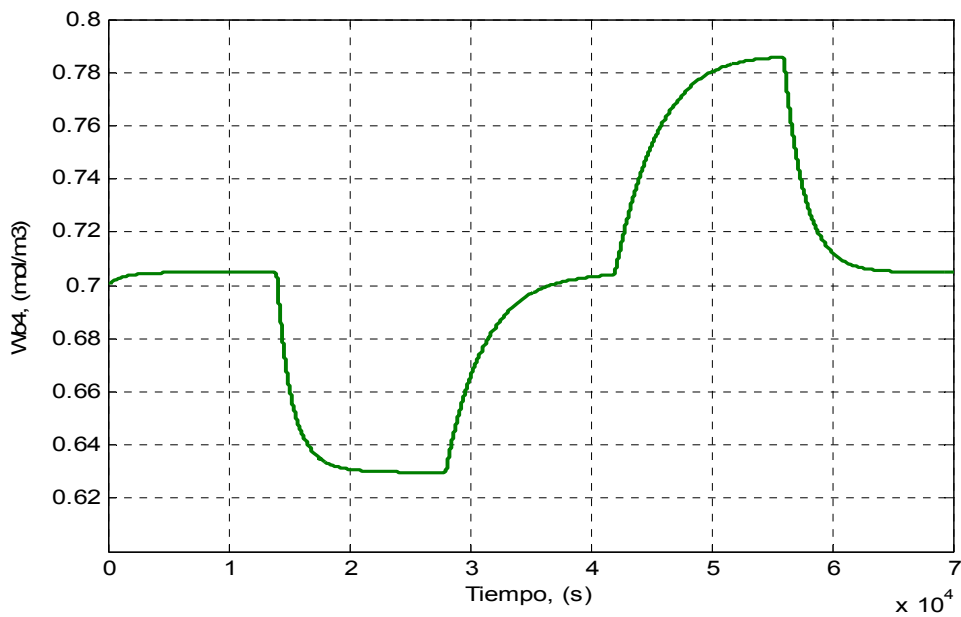


Figura (2.11): Respuesta de la concentración de invariantes básicas ante variaciones en el flujo de base Q_3 a la entrada del Pozo.

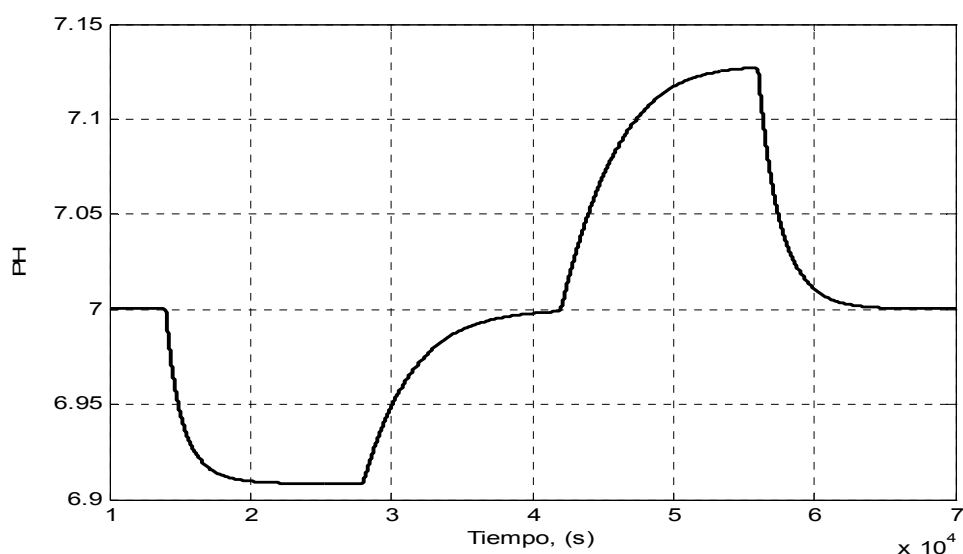


Figura (2.12): Respuesta del pH del agua ante variaciones en el flujo de base Q_3 a la entrada del Pozo.

Caso 3. En la **figuras (2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17)** se muestra el comportamiento de las salidas Q_{sb} , H_1 , W_{a4} , W_{b4} y pH , cuando se aplica una función paso escalón de $\pm 20\%$ cada 14000 segundos en torno del valor nominal del parámetro de entrada de la bomba $m(t)$. Las entradas flujo sustancias químicas Q_2 (ácido), Q_3 (base) y el flujo de entrada Q_1 son considerado como constantes y están en sus valores nominales de operación.

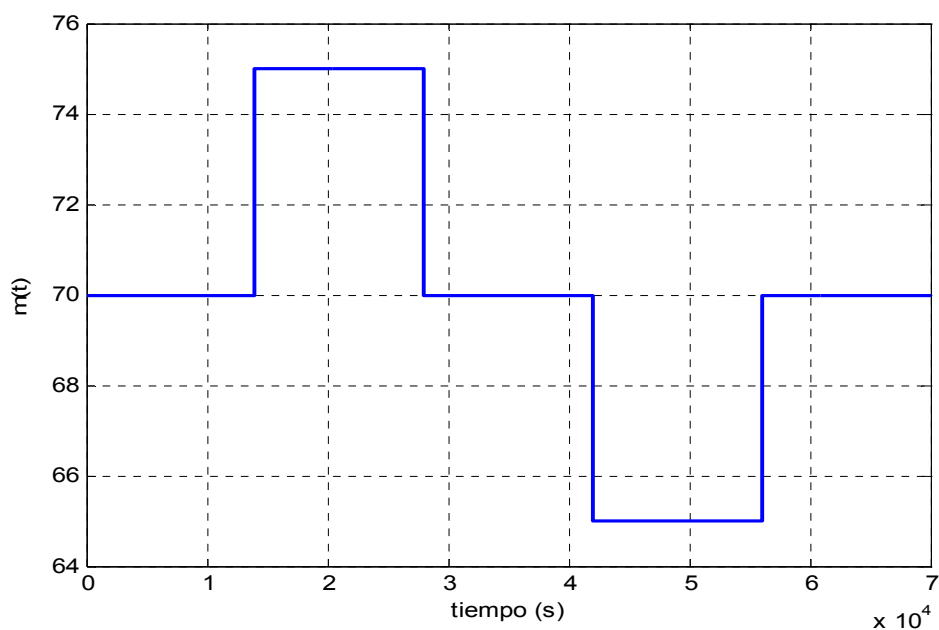


Figura (2.13): Variaciones en el parámetro $m(t)$ a la entrada de la bomba.

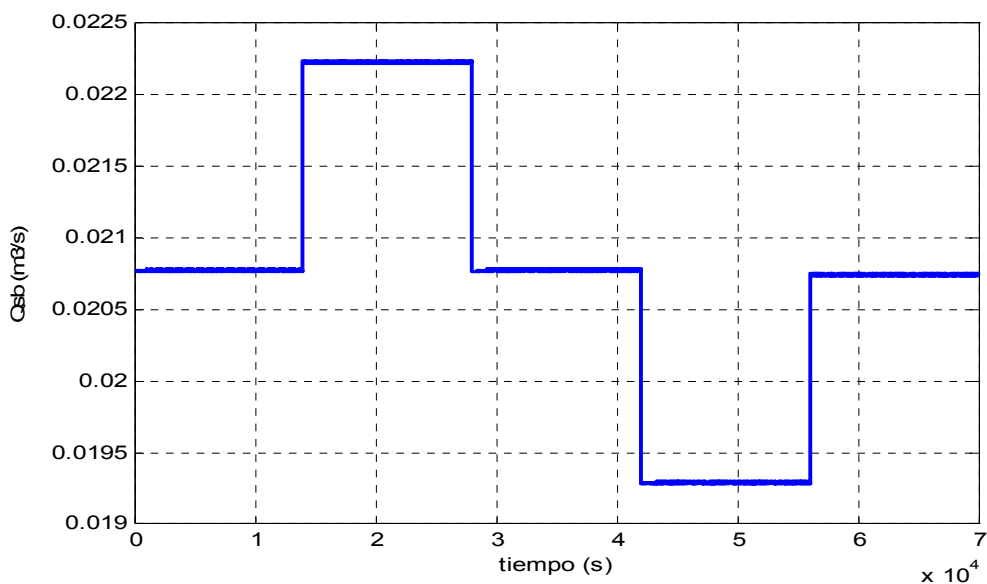


Figura (2.14): Respuesta del flujo de salida de la bomba ante variaciones en el parámetro $m(t)$.

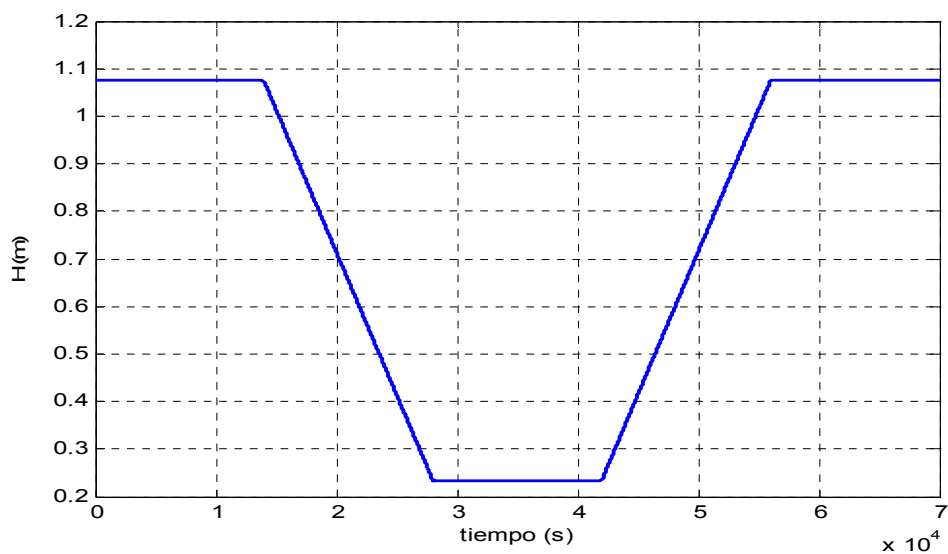


Figura (2.15): Respuesta del nivel H_t ante variaciones en el parámetro m (t) a la entrada de la bomba.

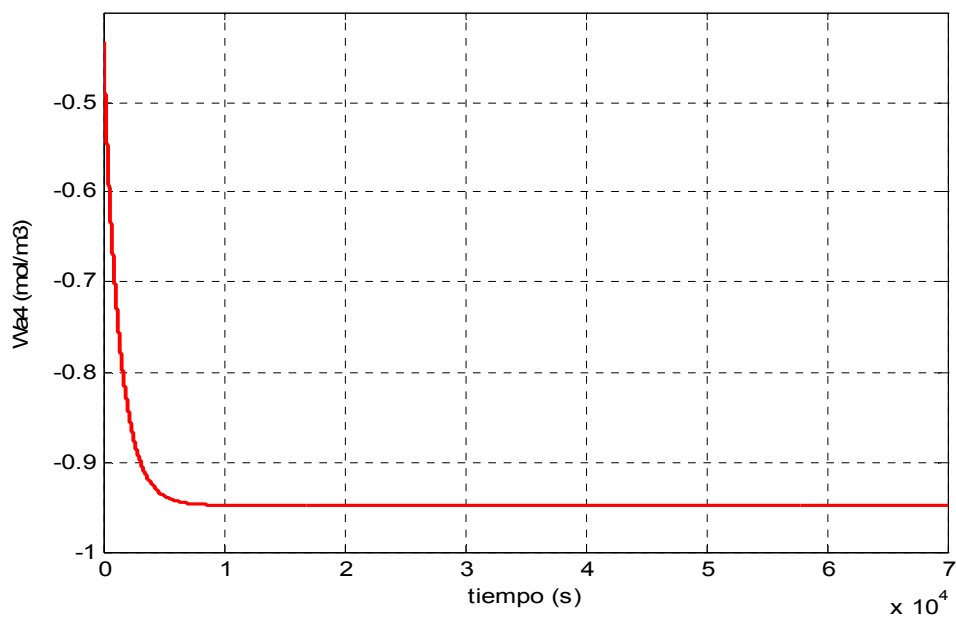


Figura (2.16): Respuesta de la concentración de invariante acidas ante variaciones en el parámetro m (t) a la entrada de la bomba.

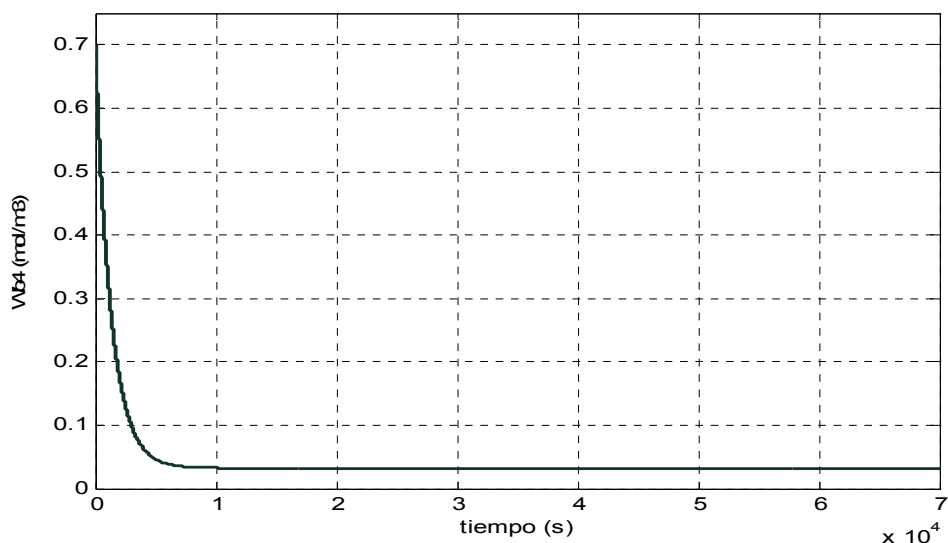


Figura (2.17): Respuesta de la concentración de invariantes básicas ante variaciones en el parámetro $m(t)$ a la entrada de la bomba.

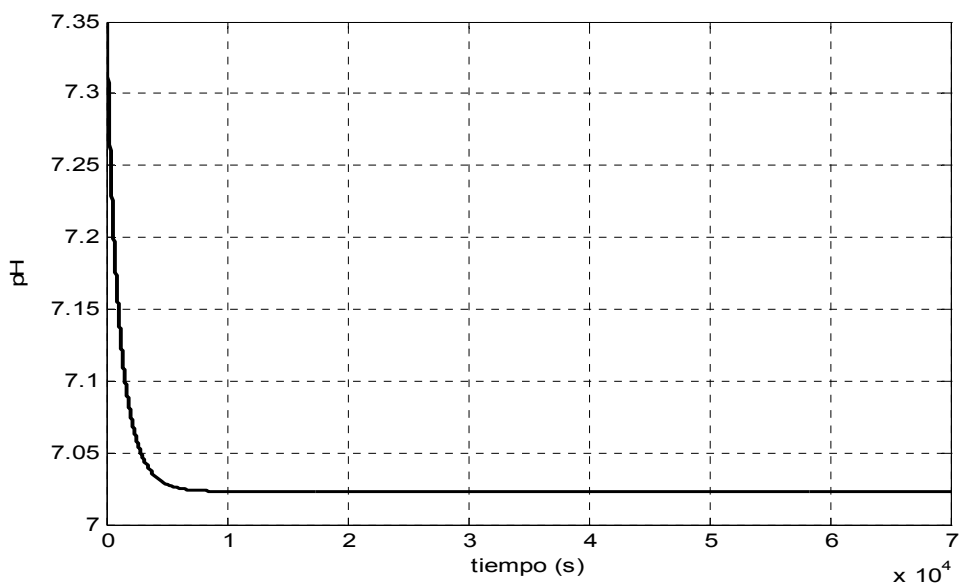


Figura (2.18): Respuesta del pH del agua ante variaciones en el parámetro $m(t)$ a la entrada de la bomba.



Caso 4. En la **figuras (2.19, 2.20, 2.21, 2.22, 2.23)** se muestra el comportamiento de las salidas H_t , W_{a4} , W_{b4} 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.

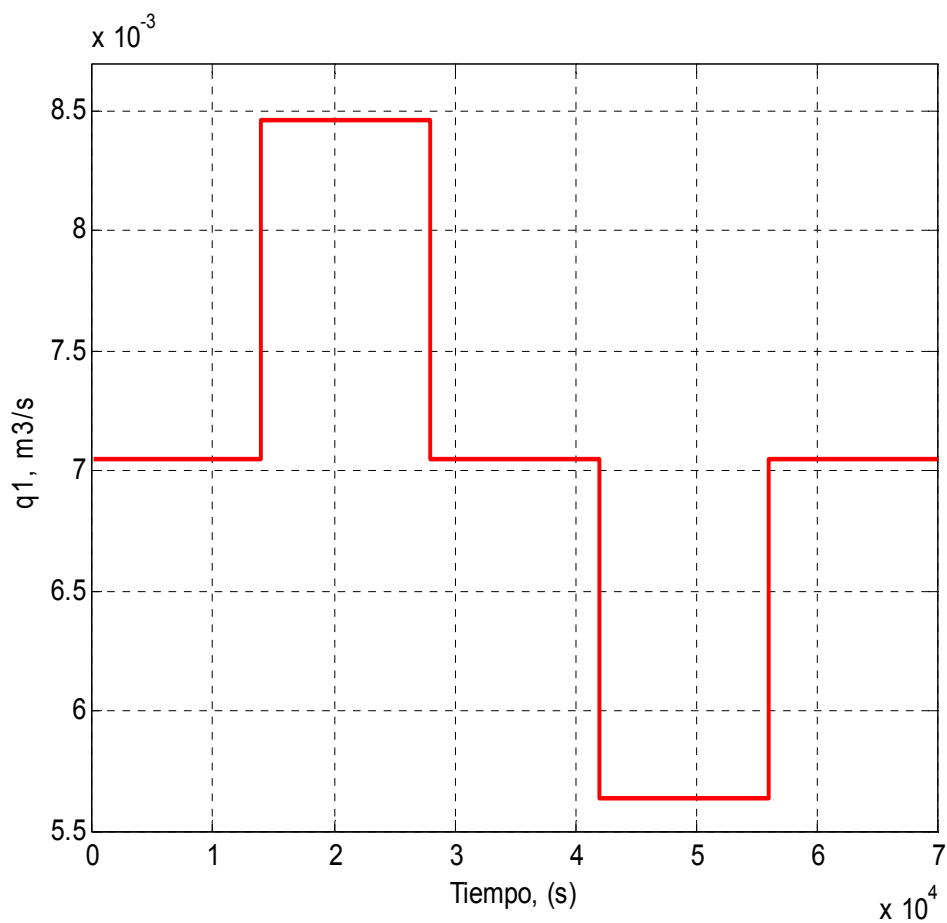


Figura (2.19): Variaciones en la perturbación Q_1 a la entrada del Pozo.

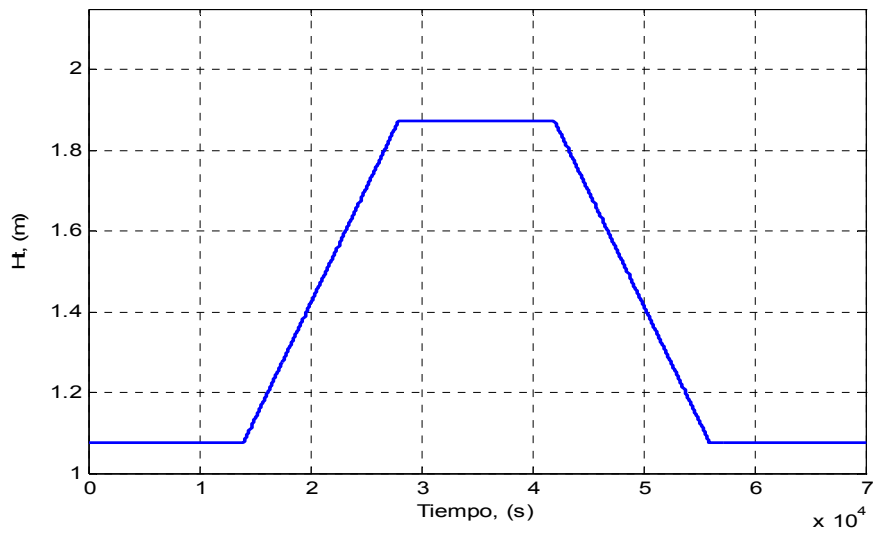


Figura (2.20): Respuesta del nivel H_t ante variaciones en la perturbación Q_1 a la entrada del Pozo.

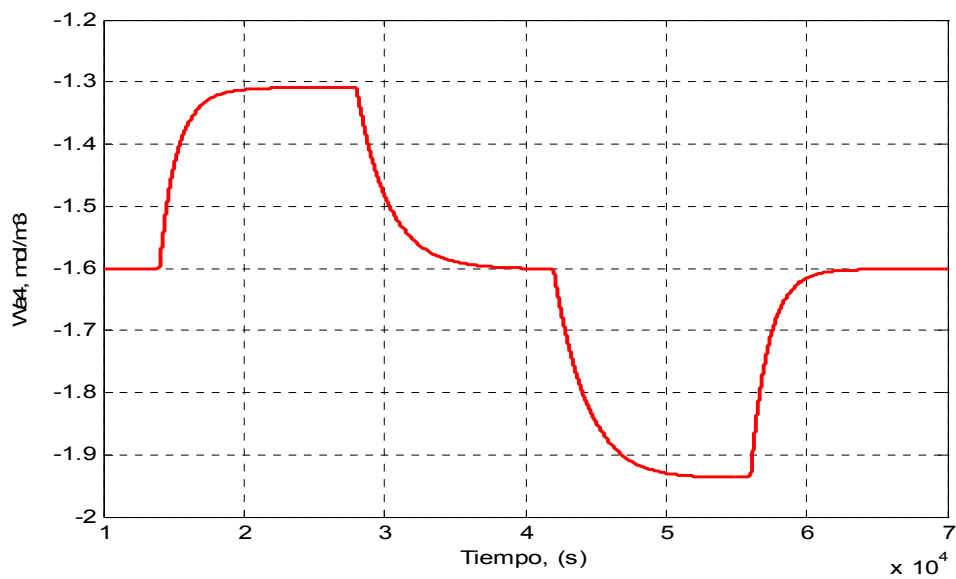


Figura (2.21): Respuesta de la concentración de invariantes acidas ante variaciones en la perturbación Q_1 a la entrada del Pozo.

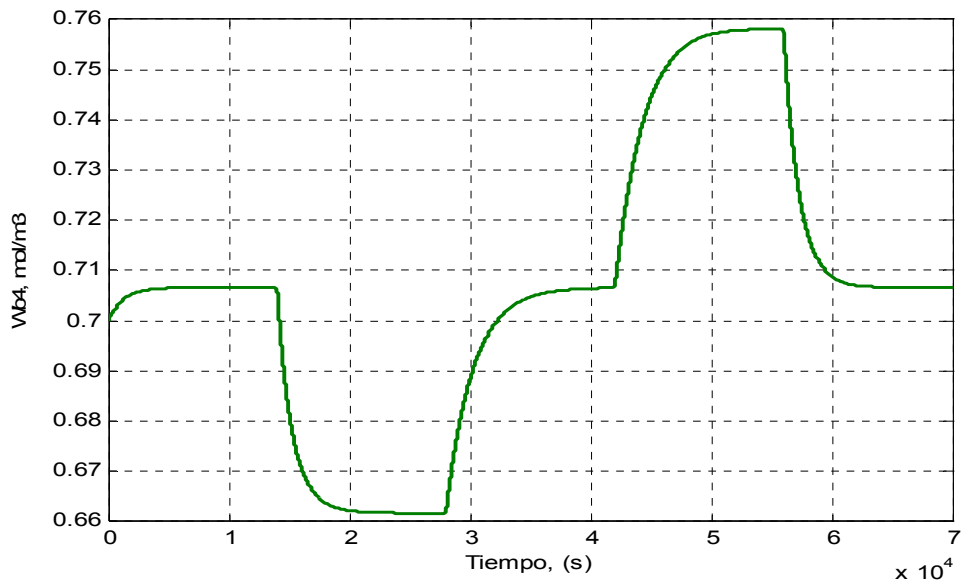


Figura (2.22): Respuesta de la concentración de invariantes básicas ante variaciones en la perturbación $Q1$ a la entrada del Pozo.

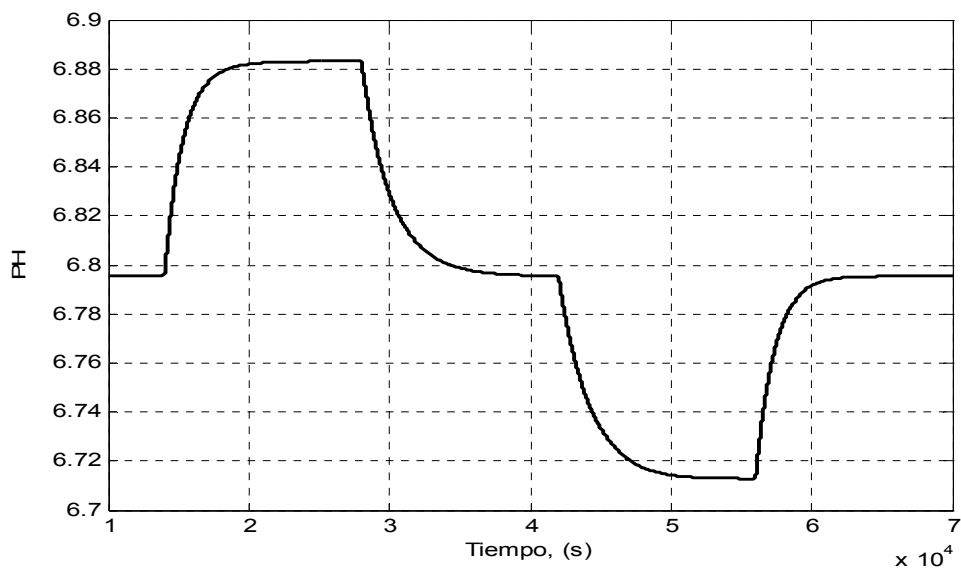


Figura (2.23): Respuesta del pH del agua ante variaciones en la perturbación $Q1$ a la entrada del Pozo.



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, aunque no muy acentuadas como en otros procesos. En la respuesta de la concentración de las invariantes ácidas y básicas de salidas W_{a4} y W_{b4} se tiene un desempeño parecido, con asimetrías de 0.1328 mol/m^3 y -0.1313 mol/m^3 para W_{a4} , para W_{b4} es de -0.0088 mol/m^3 y 0.00913 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. en 1997 [48].

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, aunque no muy acentuadas como en otros procesos. En la respuesta de la concentración de las invariantes ácidas y básicas de salidas W_{a4} y W_{b4} se tiene un desempeño parecido, con asimetrías de -0.0751 mol/m^3 y 0.0817 mol/m^3 para W_{a4} , para W_{b4} es de -0.235 mol/m^3 y 0.25603 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 $Wa4$ y $Wb4$ 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 $Q1$ (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 $Wa4$ y $Wb4$ se tiene un desempeño parecido, con asimetrías de -0.04492 mol/m^3 y 0.05149 mol/m^3 para $Wa4$, para $Wb4$ es de 0.2551 mol/m^3 y -0.2912 mol/m^3 . El nivel H_t varió en rampa, incrementándose ante los aumentos en el flujo de entrada $Q2$ (ácido) y disminuyendo de la misma forma cuando el flujo es menor, alcanza un valor constante cuando el flujo de entrada $Q2$ (ácido), vuelve a su valor original de operación.

2.5 Esquema de simulación a lazo abierto en simulink.

El software que se utilizó para la modelación y simulación de la investigación fue el Simulink de Matlab, a continuación en las **figuras (2.24, 2.25, 2.26, 2.27)** se muestran los esquemas desarrollados en dicho software:



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.

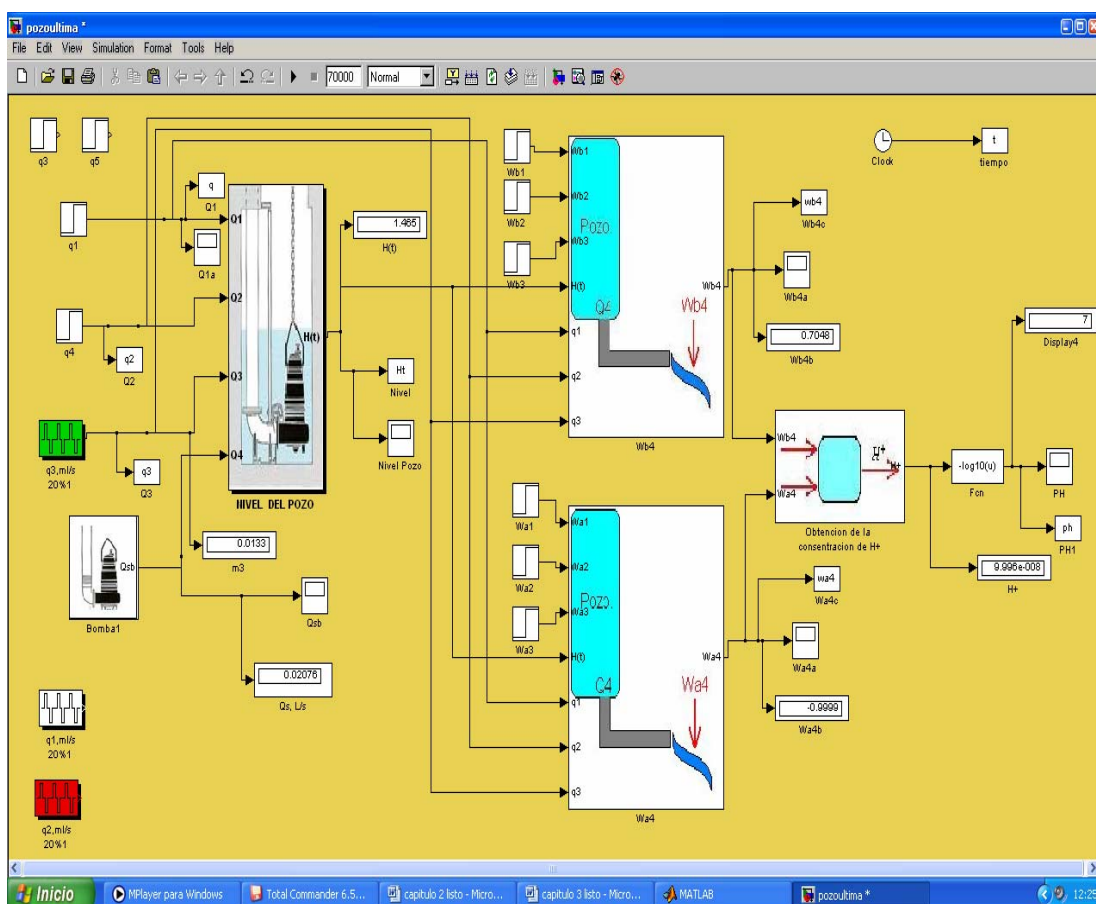


Figura (2.24): Ventana fundamental del Programa Simulador del Pozo en Matlab.



Capítulo II Modelación y Simulación

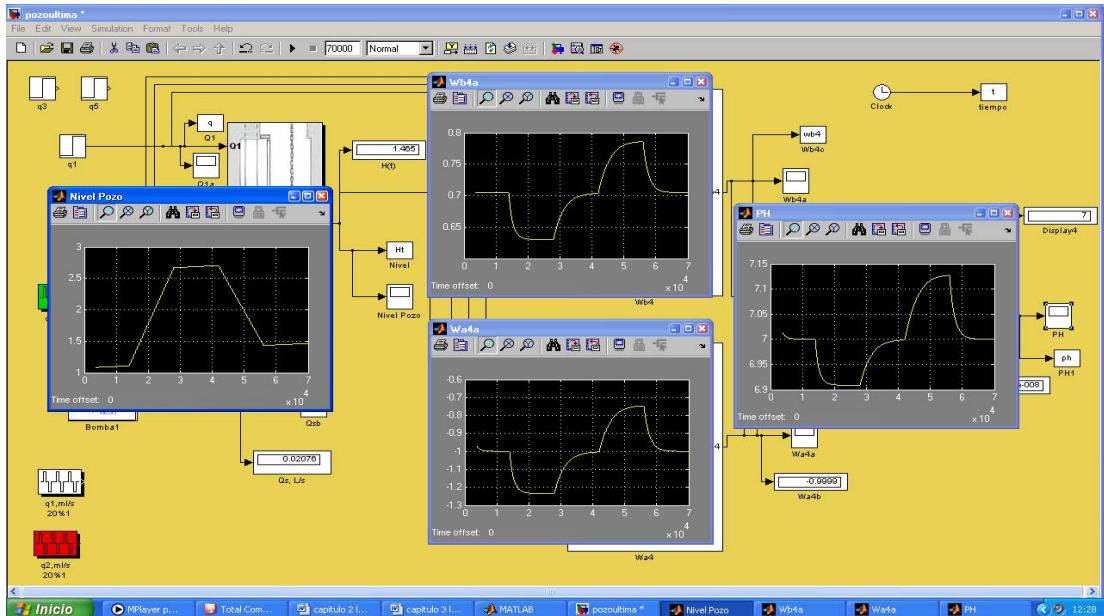


Figura (2.25): Ventana fundamental del Programa Simulador del Pozo en Matlab mostrando las principales variables.

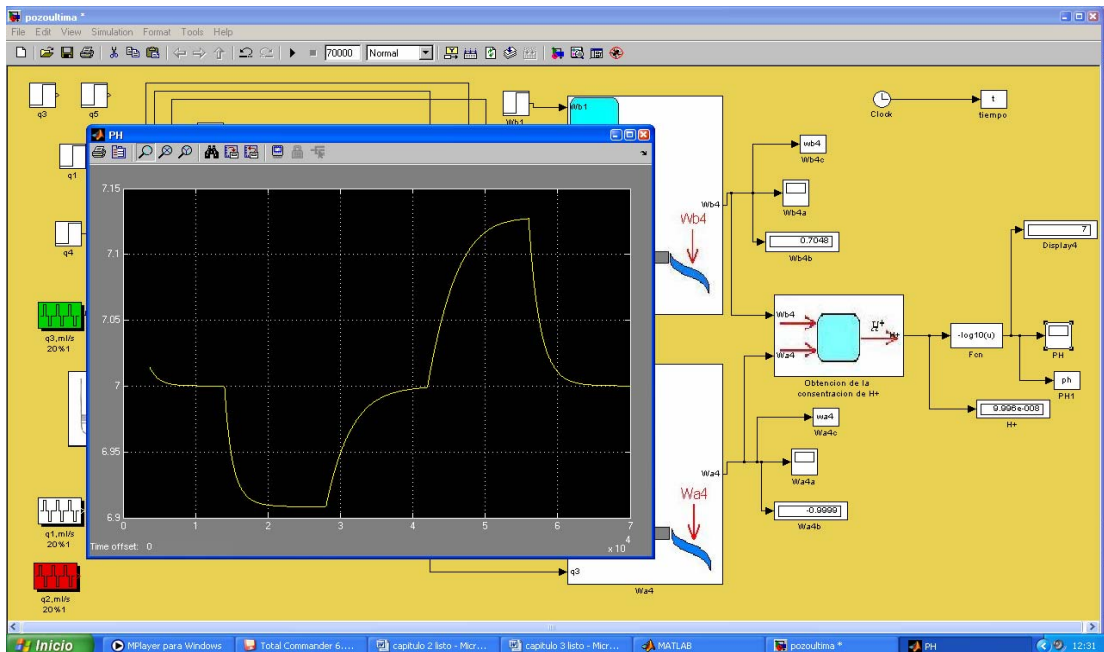


Figura (2.26): Ventana fundamental del Programa Simulador del Pozo en Matlab mostrando las variaciones de la variable de salida pH .



Capítulo II Modelación y Simulación

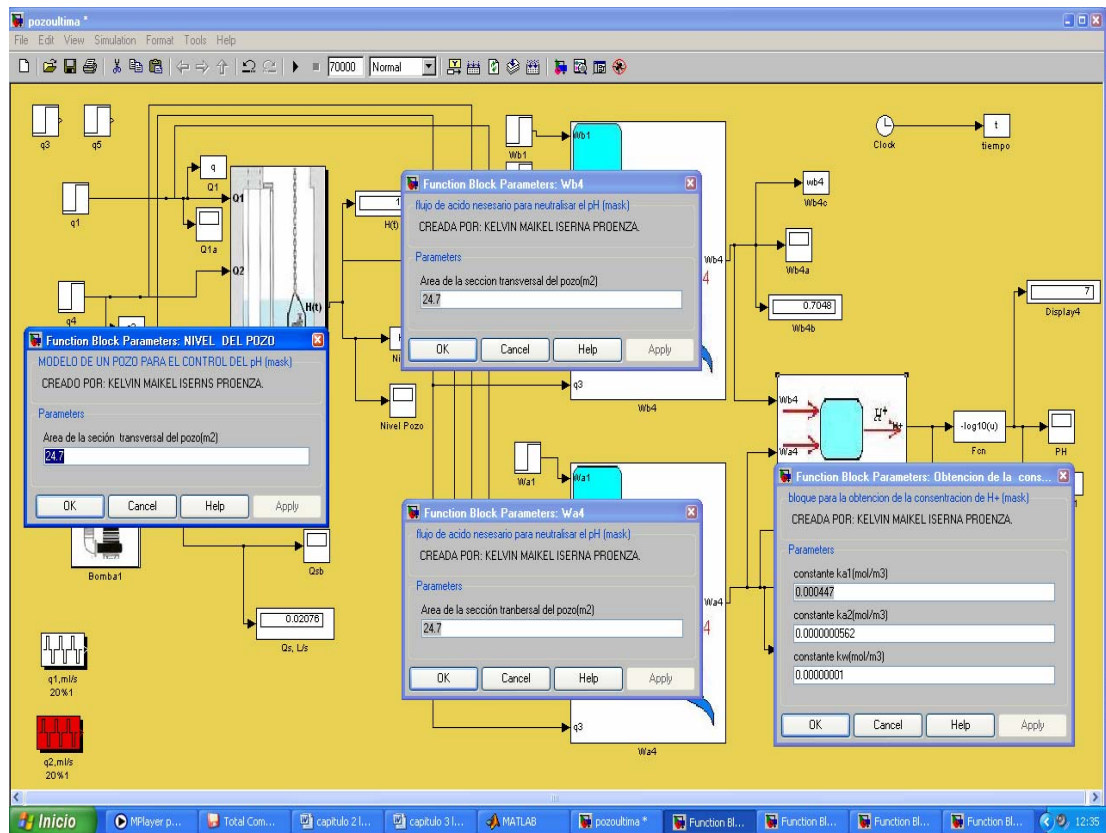


Figura (2.27): Ventana fundamental del Programa Simulador del Pozo en Matlab mostrando los cuadros de interfase con el usuario.



Capítulo III:

3.1 Introducción.

El objetivo del presente capítulo es proponer las técnicas de control multivariable clásico y de avanzada, para valorar el comportamiento en lazo cerrado del sistema de bombeo de las aguas residuales en el metro de Caracas.

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

Para definir los mejores pares de entrada y salida Bristol, E. H. en 1966 [4] 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. en 1982 [11], así como en el de Mc Avoy, T. J. en 1981 [33] cuya desventaja fundamental es que sólo trata con sistemas de dos entradas y dos salidas.

Es necesario destacar que el sistema de control propuesto en este capítulo debe ser aplicado en los 61 puntos bajos que existen en todo el metro.



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. en 1994 [44] y en el 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 neuroid, neurofuzzy, etc.

A continuación se presenta una clasificación, propuesta por Seborg, D. E. en 1994 [44] y en el 2000, acerca de las técnicas de control que son actualmente usadas en los procesos industriales.

1.- Estrategias de control convencional:

- i) control PID
- ii) control de razón o relación
- iii) control en cascada
- iv) control anticipatorio (feedforward)

2.- Métodos de control avanzado. Técnicas clásicas:

- i) ganancia programada (gain scheduling)
- ii) compensación de tiempo-muerto
- iii) control por desacoplamiento
- iv) control selectivo

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

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



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

- i) control óptimo (LQR)
- ii) sistema especialista
- iii) control no lineal
- iv) neurocontroladores
- v) control fuzzy

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

- i) control robusto (H_∞ , síntesis- μ)

3.3 Forma de definir los mejores pares de entrada salida.

Deshpande, P. B. en 1989 [8] realiza un análisis superior del RGA 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 antes de que el sistema de bombeo sea puesto en marcha.

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. en 1994 [38].



3.3.1 Técnica de la Descomposición en Valores Singulares (SVD)

Otra de las técnicas existentes para definir los mejores pares de entrada-salida es la técnica de la Descomposición en Valores Singulares o SVD (Singular Value Decomposition), a partir de la descomposición de la matriz de ganancia de régimen estacionario K .

Según Deshpande, P. B. en 1989 [8], la SVD es un algoritmo numérico, desarrollado para minimizar los errores de computo cuando es preciso realizar muchas operaciones con matrices.

El SVD de la 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.

Σ - 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.

Los resultados obtenidos al ser aplicada esta técnica al ejemplo del sistema de bombeo de las aguas en el metro de Caracas, a partir de la descomposición de su matriz de ganancia de régimen estacionario, se muestran a continuación.

Teniendo en cuenta la interacción entre las variables del sistema mostrada en la **figura (3.1)**.

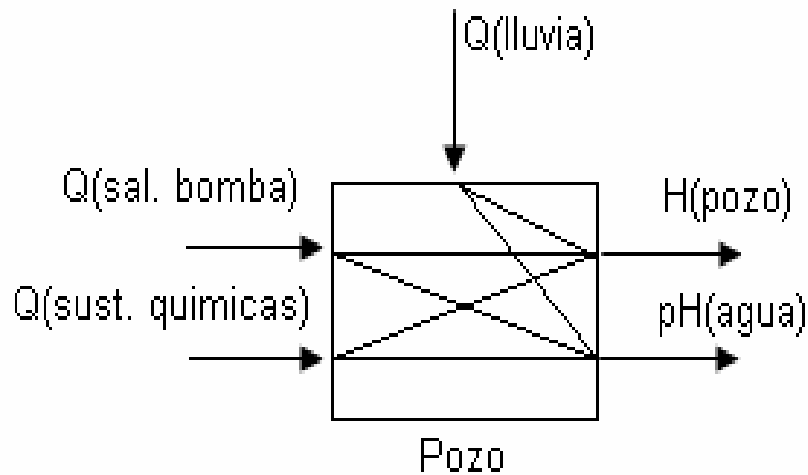


Figura 3.1: variables del sistema de control multivariable de los pozos de drenaje.

Fuente K. Iserns 2008.

Se tiene las siguientes ecuaciones de transferencia para los fujo de salida de la bomba y de sustancias químicas:

$$pH_{(s)} = G_{11(s)}Q_{sust.quimica} + G_{12(s)}Qsb_{(s)} \quad H_{(s)} = G_{21(s)}Q_{sust.quimica} + G_{22(s)}Qsb_{(s)}$$

$$Y_{(s)} = \begin{bmatrix} pH_{(s)} \\ H_{(s)} \end{bmatrix} \quad M_{(s)} = \begin{bmatrix} Q_{sust.quimicas(s)} \\ Qsb_{(s)} \end{bmatrix} \quad G_{(s)} = \begin{bmatrix} G_{11(s)} & G_{12(s)} \\ G_{21(s)} & G_{22(s)} \end{bmatrix}$$

$$Y_{(s)} = G_{(s)}M_{(s)}$$

$$G_{(s)} = \begin{bmatrix} \frac{K}{\tau S + 1} & \frac{K}{\tau S + 1} \\ \frac{K}{\tau S} & \frac{K}{\tau S} \end{bmatrix}$$



Donde:

En el caso de $G_{11(s)}$, $G_{12(s)}$, $K = \frac{\Delta E}{\Delta S}$ y $\tau_{(s)} = t$ para el 63% de ΔS , para $G_{21(s)}$ y $G_{22(s)}$,

$$K = \tan(\alpha)$$

ΔE Es la variación a la entrada.

ΔS Es la variación a la salida.

α Es el ángulo de inclinación de la curva de H_t .

Además se obtienen las de las perturbaciones:

$$G_{(s)} = \begin{bmatrix} G_{11(s)} \\ G_{21(s)} \end{bmatrix} \quad G_{(s)} \begin{bmatrix} \frac{K}{\tau S + 1} \\ \frac{K}{\tau S} \end{bmatrix} \quad G_{(s)} = \begin{bmatrix} \frac{0.092}{1340S + 1} \\ \frac{2.75}{\tau S} \end{bmatrix}$$

Como en el sistema se tiene un flujo ácido y otro básico, se obtendrá la matriz de ganancia para cada uno de los casos.

Para el caso del flujo ácido:

$$G_s = \begin{bmatrix} \frac{0.0043}{1345S + 1} & \frac{8}{1300S + 1} \\ \frac{2.75}{S} & \frac{-2.75}{S} \end{bmatrix} \quad K = \begin{bmatrix} 0.0043 & 8 \\ 2.75 & -2.75 \end{bmatrix}$$

Para el caso del flujo básico:

$$G_s = \begin{bmatrix} \frac{47.444}{3700S + 1} & \frac{-8}{1300S + 1} \\ \frac{2.4751}{S} & \frac{-2.75}{S} \end{bmatrix} \quad K = \begin{bmatrix} 47.444 & -8 \\ 2.4751 & -2.75 \end{bmatrix}$$

Descomponiendo las matrices del sistema analizado en sus valores singulares (SVD), según la ecuación (3.1), se tiene:



Para el caso del flujo ácido:

$$U = \begin{bmatrix} -0.9336 & 0.3582 \\ 0.3582 & 0.9336 \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} 8.5109 & 0 \\ 0 & 2.5863 \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} 0.1153 & 0.9933 \\ -0.9933 & 0.1153 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Para el caso del flujo básico:

$$U = \begin{bmatrix} -0.9982 & -0.0603 \\ -0.0603 & 0.9982 \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} 48.2011 & 0 \\ 0 & 2.2960 \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} -0.9856 & -0.1691 \\ 0.1691 & -0.9856 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

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:

Para el caso del flujo ácido:

$Q_{sust.químicas}(-0.9336) \Rightarrow pH(0.9933)$ (Flujo de sustancias químicas con el pH a la salida).

$Qsb(0.9336) \Rightarrow H_t(-0.9933)$ (Flujo de salida de la bomba con nivel de pozo).

Para el caso del flujo básico:

$Q_{sust.químicas}(-0.9982) \Rightarrow pH(-0.9856)$ (Flujo de sustancias químicas con el pH a la salida).

$Qsb(0.9982) \Rightarrow H_t(-0.9856)$ (Flujo de salida de la bomba con el nivel del pozo).



Los aspectos físicos del proceso que describen cada uno de sus componentes y otras características importantes de esta técnica son tratadas por Deshpande, P. B. en 1989 [8].

La relación entre el mayor valor singular y el menor (σ_m/σ_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.

$$CN = \frac{\sigma_m}{\sigma_1} \quad (3.4)$$

Según las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3), el Número de Condicionamiento calculado es:

Para el caso del flujo ácido:

$$CN = 3.2908$$

Para el caso del flujo básico:

$$CN = 20.9935$$

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 ejemplo de sistema para flujo básico es condicionado, mas no óptimamente, para efectuar el desacoplamiento, según Deshpande, P. B. en 1989 [8].



3.4 Propuesta de control clásico. Control PID multilazo.

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. en 1989 [8], Hwang, D. Sh. y Hsu, D. L. en 1997, Weng, K. H. en 1997 cerca del 90% de los controladores industriales empleados actualmente son del tipo PI. Ender, D. B. en 1993 [10] 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 [3] 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 en 1993). Dentro de los controladores PID convencionales se encuentran los multilazos, cuyas técnicas de sintonía han encontrado un mayor desarrollo en la última década (Seborg, D. E. y otros en 1989 [121]; Hwang, D. Sh. en 1997 [19]; Weng, K. H. en 1997; Shing-Jia, S. y otros en 1998). El Control Multivariable con Desacoplamiento, como una estrategia de control avanzado.

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. en 1971 [36] 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. en 1989 [44], 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. en 1986 [42]. 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. en 1989 [8]). Esto provoca que su empleo sea limitado.

El método desarrollado por Basualdo, M. S. y Marchetti, J. L. en 1990 [2], 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 problema de control del sistema de bombeo de los pozos de drenaje del metro de Caracas, en la estrategia de control convencional, 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?

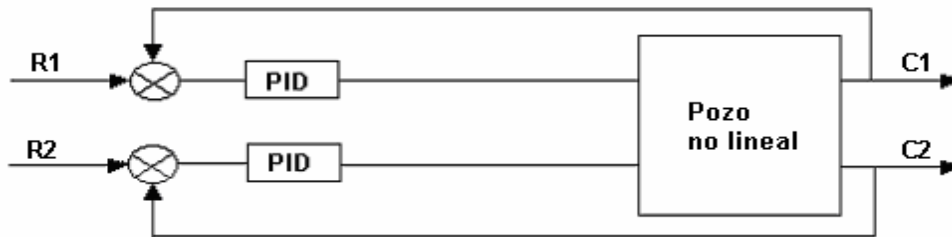


Figura 3.2: Sistema de control 2x2 con Controlador PID Multilazo.

Fuente K. Iserns 2008.

El trabajo de Zanabria, O. en 1997 [53], 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. en 1981 [6] y Cameron, F. y Seborg, D. E. en 1983 [5], 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 en 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, en 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 se muestran ejemplos de aplicación utilizando la simulación en sistemas previamente linealizados y el método basado en la sintonía secuencial propuestos por Shing-Jia, S. y Shyh-



Hong, H en 1998 , el cual propone que la sintonía del Controlador PID Multilazo se realice de forma secuencial iterativamente, utilizando una de las técnicas de sintonía SISO conocida.

Este es una combinación de los métodos del Peso de la Integral del Error Cuadrático (WISE) propuesto por Nishikawa, Y. en 1984 [37] y el IMC-PID, dadas para una relación de tiempo desde 0,01 hasta 10, en lo cual radica su ventaja, a pesar de estar limitada su presentación en el trabajo sólo para sistemas lineales. Al aplicar el Control PID Multilazo, existe el problema de la interacción entre los lazos de control, lo que dificulta grandemente poder obtener y mantener siempre una buena sintonía.

3.4.2 Métodos de Diseño y Sintonía para el Controlador PID Multilazo

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

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. en 1991; Chiu, M. S. y Arkun, Y. en 1992 ; Loh, A. P. y otros en 1993 ; Shen, S. H. y Yu, C. C. en 1994). El problema de diseño multivariable es descompuesto en secuencias de diseño de problemas SISO.

Según Shing-Jia, S. en 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 secuencia 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. en 1983 [33]; Loh, A. D. y otros en 1993



Hwang, S. H. en 1995 [21] 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. en 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 por Shing-Jia, S. en 1998, 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 en 1984 [37], combinado con el Control por Modelo Interno IMC-PID (Internal Model Control), a partir de una serie de ecuaciones analíticas propuestas. De aquí se obtienen los resultados de diseño mostrados en la **tabla 3.2**.

Tabla 3.2: Parámetros de sintonía del controlador PI Multilazo a través de la Sintonía Secuencial.

Lazo de control	K_c	τ_I	Tipo de acción de control
$Q_{sust.quimicas} \Rightarrow pH$	0.51	3.1	Directa
$Q_{sb} \Rightarrow H_t$	-0.85	1.7	Inversa

Fuente K. Iserns 2008.

Debido a la presencia de controladores lineales actuando sobre un sistema no lineal, como resultado ser el del bombeo de los pozos, es necesario seguramente realizar



pequeños ajustes al implementar el mismo. A continuación se muestran en las **figuras (3.3) y (3.4)** la respuesta del control diseñado para variaciones en la señal de referencia.

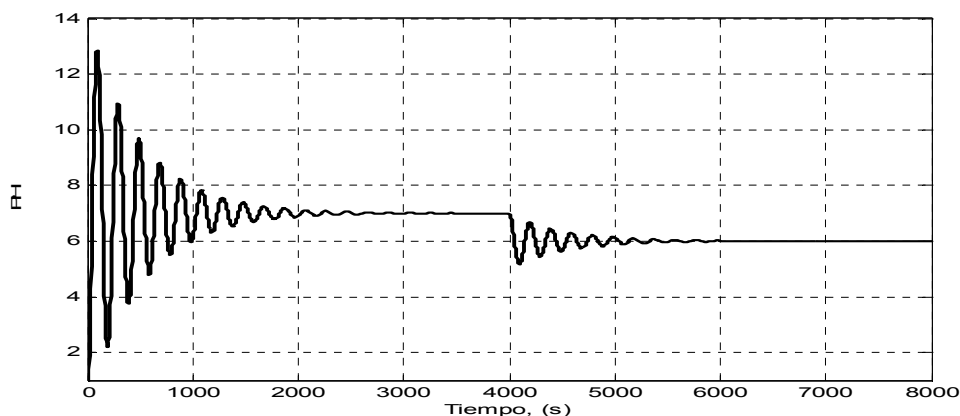


Figura (3.3): Respuesta del pH en el sistema de control 2x2 con Controlador PID Multilazo.

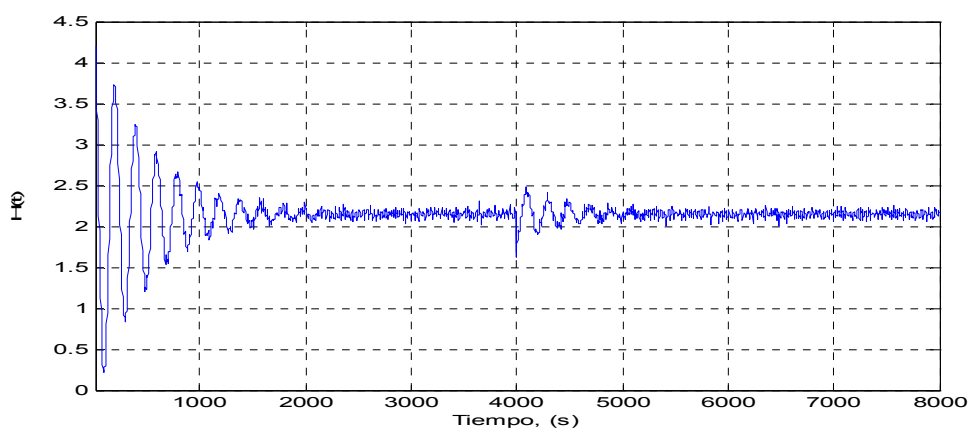


Figura (3.4): Respuesta del nivel en el sistema de control 2x2 con Controlador PID Multilazo.

3.5 Técnicas de Desacoplamiento de Variables Entrada-Salida.

Para problemas de control moderno con grandes interacciones entre las variables controladas y manipuladas, 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)**.

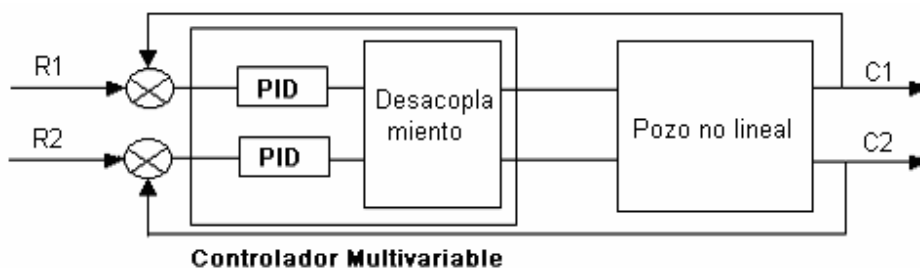


Figura (3.5): Sistema de Control Multivariable con Desacoplamiento incorporando un compensador de interacciones.

Fuente K. Iserns 2008.

En la **figura (3.6)**, se muestra el esquema del Control Multivariable con desacoplamiento propuesto.

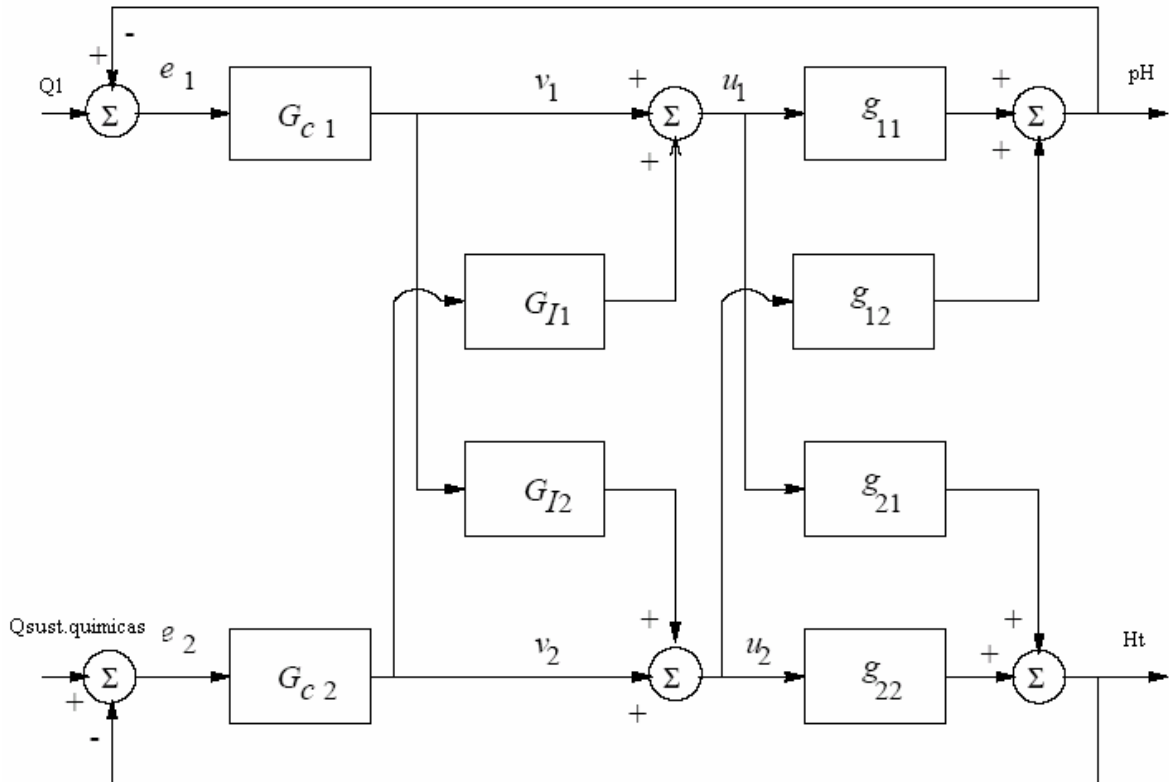


Figura (3.6): Esquema del Control Multivariable con Desacoplamiento propuesto.

3.51 Control multivariable con desacoplamiento.

El método de desacoplamiento desarrollado por Rosenbrock, H. H. en 1970 [41] y 1974 [40], Maciejowski, J. M. en 1989 [30] y Deshpande, P. B. en 1989 [8] 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 [48] 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. en 1997 [17], 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. en 1994 [38] 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 [14] 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 [62], 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. en 1989 [44], actualmente entre las técnicas avanzadas de control ampliamente usadas en la industria y empleado en los casos de sistemas multivariabes con muchas interacciones entre las entradas y las salidas, Shing-Jia, S. en 1998 [46].

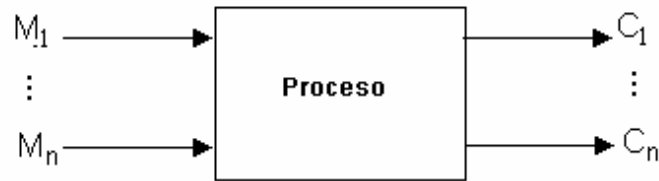


Figura (3.7): Esquema de un Control Multivariable con n entradas y n salidas, en un proceso ($n \times n$).

Fuente D. E. Seborg 1989.

3.5.2 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. en 1997 [17], donde afirma 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. en 1994 [38], 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:

$$G_I(s) = G^{-1}_p(s)G_R(s) \quad (3.5)$$

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:

$$G_I(s) = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

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. en 1997 [17], resultando para el ejemplo del sistema de bombeo de los pozos:

$$G_{I_s}(s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ D_{21} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

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 se toma $S=0$. Entonces la ecuación para determinar la matriz de desacoplamiento o compensador de interacciones estático a partir de la ecuación (3.5) resulta:

$$G_I = K_p^{-1} K_R \quad (3.8)$$

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:

Para el caso del flujo ácido:

$$G_I = \begin{bmatrix} 1 & -199.9 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Para el caso del flujo básico:

$$G_I = \begin{bmatrix} 1 & 0.169 \\ 0.903 & 1 \end{bmatrix}$$

De la matriz G_I se obtienen para ambos casos los desacopladores estático:

Para el flujo ácido se obtiene un solo desacoplador:

$$D_{12} = -199.9.$$

Para el flujo básico se obtiene dos desacopladores:

$$D_{12} = 0.169 \text{ y } D_{21} = 0.903.$$

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.

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 (3.5) y (3.6) para cada flujo.

Para el flujo ácido:

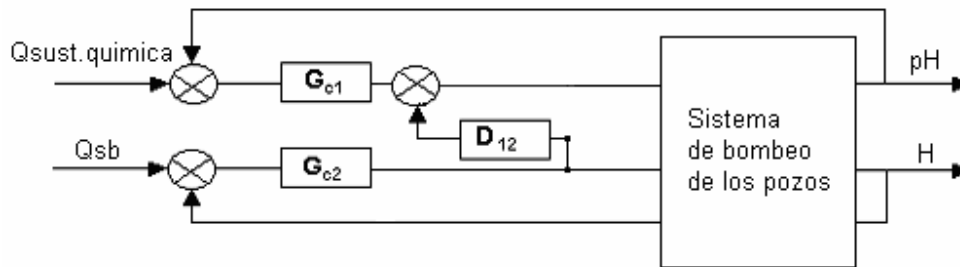


Figura (3.8): Sistema con Desacoplamiento Simplificado, en el sistema de bombeo de los pozos.

Para el flujo básico:

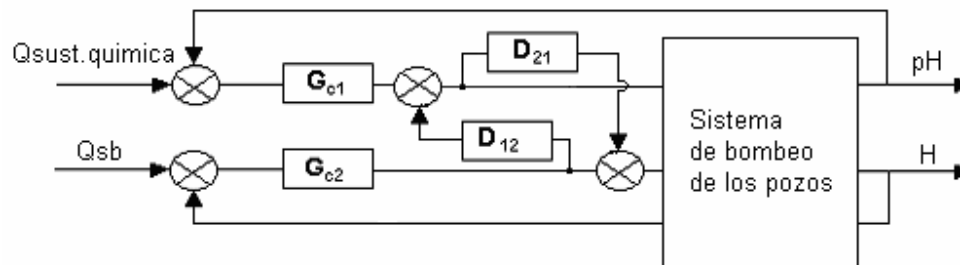


Figura (3.9): Sistema con Desacoplamiento Simplificado, en el sistema de bombeo de los pozos.

Fuente K. Iserns 2008.

3.6 Algunas Recomendaciones antes de Implementar el Desacoplamiento

Existen algunas limitaciones en la implementación del desacoplamiento según Ogunnaike, en 1994 [38], cuestión que es preciso tener en cuenta en el diseño de un desacoplador. El desacoplamiento perfecto solo es posible si el modelo es perfecto, por eso este tipo de desacoplamiento es inalcanzable en la práctica. Existen muchos casos de procesos industriales, que teniendo un modelo imperfecto, este fue aplicado con muy buenos resultados, (Guzmán, D. en 1999 [14]).



Capítulo IV:

3.1 Introducción.

En el siguiente capítulo se desarrollara una serie de valoraciones: ambiental, económica, sociológica y técnico científica de la investigación realizada y de el sistema de control y el la obtención del pH dinámico en cuestión.

3.2 Valoración ambiental.

El desarrollo de este sistema de control tiene un impacto favorable sobre el medio ambiente ya que no solo incluye el control como tal sino también el monitoreo dinámico del pH en las aguas bombeadas, este ultimo es un indicador eficiente para la contaminación. De esta forma se puede evitar la contaminación de ese liquido tan preciado que es el agua y del medio ambiente en general, según el lugar que sean vertidas estas aguas.

De esta forma se contribuye a evitar el deterioro y a la preservación del medio ambiente. Por lo que es favorable el empleo de este tipo de control ya que el medio ambiente esta en constante deterioro.

3.3 Valoración económica.

En la presente investigación solo se llega a la propuesta del Sistema de Control, como no se realiza la implementación del mismo, es decir solo se trabaja en el diseño del modelo matemático y su simulación esto fue realizado sobre el software la valoración económica esta basada en el método utilizado para estos.



Barry Boehm, en su libro clásico sobre economía de la Ingeniería del Software, introduce una jerarquía de modelos de estimación de Software con el nombre de COCOMO, por su nombre en Inglés (COConstructive, COst, MOdel) modelo constructivo de costo. Basándome en este modelo estimaré el esfuerzo, tiempo de desarrollo, cantidad de hombres y costo de componentes representativos del software.

El desarrollo de esta investigación como tesis de diploma implica una reducción total de los costos, ya que si fuera realizada por un equipo de especialistas multidisciplinario por las características de objeto de estudio tendría un costo elevado.

A continuación se realiza un desarrollo aproximado del costo de la investigación en el caso de que fuera realizada por un equipo de especialistas multidisciplinario:

El equipo mínimo de especialistas necesario para desarrollar la investigación estaría conformado de la siguiente manera:

- Un Ing. Eléctrico, jefe del proyecto.
- UN Ing. Agrónomo.
- Un Lic. En Matemáticas.
- Un Lic. En Química.
- Dos Técnicos, Operadores de los equipos.

Por lo que se necesita un equipo de 6 personas como mínimo.

Este valor sería nuestro Esfuerzo de Desarrollo (PM).

$$PM = 6$$

Estimando que el equipo necesite 4 meses para realizar la investigación.

Este sería nuestro Tiempo de Desarrollo (TDEV).



$$TDEV = 4$$

Con estos datos se calcula la Cantidad de Hombres (CH) por mes que se necesita que trabajen.

$$CH = \frac{PM}{TDEV} \quad CH = 1.5 \approx 2 \quad \text{hom/mes}$$

Es decir que se necesita que trabajen 2 hombres por cada mes.

Teniendo este resultado se calcula el Costo por Hombres en cada Mes (CHM)

El salario básico (SB) que devenga un especialista en nuestro país es de \$325.

$$CHM = CH * SB \quad CHM = \$650 \quad \text{por cada mes}$$

Con estos resultados se calcula el Costo de la Investigación (C).

$$C = CHM * TDEV \quad C = \$2600$$

Lo que quiere decir que el costo aproximado de la investigación si fuera realizada por un equipo de especialistas es de \$2600, esto es lo que se esta ahorrando con la realización de la investigación como tesis de diplomado.

Otra apreciación es que se esta ablando de salarios básicos en moneda nacional, no se tiene en cuenta el posible pago en CUC, esto aumentaría el costo de la investigación.

También es necesario destacar que con la implementación de esta investigación la empresa estaría garantizando un bajo índice de contaminación, lo que resulta económico pues no tendría que gastar grandes sumas de dinero en multas por contaminación del medio ambiente.



3.4 Valoración de las condiciones Sociológicas.

La implementación de esta investigación tendría un impacto favorable en las condiciones sociológicas ya que al tener bien controlado el bombeo de estas aguas se evita las posibles inundaciones por lo que se mejoraría el ambiente en el metro, esto es factible para la población que a diario transitan por las estaciones del metro, además teniendo el control sobre el nivel de contaminación se garantiza condiciones higiénicas factibles para la población que hace uso de este servicio.

De esta forma se mejoraría el ambiente en las estaciones del metro lo que mejora las condiciones sociológicas.

3.5 Valoración técnico científica.

La sociedad de hoy en día mantiene una evolución constante en cuanto al desarrollo científico técnico, esto a conllevado a resultados novedosos en la ciencia.

Tanto así que ya se ha reducido el tiempo de llevar un sueño científico ambicioso a la realidad objetiva.

Esta investigación tiene dos grandes aportes científicos:

El primer aporte científico de esta investigación es la aplicación del control multivariable con excelentes resultados, lo cual es algo difícil por las inconvenientes que presenta la aplicación de este método de control, ya que es una técnica novedosa sujeta a estudios para su perfección completa.

El segundo aporte científico genial de esta investigación es la obtención de un modelo matemático para el monitoreo dinámico de forma virtual el pH algo novedoso pues existe muy poca bibliografía acerca del tema, esto permitirá realizar estudios tanto de contaminación como de procesos químicos donde este implícito este parámetro.



Conclusiones:

✓ Se realizó el estudio de las principales características de los pozos de drenaje del Metro de Caracas.

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

✓ Se caracterizó el proceso a ser controlado, determinándose las principales variables que inciden en el correcto funcionamiento de los pozos de drenaje del metro de Caracas a partir de su análisis como objeto de regulación automática en un diagrama de flujo de señales, resultando ser un sistema multivariable.

✓ Se conformó el modelo matemático dinámico del drenaje de las aguas de los pozos del Metro de Caracas quedando éste conformado por 5 ecuaciones diferenciales no lineales, que describen su comportamiento dinámico.

✓ Se realizó la simulación del modelo matemático propuesto en lazo abierto, determinándose los acoplamientos existentes entre las variables (Flujo de sustancias químicas con el pH a la salida) y (Flujo de salida de la bomba con nivel de pozo), así como el grado de influencia de las variables de entrada (manipuladas y perturbaciones) sobre las controladas o de salida, quedando conformada la matriz de funciones de transferencia del proceso.

✓ Fueron propuestas a partir del modelo simulado a lazo abierto del sistema investigado, las técnicas de Control PID Multilazo y la de Control Multivariable con Desacoplamiento (estático).

✓ Se realizó una valoración económica, partiendo del costo si la investigación fuera realizada por un equipo de especialistas. Se valoró el impacto ambiental que tendría la investigación si se implementara y se analizó el social.



Recomendaciones:

En la presente investigación se proponen las siguientes recomendaciones:

- ✓ Realizar un estudio detallado de las sustancias químicas que pudieran afectar el sistema a fin de ajustar el modelo para el caso específico donde se desee implementarlo.
- ✓ Realizar un enlace entre los 61 pozos a un solo panel de control de forma tan que se tenga un único monitoreo de todos los pozos.
- ✓ Aplicar el Control Multivariable con Desacoplamiento estático como algoritmo, para el sistema de bombeo de las aguas en los pozos del metro de Caracas, lo que garantiza estabilidad en las variables del sistema.
- ✓ Emplear el sistema diseñado como laboratorio virtual para la enseñanza de pregrado y posgrado.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Aróstegui, J. M. y otros.: Metodología del Conocimiento Científico. La Habana: Editorial de Ciencias Sociales, 1978. 445 p.
2. Basualdo, M.S.; Marchetti, J.L.: Tuning Method for Interactive Multiloop IMC, PI and PID Controllers. Chem. Eng. Commun. 1990. v.97. n.47.
3. Biakowski, W. L.: Dreams Versus Reality: A view from Both Sides of the Gap. Pulp Pap. Canada, 1993. v.94. n.11. 1986. n.3.
4. Bristol, E.H.: On a New Measure of Interations for Multivariable Process Control, IEEE Trans. Aut. Control AC-11, 1966, p.133.
5. Cameron, F.; Seborg, D. E.: A Self-tuning Controller with a PID Structure. International Journal of Control. 1983. v.38, n.2, p.401-417,
6. Clarke, D. W.; Gawthrop, P. J.: Implementation and Applications of Microprocessor-based Self-tuners. Automatica, 1981.v.17, n.1, p.233-244.
7. Chiu, M.S.; Arkun, Y.: A Methodology for Sequential Design of Robust Decentralized Control Systems. Automatica, 1992. v. 28, p.997.
8. Deshpande, P. B.: "Multivariable Process Control". North Carolina, Instrument Society of America, 1989.
9. Ekblad, M. K., Curtis, E. F.: Multi-input Multi-output Generic Non-interacting Controller. Oakleaf Engineering, Inc. Patente Nro 5920478, EEUU, 1999.
10. Ender, D. B.: Process Control performance: Not as Good as You Think. Control Eng. 1993. 40, p.180-190.

Tema: *Estudio Preliminar para el Control del Sistema de Drenaje de los Pozos del Metro de Caracas.*

Tutor: Dr. C. Daniel Guzmán del Río

Autor: Kelvin Maikel Iserns Proenza.
2007-2008

REFERENCIA BIBLIOGRAFICA.

11. Gagnepain, J. P.; Seborg, D. E.: Analysis of Process Interactions With Applications to Multiloop Control System Design, IEC Process. Des. Dev. 1982. 21, 5.
12. Guzmán, D., Méndez, E.: Propuesta de Instrumentación para el Proceso de Lixiviación Carbonato Amoniaca de los Minerales Niquelíferos. Moa, Cuba, Instituto Superior Minero-Metalúrgico, Informe Técnico. 1995.
13. Guzmán, D.: Modelagem matemática e Controle multivariável do Tanque de Contato empregado no processo de lixiviação dos minerais níquelíferos.. Disertación de maestría. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 160p. 1999. (en idioma portugués)
14. 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 Sao Paulo, Brasil, 1999. (en idioma portugués).
15. Guzmán, D.: Sobre la Modelación Matemática del Proceso de Lixiviación Carbonato Amoniaca de los Minerales Niquelíferos. Memorias del II Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales. Sao Paulo, Octubre de 1997, Brasil.
16. Hansen, P. D.; Badavas, P. C.: Multivariable Nonlinear Process Controller. The Foxboro Company, Patente Nro 5570282, EEUU, 1996.
17. Harold, L...: Inverted Decoupling: A neglected Technique. Wades Associates, Inc. ACOS Newsletter, 1997. ISA.
18. Hurtado, F. G.: Estudio de la Influencia en el Medio Ambiente del Sistema de Generación de la Empresa del Níquel Ernesto Che Guevara y el Sistema de Transmisión Eléctrico Adyacente. ISMM, 1999. 120p. Disertación (Doctor en Ciencias Ambientales) - Universidad Central de Las Villas.
19. 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.
20. Hwang, S. H.: Closed Loop Automatic Tuning of Single-Input/Single-Output Systems. Ind. Eng. Chem. Res., n.34, p. 2406, 1995.

Tema: *Estudio Preliminar para el Control del Sistema de Drenaje de los Pozos del Metro de Caracas.*

Tutor: Dr. C. Daniel Guzmán del Río

Autor: Kelvin Maikel Iserns Proenza.
2007-2008

REFERENCIA BIBLIOGRAFICA.

21. Hwang, S. H.: Geometric Interpretation and Measures of Dynamic Interactions in Multivariable Control Systems. Ind. Eng. Chem. Res., n.34, p.225, 1995.
22. Ikeda, I.: Automatic Adjustment Method of Controller for Multiplex Loop Control. Toshiba Corporation, Patente Nro JP 08286707 19961101, Japón, 1996.
23. Kirchberg, K. H.: Method for Adjusting the Parameters of a PI or a PID Controller. Siemens Aktiengesellschaft, Patente Nro EP 0704776 A1 19960403, Europa, 1996.
24. Kordon, A.; Dhurjati, P.S.; Fuentes, Y.O.; Ogunnaike, B.A.; An Intelligent Parallel Control System Structure for Plants with Multiple Operating Regimes. Journal of Process Control, V.9, n. 5, p. 453-460. 1999.
25. Loh, A. P. y otros.: Autotuning Multiloop Proportional Integral Controllers Using Relay Feedback. Ind. Eng. Chem. Res. 32, 1102, 1993.
26. Louis M. Thompson: "El Suelo y su Fertilidad". Edición Revolucionaria, La Habana, [1967]
27. Lu, Z. J.; Mac, A. J. W. y otros.: Method and Apparatus for Multiple-input, Multiple output. Patente Nro 5758047, EEUU, 1998.
28. Lu, Zhuxin J.: Nonlinear Multivariable Control System. Honeywell Inc., Patente Nro 5572420, EEUU, 1996.
29. Luyben, W. L.: A Simple Method for Tuning SISO Controllers in Multivariable System. Distillation Decoupling. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., n.25, 1986.
30. Maciejowski, J. M.: "Multivariable Feedback Design". Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
31. 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.
32. Mathur, A.; Samad, T.: Method for Developing a Neural Network Tool for Process Identification. Honeywell Inc. Patente Nro 5924086, EEUU, 1999.
33. McAvoy, T. J.: Interaction Analysis, Principles and Applications. Instrument Society of America, North Carolina, 1983.

Tema: *Estudio Preliminar para el Control del Sistema de Drenaje de los Pozos del Metro de Caracas.*

Tutor: Dr. C. Daniel Guzmán del Río

Autor: Kelvin Maikel Iserns Proenza.
2007-2008

REFERENCIA BIBLIOGRAFICA.

34. Mesarovich, M.: Fundamentación de la Teoría General de los Sistemas. Editorial MIR. URSS, pp. 422-436, 1996.
35. Murakami, K. Seborg, D. E.: Constrained Parameter Estimation with Applications to Blending Operations. Journal of Process Control, n. 10, p. 195-202. 2000
36. Niederlinski, A.: A Heuristic Approach to the Design of Linear Multivariable Interacting Control Systems. Automatica, 7, 1971. p. 691.
37. Nishikawa, Y. y otros.: A method for Auto-tuning of PID Control Parameters. Automatica. 20, 321, 1984.
38. Ogunnaike, B. A.; Ray, W. H.: "Process Dynamics, Modeling and Control". New York, Oxford University Press, 1994.
39. O'Reilly, J.; Leithead, W. E.: Multivariable Control by Individual Channel Design. International Journal of Control, v.54, n.1, 1991.
40. Rosenbrock, H. H.: "Computer-Aided Control System Design". Academic Press, London, 1974.
41. Rosenbrock, H. H.: "State Space and Multivariable Theory". John Wiley & Sons, New York, 1970.
42. Seborg, D. E.: A Perspective on Advanced Strategies for Process Control. Modeling, Identification and Control, v.15, n.3, p 179-189, 1994.
43. Seborg, D. E.: A Perspective on Advanced Strategies for Process Control, Revisited. Process and Control,. 2000.
44. Seborg, D. E.; Edgar, T.F.; Mellichamp, D.A.: "Process Dynamics and Control". John Wiley & Sons. New York, 1989.
45. Shen, S. H.; Yu, C. C.: Use of Relay Feedback Test for Automatic Tuning of Multivariable Systems. AIChE Journal, 40,627, 1994.
46. Shing-Jia, S.; Shyh-Hong, H.: Sequential Design Method for Multivariable Decoupling and Multiloop PID Controllers. Ind. Eng. Chem. Res., n.37, p 107-119, 1998.
47. Shinzen, T.: Adjustment Method for PID Controller. Meidensha Corporation, Patente Nro JP 09034503 19970207, Japón, 1997.

Tema: *Estudio Preliminar para el Control del Sistema de Drenaje de los Pozos del Metro de Caracas.*

Tutor: Dr. C. Daniel Guzmán del Río

Autor: Kelvin Maikel Iserns Proenza.
2007-2008

REFERENCIA BIBLIOGRAFICA.

48. Smith, C. A.; Corripio, A. B.: "Principles and Practice of Automatic Process Control". New York, John Wiley & Sons, Inc, 1997.
49. Waller M.; Saxén, H.; On the Development of Predictive Models with Applications to a Metallurgical Process. Industrial & Engineering Chemistry Research, V. 39, Nro 2,, p. 982-988. 2000.
50. Waller, K. V.; Makila, P. M.: Chemical Reaction Invariants and Variants and their use in Reactor Modeling, Simulation and Control. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., n.20, p 1-11, 1981.
51. Waller, K.: Decoupling in Distillation, AIChE J., n.16, 198, 1970.
52. Wells, C. H.: A decoupling Controller for use with a Process Having two Input Variables and two Output Variables. Impact System, Inc., Patente Nro EP 0937814 A2 19990825, Europa, 1999.
53. Zanabria, O. A.: Modelamento, Simulação e Controle de um Processo de Neutralização de pH. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Eletrônica, Dissertação de Mestrado. São Paulo - SP, 1997. (en idioma portugués).

Tema: *Estudio Preliminar para el Control del Sistema de Drenaje de los Pozos del Metro de Caracas.*

Tutor: Dr. C. Daniel Guzmán del Río

Autor: Kelvin Maikel Iserns Proenza.
2007-2008