

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



## DISEÑO DE CONTROL PARA EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE SALMUERA UTILIZANDO MODELADO

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A  
GERARDO REYES ALDASORO

MEXICO, D. F.

1993

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## INDICE

INTRODUCCION .....	1
CAPITULO I	
EL pH Y SU USO EN PROCESOS INDUSTRIALES.....	4
1.1 Definición.....	4
1.2 La escala de pH.....	5
1.3 Procesos en los cuales se emplea la medición del pH.....	6
1.4 Aplicaciones futuras del control de pH. ....	12
CAPITULO II	
PRODUCCION INDUSTRIAL DE CLORO Y SOSA.....	14
2.1 Generalidades.....	14
2.2 Descripción del proceso de producción.....	15
2.3 Tratamiento de la salmuera.....	17
CAPITULO III	
INTRODUCCION AL CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES.....	21
3.1 Generalidades.....	21
3.2. Antecedentes históricos.....	21
3.3 Elementos fundamentales del control de procesos.....	22
3.4 Acciones de control.....	24
3.5 Estrategias de control.....	27
3.6 Estrategias de control avanzado.....	29
3.7 Un sistema de control de pH.....	30
CAPITULO IV	
DESARROLLO DEL MODELO, SIMULACION Y CONTROL .....	33
4.1 Caso de Estudio.....	33
4.2 Objetivos.....	34
4.3 Desarrollo del modelo.....	35
4.4 Estrategia de control propuesta.....	37
4.5 Simulación.....	40
4.6 Pruebas.....	46
4.7 Gráficas.....	49
CONCLUSIONES.....	64
BIBLIOGRAFIA.....	66
ANEXO	
LISTA COMPLETA DE PROGRAMAS.....	68

# DISEÑO DE CONTROL PARA EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE SALMUERA UTILIZANDO MODELADO

## INTRODUCCION

En la presente tesis se exponen los trabajos realizados para la simulación y control del proceso para el tratamiento de una corriente de salmuera. Este consiste en el ajuste de la variable pH hasta un valor cercano a 3.5 unidades. Después, la salmuera será conducida a un proceso electrolítico para obtener cloro y sosa cáustica. Ambas sustancias son necesarias para una gran variedad de procesos químicos y su producción se encuentra entre los primeros lugares, tanto en tonelaje como en valor de venta, en los países industrializados.

El tratamiento reviste una gran importancia aunque es sólo uno de una larga serie que culminará con la obtención de los productos finales. Una alimentación de salmuera que no cumple con las condiciones de pH establecidas, puede tener efectos graves sobre la eficiencia y seguridad del proceso.

Para lograr el control de la variable pH, se procedió primero a la elaboración de un modelo que simulará el proceso real.

Basándose en este modelo, se propone una estrategia de control cuya implementación se realizó en un paquete de simulación especial. La eficacia del control propuesto se verifica por medio de una serie de pruebas sobre el modelo, en estado estable e introduciendo una serie de perturbaciones al proceso normal.

Previamente a la discusión de los capítulos en donde se estudia con detalle el control y modelo de la salmuera, se presenta un breve marco teórico con la finalidad de dar un panorama general del tema tratado.

La tesis se desarrolla de la siguiente manera:

En el capítulo I, se hace una introducción al concepto de pH y se señala su importancia y su uso generalizado en una gran cantidad de procesos industriales.

En el capítulo II, se analiza el método industrial empleado para la producción de cloro y sosa cáustica, del que el proceso aquí estudiado constituye una parte.

En el capítulo III se presenta una semblanza del control de procesos, sus elementos y sus técnicas.

En el capítulo IV, se plantea el modelo, la forma de simular éste y la estrategia de control propuesta para el control de pH, misma que después será probada.

En el último apartado se expresan las conclusiones obtenidas.

El rápido desarrollo que han tenido las computadoras desde hace dos décadas, permite que cada vez sea más fácil realizar complicados trabajos numéricos en equipos de cómputo pequeños. Constantemente crecen las aplicaciones en donde antes de realizar desembolsos para instalar equipos y evitar pérdidas de tiempo, se pueden hacer simulaciones para saber cómo va a funcionar la instalación. El desempeño obtenido permite evaluar de antemano y a una fracción del costo y tiempo una serie de decisiones importantes para el posterior desarrollo de un proyecto.

Lo mencionado anteriormente constituye uno de los objetivos generales de esta tesis. Aunque las técnicas propuestas se desarrollan para un proceso, modelo y control específicos, éstas pueden ser copiadas y adaptadas para una

gran variedad de procesos. Al realizar mediante un modelo y simulación una serie de pruebas bajo condiciones controladas, se simplifica en gran medida la implantación real de un proceso industrial.

Por otro lado, otro objetivo perseguido es dar a conocer las técnicas de control moderno y que éstas sean asimiladas y puestas en práctica por los industriales mexicanos. El control automático de procesos ha tenido un rápido desarrollo paralelo con el de las computadoras, que permite hoy en día obtener un mayor dominio sobre los procesos con los que se logra mejorar la calidad y la productividad, que son las mejores armas con la que se deben enfrentar los retos que presenta el entorno del México actual.

## CAPITULO I

### EL pH Y SU USO EN PROCESOS INDUSTRIALES.

#### 1.1 Definición.

El pH de una sustancia es una medida de su acidez, de la misma manera que un grado centígrado es una medida de la temperatura. El pH, se define en términos de la actividad del ión hidrógeno, a:

$$\text{pH} = -\log_{10} a_{\text{H}^+}$$

La letra "p", proviene de la palabra potencia, mientras que la "H", proviene del símbolo del elemento Hidrógeno.

La actividad es la concentración efectiva del ión hidrógeno que se encuentra presente en una solución. Se define como la relación de la concentración ( $C_{\text{H}^+}$ , molalidad) y el coeficiente de actividad  $\gamma_{\text{H}^+}$ :

$$a_{\text{H}^+} = \gamma_{\text{H}^+} C_{\text{H}^+}$$

La diferencia entre una concentración efectiva y la concentración real disminuye entre más diluida sea una solución en la cual las interacciones iónicas se vuelven progresivamente menos importantes.

Si el coeficiente de actividad es igual a la unidad, entonces, la actividad es igual a la concentración. En realidad, hay varios factores que influyen principalmente en el coeficiente de actividad y son: la temperatura, la fuerza iónica, la constante dieléctrica, la carga del ión, el tamaño del ión y la densidad del disolvente. Los factores anteriores son características de la solución que

relacionan a la actividad con la concentración por medio de dos efectos principales, el efecto salino y el efecto medio, éstos representan principalmente los efectos que tienen la fuerza iónica y la influencia del disolvente respectivamente.

A lo largo de esta tesis se asume que  $\gamma=1$  debido a que, por una parte, a nivel de operación industrial es complicado monitorear todos los parámetros que afectan al coeficiente y además, esto simplifica en gran medida los cálculos computacionales efectuados en la última parte de este trabajo.

## 1.2 La escala de pH.

La escala de pH se estableció para proveer una manera conveniente y efectiva de medición con relación a la acidez o basicidad de una solución particular.

La magnitud de la actividad de los protones varía en un amplio intervalo. Por ejemplo en un ácido fuerte la molalidad del protón es aproximadamente 1 mol kg<sup>-1</sup>, mientras que en la presencia de una base muy fuerte tenemos que la molalidad desciende hasta 10<sup>-14</sup> mol kg<sup>-1</sup>. La escala de pH redujo esta extensión tan amplia a un intervalo que va del cero al 14, mucho más manejable. El rango está fundamentado en la constante de disociación para el agua  $K_w$ . ( $K_w = 10^{-14}$  a 22°C ). En agua pura las concentraciones del ión hidrógeno ( $H^+$ ) y el ion hidroxilo ( $OH^-$ ) son iguales a  $10^{-7}$  a 25 grados centígrados. Esta es una solución neutra, con pH=7. Debido a que la mayoría de los ejemplos que se encuentran en la práctica tienen una concentración menor a 1 Molar de  $H^+$  o  $OH^-$ , se establecen los valores de pH entre 0 y 14. En casos de los ácidos o bases fuertes, valores de pH menores a 0 o mayores de 14 son posibles, pero no frecuentes.



### **1.3 Procesos en los cuales se emplea la medición del pH.**

La gran mayoría de los procesos industriales o biológicos tienen como elemento fundamental el agua, ya sea como elemento reaccionante o como medio de proceso. En estos procesos la importancia de una medición y control del pH se relaciona con el indicador que esta variable presenta sobre el estado que guarda un proceso, el grado de avance de una reacción o la eficiencia alcanzada.

A continuación se expone una lista de las industrias en cuyos procesos es frecuente el monitoreo del pH. Así, se ilustra la importancia que un control adecuado de estos procesos, donde se involucra esta variable, tiene para aumentar la productividad y mejorar la calidad.

#### **1.3.1 Industria de alimentos y bebidas.**

A continuación se exponen varios ejemplos concretos en industrias de este sector:

##### **1.3.1.1 Horneado.**

En la industria panificadora factores importantes como la textura, el color y es sabor dependen en gran medida del pH de la masa usada. El pH determina la actividad de la levadura incorporada a la masa. Además un valor correcto de pH ayuda en la producción del dióxido de carbono que produce la "porosidad" y ligereza. También ayuda en la conversión de almidones en la masa a azúcares y que es máxima en un valor de 4.8 unidades de pH.

Podemos ver que para determinar la calidad del producto esta relacionado con el nivel de pH usado que puede estar en un rango de 4.8 a 8 unidades de acidez.

### 1.3.1.2 Industria Cervecera.

La producción de cerveza es un proceso complejo, en el que el control del pH en cada etapa de la producción es necesario para poder obtener un producto final satisfactorio. Hay etapas que involucran la conversión de almidones en la malta hasta azúcares fermentables, principalmente maltosa. Además proteínas en la malta son desdobladas en sustancias más sencillas de las que se alimenta la levadura. Varios tipos de enzimas son responsables de esto. Cada una tiene un grado óptimo de pH para su mejor funcionamiento. En la práctica se busca el grado que funcione mejor para todas y que es de aproximadamente 5.3 unidades.

### 1.3.1.3 Industria Lechera.

La leche fresca tiene un pH ligeramente ácido de 6.5 o 6.6. Sin embargo, el grado puede oscilar desde 6 hasta 7.7 unidades. Una medición anormal en el pH indica algún problema. Por ejemplo, la leche puede contener suero sanguíneo por haber sido ordeñada de ubres infectadas.

### 1.3.2 Agricultura.

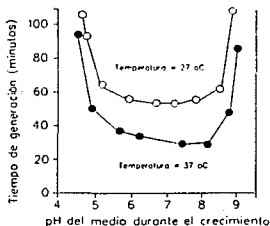
El control del acidez del suelo es un elemento indispensable para el óptimo crecimiento de las plantas. Un suelo adecuado debe tener condiciones físicas correctas, un balance adecuado de sustancias químicas y es necesaria también una actividad bacteriana. Todos estos factores están influenciados por el pH de la tierra. La acidez actúa sobre la disponibilidad de fósforo en el suelo, el funcionamiento adecuado de las bacterias que fijan el nitrógeno y la posibilidad de enfermedades a la planta.

Además, cada especie de plantas tiene un rango de pH adecuado para su mejor crecimiento. Por ejemplo los pastos finos, crecen mejor en suelos que son muy ácidos para pastos gruesos y arbustos.

La acidez del suelo se puede alterar añadiendo algunos productos químicos. El sulfato de amonio reduce el pH del suelo, mientras que la cal lo incrementa. Esto es importante ya que los suelos pueden tener valores de pH que oscilen entre 3.5 unidades (generalmente en regiones de gran precipitación pluvial ) hasta un valor de 10 (en climas más áridos).

### 1.3.3 Bacteriología.

Todos los microorganismos dependen para su correcto metabolismo y desarrollo de un ajuste preciso del pH en el medio. Cada organismo tiene un pH particular preferido, dependiendo de si son bacterias, levaduras u hongos. También es posible identificar y purificar variedades particulares de diversos organismos por medio del control del pH. A manera de ejemplo, donde se demuestra la influencia del pH en el tiempo de crecimiento de la bacteria *Escherichia coli*. se presenta la siguiente grafica:<sup>1</sup>



### 1.3.4 Químicos.

El control del pH para la manufactura de productos químicos se está extendiendo rápidamente, principalmente en procesos que involucran la

<sup>1</sup>Para más información véase Stephenson Marjorie. *Bacterial Metabolism* Longmans, Green and Co. London 1968. cap XI.

producción de sales. Por ejemplo, para tener control sobre que tipo de sal se esta formando en los procesos de manufactura de los fosfatos (ácida o diácida); También para la separación de numerosas impurezas de las sales, por ejemplo sulfato de fierro de sulfato de cobre. En estos casos se pueden lograr por una regulación adecuada de pH.

#### 1.3.5 Recubrimientos electrolíticos.

Aunque el proceso de recubrimiento electrolítico puede parecer sencillo, hay dos variables cuyo control es muy importante. La primera es un valor adecuado de la corriente eléctrica. La segunda es que el recubrimiento correcto de metal no se logrará si las soluciones salinas no son de la concentración y acidez adecuadas. La diferencia de potencial eléctrico va a estar determinada por la ley de Ohm en la cual la solución salina actúa como elemento resistivo.

#### 1.3.6 Medicina

Como consecuencia de los procesos metabólicos normales, se producen en el cuerpo constantemente sustancias ácidas. El ácido carbónico es el que se produce en mayor cantidad, aunque también existe una continua formación de ácido láctico y de cetoácidos. Esta continua producción requiere la existencia de sistemas, por medio de los cuales pueda eliminarse el ión hidrógeno, sin que se produzcan grandes cambios en el pH de la sangre. Estos sistemas son los sanguíneos, los del aparato respiratorio y el riñón.

Cualquier cambio en los valores normales del pH, es un importante indicador del estado corporal y puede indicar un mal funcionamiento que el patólogo o el médico pueden interpretar.

El valor del pH sanguíneo debe de estar en un rango de 7.35 a 7.45 unidades. El límite inferior compatible con la vida es del orden de 6.8, mientras

que el límite superior es de 8. En ambos casos, la situación solamente puede mantenerse durante periodos cortos de tiempo inferiores a algunas horas.

En el caso del pH de la orina, los riñones al intentar ajustar la concentración de iones hidrógeno forman orina con un pH que puede oscilar desde 4.5 hasta valores superiores a 8. Sin embargo, el pH promedio en la orina se sitúa en torno a 6 unidades.<sup>2</sup>

### 1.3.7 Procesamiento de minerales.

La concentración de minerales por la técnica de la flotación diferencial, depende en gran medida de la concentración de los agentes agregados para permitir la separación de minerales útiles de la roca. La concentración óptima de estos agentes, se puede monitorear por cambios en el pH de la mezcla.

Ejemplos de este procesamiento es el método de la cianuración empleado para la obtención del oro y la plata que involucra tres reacciones sucesivas. En la primera se trata el mineral con cianuro de sodio, formándose un complejo del metal con el ion cianuro. Después se rompe este compuesto con sulfuro de sodio donde el metal precipita en forma de sulfuro. Finalmente este sulfuro se trata con una solución de hidróxido de sodio, obteniéndose el metal puro, y regenerándose el sulfuro de sodio cuando se trata con un exceso de sosa.<sup>3</sup>

### 1.3.8 Manufactura de papel.

El control del pH tiene gran importancia durante todo el proceso de producción, desde el agua de proceso, que puede ser reciclada, una vez llevada a un pH correcto, hasta el tratamiento final del papel. En esta industria, los

<sup>2</sup>Guyton, Arthur C. *Tratado de fisiología Médica* Interamericana-McGraw Hill. España 1992.  
Herrera Emilio. *Bioquímica* Nueva Editorial Interamericana México D.F. 1986.

<sup>3</sup>Bargalló Modesto. *Tratado de Química Inorgánica*. Ed. Porrúa México, 1972

diferentes procesos para la manufactura de la celulosa se agrupan inclusive en dos grandes grupos, los que emplean la tecnología ácida o aquellos que emplean el método alcalino. Ecológicamente ninguno de los procesos es recomendable ya que producen aguas residuales de proceso que deben ser tratadas antes de poder ser desechadas.

#### 1.3.9 Industria Farmacéutica.

Los fármacos frecuentemente son sustancias químicas bastante complicadas. Extraerlas, purificarlas y almacenarlas para que no se descompongan, son procesos difíciles en que el pH juega un papel importante. Por ejemplo, en la producción de la penicilina, se encontró rápidamente que ésta era ácida, soluble y estable en varios solventes orgánicos, pero sólo era estable en agua en un rango de pH entre 5 y 8 bajo la forma de una sal. Si el pH sale de estos límites la actividad antibacteriana de la sustancia se pierde.

#### 1.3.10 Industria textil y de teñido.

La sensibilidad de los materiales textiles a los cambios de pH, provee uno de los ejemplos más importantes del control y verificación adecuados del pH. Todos los procesos de manufactura deben de estar sujetos a condiciones específicas de pH. El agua es uno de las principales materias primas en el teñido húmedo y por esto, el pH del líquido debe ser medido ya que de otra manera se puede cambiar el tono del los productos teñidos.

En el teñido el grado de acidez o alcalinidad es tan importante, que hay literatura que trata exclusivamente de este aspecto. <sup>4</sup>

---

<sup>4</sup>Para mayor información consúltese Datye Keshav V. *Chemical Processing of Synthetic Fibers and Blends* John Wiley & Sons New York 1984.

### 1.3.11 Desechos industriales y tratamiento de aguas residuales.

Este tipo de desechos requiere un tratamiento cuidadoso. Generalmente, los líquidos son desechados a ríos o lagos pero para esto no deben estar ácidos o alcalinos. Esto se puede lograr agregando agentes neutralizantes o por dilución. Además materiales nocivos o dañinos se deben de extraer antes. Esto se realiza agregando agentes coagulantes o sedimentantes que tienen valores de pH en los cuales funcionan mejor. Por ejemplo el sulfato de aluminio es usando con frecuencia como un agente coagulante. En las industrias textiles funciona mejor en un rango de pH de 7.7 a 7.8, en las tenerías en un pH de 5.8 a 6 y en los desechos de las enlatadoras y cremerías de 4.6 a 4.8. <sup>5</sup>

### 1.4 Aplicaciones futuras del control de pH.

Las aplicaciones para un control efectivo del pH son muy variadas y están en constante aumento.

El número de aplicaciones en los campos bacteriológico y de fermentación, crecerá en los próximos años debido a que los productos bioquímicos superarán la fase de producción en el laboratorio y se producirán a nivel industrial.

---

<sup>5</sup>Shinskey F.G. *pH an pION Control in Process and Waste Streams*. John Wiley and Sons. New York 1973.

A continuación se enlista una tabla con las principales aplicaciones de la medición y control del pH.

Aplicación	Procesos y aspectos afectados por el pH
Bacteriología	Crecimiento de microorganismos y metabolismo
Repostería	Volumen de la masa, textura y color
Cervecería	Redimientos del extracto y azúcar durante el macerado
Enlatadora	Tiempo y temperatura de esterilización
Química	Impurezas y cristalización de sales
Limpiadores	Efectividad para remover pintura y barniz
Tintes	Rendimiento y uniformidad de semirreacciones
Fermentación	Tiempo de fermentación
Farmacéutica	Estabilidad, efectividad, reacciones del cuerpo
Pigmentos	Uniformidad de la composición en precipitaciones
Papel	Teñido, recubrimiento, tamaño y cargas
Azucarera	Inversión del azúcar y destrucción de la glucosa
Textil	Eficiencia de los procesos húmedos
Tratamiento Aguas	Procesos de suavizado y coagulación
Aguas desague	Tiempo de digestión, olores y espumamiento

tabla 1.1<sup>6</sup>

<sup>6</sup>Mcmillan K. Gregory *pH Control* Instrument Society of America 1984 pag. 10  
Webber M.A. *The Book of pH* George Newnes Ltd. London



## **CAPITULO II**

### **PRODUCCION INDUSTRIAL DE CLORO Y SOSA.**

#### **2.1 Generalidades.**

Desde finales del siglo XIX, se desarrollaron procesos para la producción de cloro y sosa mediante la electrólisis de la salmuera, impulsados principalmente por el desarrollo del dínamo eléctrico y la mejora en los procesos de producción de grafito.

Los dos principales métodos desarrollados a partir de los cuales se produce prácticamente todo el cloro y sosa en el mundo son:

- El proceso de celdas de diafragma.
- El proceso de celdas de mercurio.

Aunque existen procesos para producir el cloro y la sosa cáustica independientemente, éstos son relativamente poco importantes comparados con los procesos electrolíticos que los producen como coproductos.

Generalmente, la producción se ve regulada por la facilidad que se tenga para colocar ambos productos en el mercado.

En la mayoría de los casos, el cloro, es el producto que define las tasas de producción debido a su dificultad en el almacenaje y su potencial de mercado.

En México, la mayoría de las plantas para producir cloro y sosa electrolíticamente operan bajo el método de celdas de mercurio, debido a que el país es un importante productor de mercurio y a que, hasta finales de los años

setenta no existía mucha conciencia sobre los problemas de contaminación debido a este metal. Sin embargo debido a los graves problemas de polución identificados en Japón (Caso Minamata), así como en ríos de nuestro país se han modificado y puesto en vigor las leyes para contrarrestar la contaminación.

## 2.2 Descripción del proceso de producción.

La producción de cloro y sosa, por el método de celdas de mercurio, se describe con más detalle por ser el del caso de estudio de esta tesis, involucra dos ciclos: El ciclo de salmuera y el ciclo del mercurio, empleandose una celda para cada uno de estos procesos.

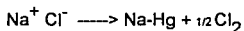
En el primer ciclo, una corriente de salmuera (cloruro de sodio al 35% en peso) previamente purificada y tratada fluye a través de un canal inclinado. En el fondo de éste se encuentra una capa delgada de mercurio, actuando como cátodo, que fluye junto con la salmuera.

Situado muy cerca al cátodo, se encuentra un ánodo consistente en bloques horizontales de grafito.

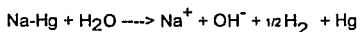
La corriente que fluye a través de la celda, descompone la salmuera que circula por el pequeño espacio entre los dos electrodos liberando así gas cloro en el ánodo y sodio metálico en el cátodo.

Las reacciones que ocurren en ambos ciclos se ilustran a continuación:

En el ciclo de la salmuera:



En el ciclo del mercurio:



El cloro gas, saturado con vapor de agua, se acumula sobre la construcción del ánodo y se descarga hacia un proceso de purificación, secado y licuefacción.

El sodio al tiempo que se va liberando en la superficie del cátodo de mercurio, forma inmediatamente una amalgama, que elimina las reacciones de éste con el agua presente en la salmuera y con el cloro disuelto. La amalgama formada en el cátodo presenta una concentración de 0.25 a 0.5% en peso.

En el segundo ciclo, la amalgama formada se alimenta a un reactor empacado con grafito, donde reacciona con agua alimentada a contracorriente ocurriendo una reacción entre el sodio y el agua, recuperandose el mercurio y obteniendose sosa cáustica que se concentra hasta un 50%.

A continuación se ilustra un esquema de la celda para descomposición de salmuera:

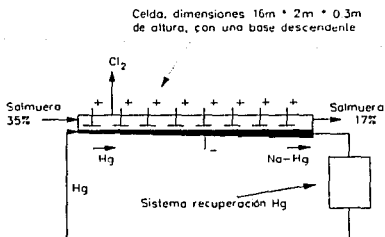


figura 2.17

## 2.3 Tratamiento de la salmuera.

La salmuera que entra a las celdas electrolíticas debe de ser tratada previamente, por importantes razones de seguridad y eficiencia del proceso. El objetivo principal consiste en evitar al máximo la formación de gas hidrógeno junto con el cloro que se forma en la celda, ya que se forma una mezcla explosiva cuando el contenido de este gas excede aproximadamente 4%. El gas durante la operación normal tiene una concentración de 0.3 a 0.5% de hidrógeno en el cloro.<sup>8</sup>

A continuación se describen las operaciones más importantes dentro del tratamiento, donde se observa el papel que juega el ajuste del pH.

### 2.3.1 Eliminación del cloro residual.

La salmuera recuperada de la celda es soplada con aire. Con esto se busca eliminar el cloro y el ácido hipocloroso presentes y evitar la formación de hipoclorito de sodio en las siguientes etapas. Este compuesto aumenta la dificultad para remover algunos elementos metálicos como el hierro y contribuye a un mayor consumo de grafito y formación de hidrógeno en la celda. Además si se intenta alimentar salmuera a la celdas y ésta no ha sido desclorinada adecuadamente se alargan los periodos de arranque del proceso. Después se ajusta el pH a un valor de entre 9 y 10.5 unidades.

### 2.3.2 Resalación.

Las celdas de mercurio, operan manteniendo una concentración del 21 al 22% en peso de concentración de sal en la salmuera que está siendo

---

<sup>8</sup> Baker J.E. *Startup and Operating Problems in Chlorine Plants*. Chem. Eng. Prog. vol 63 no 12

descargada de la celda, ésto corresponde a una descomposición del 15-16% de la sal en un pase por la celda.

Si no se restituye la sal, la continua descomposición de la salmuera, ocasiona un descenso en la conductividad y por ende de la eficiencia eléctrica.

Así, una gran porción o en algunos casos toda la salmuera se "resala" con sal sólida y se regresa a la alimentación de salmuera saturada.

### 2.3.3 Remoción de impurezas.

La sal empleada en la resaturación debe a su vez, ser tratada para remover las impurezas que ésta presenta. La principal causa de formación de hidrógeno proviene de las partículas extrañas en la sal.

El grado y tipo de purificación depende del nivel de elementos extraños y de las condiciones que para el proceso se hayan establecido.

La presencia de trazas de ciertos metales provoca que se forme hidrógeno sobre el cátodo en vez de sodio. La siguiente tabla expone los metales que son nocivos para el proceso.

Impurezas metálicas dañinas	
Vanadio	V
Molibdeno	Mo
Cromo	Cr
Titanio	Ti
Tántalo	Ta
Mangésio y Fierro	Mg y Fe

Tabla 2.1<sup>9</sup>

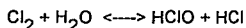
<sup>9</sup> Baker J. E *op cit* pag 49

La presencia de impurezas en la forma de sulfatos, tienen también un efecto en la eficiencia del proceso debido a que se puede provocar contaminación de oxígeno al cloro<sup>10</sup>. Es por esto que la salmuera se trata con cloruro de calcio para precipitar los sulfatos para después removerlos por precipitación y filtración.

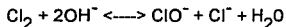
#### 2.3.4 Ajuste final del pH.

El pH final es ajustado antes de entrar a las celdas a un valor de entre 2.5 y 4.0, por las siguientes razones:

- En este valor de acidez, el sulfato de calcio residual no causa que un exceso de hidrógeno se produzca junto con el cloro durante la electrólisis.<sup>11</sup>
- Para evitar reacciones secundarias, ya que el cloro liberado en el ánodo se puede hidrolizar de acuerdo a:



Esto provocará la reacción de los ácidos si se presenta un exceso de alcalinidad en la salmuera, consumiéndose cloro. También algunos iones hidroxilo emigran del cátodo y reaccionan con el cloro de la siguiente manera:



Así, un nivel adecuado de pH tiene mucho que ver con el desempeño y seguridad del proceso.

---

<sup>10</sup>Pletcher, Derek op cit pag 91.

<sup>11</sup>Considine M. Douglas *Chemical and Process Technology Encyclopedia* McGraw Hill pag 275.

Un proceso como el descrito se puede ejemplificar por la siguiente ilustración:

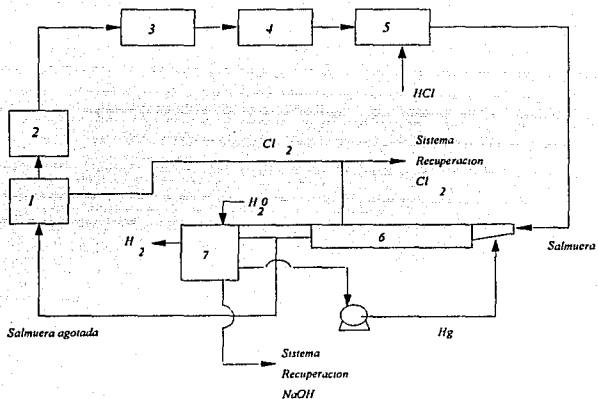


figura 2.2

donde:

1. Desclorinación de la salmuera.
2. Tratamiento químico.
3. Asentamiento de impurezas.
4. Filtración.
5. Ajuste de pH.
6. Primer ciclo. Electrólisis de la salmuera.
7. Segundo ciclo. Recuperación del mercurio y obtención de sosa cáustica.

## **CAPITULO III.**

### **INTRODUCCION AL CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES.**

#### **3.1 Generalidades.**

La mayoría de los procesos, ya sea que estén controlados manual o automáticamente, se desempeñan eficientemente sólo cuando están dentro de ciertos límites específicos. La función fundamental del control de procesos consiste en manipular las variables manteniéndolas dentro de ciertos parámetros preestablecidos e ideales para un proceso, es decir, lograr los mejores rendimientos, purezas o velocidades para una reacción y producto determinado.

#### **3.2. Antecedentes históricos.**

El control automático ha jugado un papel vital en el avance de la ingeniería ya que se ha convertido en parte muy importante de los procesos industriales modernos.

Antes de los años cuarenta, la mayoría de los procesos eran operados manualmente. Como consecuencia se requería la participación de un gran número de operadores observando el comportamiento de las variables de proceso y tomando acciones correctivas.

En los años cuarenta y principios de los cincuenta los requerimientos para un mejor desempeño del proceso y los equipos, exigieron el uso de dispositivos de control automático. Estos estaban constituidos fundamentalmente por controles retroalimentados, con un diseño puramente empírico y que prescindía de las características dinámicas del proceso.



Durante los años cincuentas y sesentas los esquemas de control en las plantas de proceso tuvieron algunos avances en la arquitectura de los sistemas de control, incluyendo en algunos casos una computadora como parte de estos.

En los años setenta, las técnicas de análisis dinámico y la teoría de control desarrolladas principalmente en la industria aeroespacial empezaron a aplicarse en los procesos industriales, además de que se usaron técnicas de control más complejas facilitándose todo esto considerablemente con dispositivos digitales, como los microprocesadores.

Actualmente gracias a la enorme disponibilidad de equipo digital de control y a los avances en teoría de control es posible implementar estrategias de control a prácticamente cualquier proceso industrial, lo que repercute directamente en un aumento de la calidad y la productividad en las plantas químicas, lo que hoy en día es de gran importancia para México.

### **3.3 Elementos fundamentales del control de procesos.**

El centro de un sistema automático es el controlador. Este se puede definir como un elemento de cálculo que mide el valor de una variable de proceso y ejecuta los pasos necesarios para limitar la desviación de esa variable de un punto de ajuste preestablecido (*setpoint*). Una variable de proceso que se mantiene dentro de ciertos límites se llama variable controlada. El controlador regula la variable controlada haciendo modificaciones en otra variable del proceso, llamada la variable manipulada.

El controlador reduce la diferencia entre la entrada y salida de un sistema aun con la presencia de perturbaciones, que son señales que tienden a afectar adversamente el valor de salida de un sistema. Si la perturbación es generada

dentro del sistema, se le llama perturbación interna, mientras que una perturbación externa se genera fuera del sistema.

La siguiente figura ilustra los elementos de un sistema de control típico:

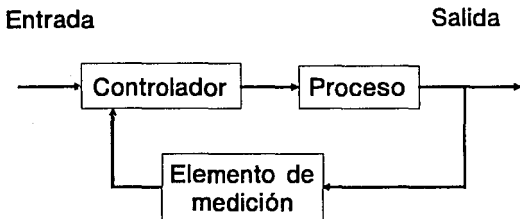


figura 3.1<sup>12</sup>

Los elementos son:

- Elemento medidor. Tiene la función de medir y evaluar una variable del proceso que se desea controlar. (temperatura, flujo, pH, etcétera.).

- Controlador. Elemento que incluye:

Detector de error. La función de comparar el valor medido de la variable de interés con el valor deseado, es realizada por esta unidad que produce una señal cuando hay una desviación entre ambos valores (medido y deseado). La señal producida, es llamada señal de control.

Amplificador. Generalmente, la señal de control tiene un valor muy pequeño, esta señal es amplificada para que después pueda operar un elemento final de control, por medio del cual se altere la variable de proceso.

<sup>12</sup> Ogata, Katsuhiko. *Ingeniería de Control Moderna*, Prentice Hall Hispanoamericana, pag.4

Elemento final de control. Este dispositivo modifica el valor de la variable manipulada para que con su efecto sobre el sistema se modifique el valor de la variable de proceso, un ejemplo estos dispositivos son las válvulas.

En un sistema de control de pH retroalimentado una vez que se mide el pH de salida se compara con el pH establecido como ideal y se calcula la cantidad de ácido que es necesario agregar en caso de haber una desviación, el cual es dosificado por medio de una válvula, el elemento final de control en este caso. Esta serie de mediciones, comparaciones, cálculos y correcciones se efectúan en un ciclo hasta lograr que se obtenga un valor de pH de salida y pH de *setpoint* igual.

### 3.4 Acciones de control.

Como ya se mencionó, un controlador automático compara el valor real de la salida de un sistema con el valor deseado, determina la desviación y genera una señal de control que reduce la diferencia a cero o a un valor pequeño. La forma en que el control automático genera la señal de control recibe el nombre de acción de control.

De acuerdo a su acción de control los controladores se pueden clasificar en:

#### 3.4.1 Control Integral.

En un control con acción integral, el valor de la salida del controlador  $M$  varía proporcionalmente a la integral de la señal del error  $E$ , es decir:

$$M = K_I \int E(t)dt$$

donde  $K_I$  es una constante regulable.

Aquí se puede observar que la relación en la que crece la señal de control y por tanto se mueve la válvula, es proporcional al error. El control integral responde tanto a la magnitud como al tiempo que dure la desviación.

Es importante notar que mientras exista una desviación, la corrección continúa. El controlador actúa hasta que se produce una corrección exacta para cualquier perturbación que se presente.

### 3.4.2 Control Proporcional.

En un control de acción proporcional, la relación entre la señal de control  $M$  y el error detectado  $E$  está dado por la relación:

$$M = K_p \cdot E$$

donde  $K_p$  se denomina ganancia proporcional y describe la relación que existe entre la entrada y salida de un dispositivo de control.

Se observa que hay una relación lineal entre el valor del error y el de la señal de control y por tanto del elemento final de control. En el caso de una válvula, esa se mueve en la misma proporción por cada unidad de desviación de la variable controlada del *setpoint*.

Sin embargo, la acción de control proporcional sólo responde a la magnitud de la desviación y no es sensible a la duración o velocidad de cambio de ésta.

Debido a la anterior, esta acción de control necesita un nuevo cambio en la magnitud de la perturbación para producir un cambio en la posición de la válvula. La respuesta proporcional de control solo puede producir una corrección exacta para una magnitud de perturbación, para cualquier otro cambio, siempre existe un error. Este error es llamado *offset* y es una característica inevitable de esta acción.

La única manera de eliminar la anterior desventaja consiste en cambiar el punto de ajuste del controlador proporcional, para de esta manera producir una nueva señal de error y un cambio en la válvula.

### 3.4.3 Control Proporcional e Integral (PI)

Las acciones de control mencionadas se pueden combinar obteniéndose de esta manera la combinación de sus ventajas. A continuación se amplía la explicación de este esquema que será posteriormente utilizada para el control del modelo.

La acción de control proporcional e integral queda definida por la siguiente ecuación.

$$M = K_p \cdot E + K_p / T_i \int E(t) dt$$

donde  $K_p$  representa la ganancia proporcional y  $T_i$  es el tiempo integral. Tanto  $K_p$  como  $T_i$  son regulables. El tiempo integral regula la acción de control integral, mientras que una modificación en  $K_p$  afecta tanto a la parte integral como a la proporcional de la acción de control.

Como se ha mencionado la acción de control integral tiene la ventaja de producir una corrección sobre la válvula de control hasta que ya no existe una desviación del punto de ajuste. Así, agregando la esta acción de control al control proporcional, se elimina la desventaja de éste al presentar el *offset*.

La calidad de regulación obtenida de los controladores automáticos depende en gran medida de el ajuste que se haya hecho de los parámetros de control.

### 3.5 Estrategias de control.

En muchos casos de control la estrategia sencilla de control retroalimentado, no da una respuesta satisfactoria, pudiendo no presentar un control con la estabilidad suficiente. En este caso se pueden emplear estrategias de control más elaboradas como son:

- Control cascada
- Control relación
- Control prealimentado

Un ejemplo concreto de un sistema en el que se emplean controles de este tipo lo encontramos en los sistemas de control de la combustión de los quemadores de una planta primaria de refinación. Aquí se necesita asegurar exactamente la relación entre el flujo de combustóleo y aire. Un control adecuado asegura por una parte, un importante ahorro de combustible y además un nivel mínimo de contaminación a la atmósfera

Estas estrategias son más complejas, a diferencia de los lazos de control retroalimentado donde una variable manipulada se controla a partir de una variable medida, pueden emplear dos señales de entrada que afectan la acción de una salida del control. Así, continuando con el ejemplo anterior, se podrían tener entradas por el flujo de aire, de combustóleo, su relación y además una entrada del analizador en línea de emisiones contaminates (en la chimenea).

#### 3.5.1 Control cascada:

En este tipo de control, la salida del controlador, se utiliza como *setpoint* de otro controlador. Cada controlador tiene su propia variable medida, el controlador primario tienen un *setpoint* independiente, siendo el controlador secundario el que manda una señal correctiva hacia el proceso.

Esta estrategia evita que la variable primaria (variable controlada) se vea afectada por los disturbios en la variable manipulada. También si se aplica en forma adecuada, es posible acelerar la respuesta del lazo de control y disminuir el efecto de algunas no-linealidades en el proceso.

### 3.5.2 Control de relación.

En este control, se mantiene una relación predeterminada entre dos variables. Cada controlador recibe su propia variable y manda una señal de salida a un elemento final de control. Los *setpoints* provienen de una señal maestra que es modificada para cada relación.

Una aplicación típica de este tipo de control se encuentra en los sistemas de control de combustión, donde la relación entre el flujo de combustible y el flujo de aire, es bien conocido.

### 3.5.3 Control Prealimentado.

En el control prealimentado, se utilizan mediciones de parámetros de entrada para ajustar las condiciones de proceso y de esta manera obtener unas condiciones de salida deseadas.

La característica principal de este control es que registra las perturbaciones que entran al proceso en el momento de producirse y realiza los ajustes en la variable manipulada para prevenir alteraciones en la variable controlada.

Si es posible medir la perturbación y transmitirla a un control, entonces este control actuará dando un valor apropiado a la variable manipulada anticipando la salida del elemento final de control. En el caso de que lo anterior se realice en forma apropiada, la variable controlada no se verá afectada por perturbaciones de carga.

### **3.6 Estrategias de control avanzado.**

#### **3.6.1 Control adaptivo.**

El control adaptivo se emplea en procesos en los que es difícil la identificación de los parámetros dinámicos de la planta, cuando los parámetros de proceso cambian significativamente con las diferentes características de operación o la ganancia del proceso cambia.

En estos casos, para obtener un control con una estabilidad adecuada es necesario establecer un controlador que identifique las características del proceso y ajuste automáticamente sus parámetros (ganancia, relaciones o tiempos) de manera que estos sean los más adecuados posibles a las características actuales del proceso.

El control adaptivo debe ser capaz además de discriminar entre oscilaciones cercanas al período natural del proceso y aquellas que son mucho más largas.

#### **3.6.2 Control multivariable.**

Muchos procesos tienen más de una variable de salida que puede ser controlada. Normalmente se puede escoger una variable de entrada para que controle una variable de salida y repetir esto para cada variable de salida. Sin embargo, hay casos en los que hay una interacción fuerte entre las variables de entrada y salida además de un número grande de éstas y en estos casos, se deben aplicar técnicas de control multivariable, donde se aplican métodos específicos para determinar el grado de interacción entre los lazos de control.



### 3.7 Un sistema de control de pH.

La siguiente figura muestra un sistema básico de control del pH que consiste en:

- Un juego de electrodos de pH.
- Un transmisor de pH.
- Un controlador automático.
- Una válvula de control.
- Un mezclador.

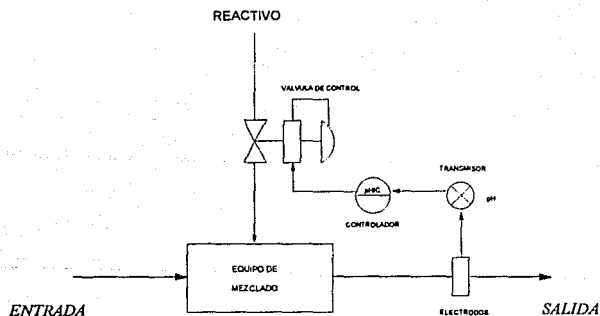


figura 3.2<sup>13</sup>

A continuación, se expone brevemente la función de cada uno de los equipos .

#### 3.7.1 Juego de electrodos:

La medición del pH se lleva a cabo por medio de un electrodo de vidrio, el elemento medidor. Este desarrolla un potencial que está relacionado

<sup>13</sup>McMillan K. Gregory *op. cit.* pag. 5.

directamente con la concentración del ión hidrógeno de la solución en la cual está sumergido y por tanto con el pH. Un segundo electrodo, llamado electrodo de referencia, es necesario para completar el circuito eléctrico, utilizándose también como un potencial constante, contra el cual se compara el potencial del electrodo de vidrio. El electrodo de plata-cloruro de plata es el electrodo de referencia más usado en la industria de procesos.<sup>14</sup>

A valores altos de pH, se puede presentar un error grande en la medición como resultado de muy bajas concentraciones de iones hidrógeno y muy altas concentraciones de iones metálicos, que en este caso actúan como iones hidrógeno. Este fenómeno se conoce como error de medición del ión sodio y se presenta en valores de  $\text{pH} > 10$  y concentraciones de sodio mayores a 1%.

### 3.7.2 Transmisor de pH.

Este es el dispositivo amplificador que convierte la diferencia de potencial en milivolts, producida por los electrodos en una señal en rango de 4-20 mA empleada como estándar en los sistemas de control.

### 3.7.3 Controlador.

La función del controlador es comparar el valor real de la salida del sistema de pH con el valor deseado como punto de ajuste, determinar la desviación y generar una señal de control sobre el elemento final del sistema que reduzca la diferencia a cero o a un valor pequeño.

---

<sup>14</sup>Shinsky, F.G. *op cit* pag.7

#### 3.7.4 Válvula de control.

La válvula de control, en este caso el elemento final del sistema, es dirigida por la señal de control y se abre o cierra, agregando una cantidad mayor o menor de ácido, cuya reacción provocará un cambio en las condiciones del pH y modificará el valor de salida del sistema.

#### 3.7.5 Mezcladora.

Su función principal es distribuir lo más rápidamente posible, todo el ácido agregado para que de esta manera se logre un mezclado lo más uniforme posible y la concentración sea la misma en todo el reactor.

## CAPITULO IV

### DESARROLLO DEL MODELO, SIMULACION Y CONTROL

#### 4.1 Caso de Estudio.

A continuación, se representa esquemáticamente el diagrama de flujo del sistema, por medio del cual se regula el pH de entrada a celdas electrolíticas del proceso de producción por celdas de mercurio.

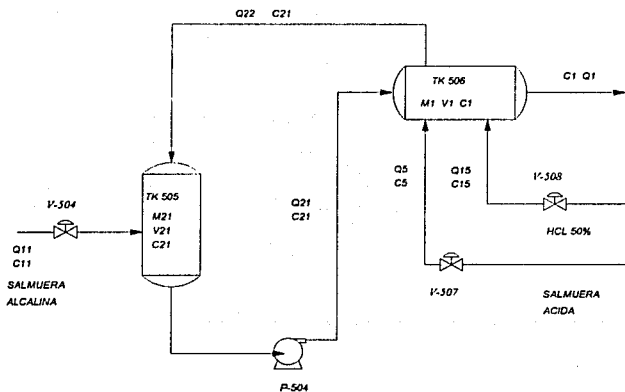


figura 4.1

Descripción: la salmuera alcalina (35% en peso de NaCl) es almacenada en el tanque 505 para después ser bombeada al tanque 506. En este tanque es donde la salmuera mediante la adición de salmuera ácida y ácido clorhídrico (Q5 y Q15, respectivamente) es llevada hasta un valor de pH de entre 3.5 y 4.5. Existe además una corriente de recirculación del tanque 506 al 505 para que el volumen del tanque 506 permanezca constante.

En la siguiente tabla se enlistan los valores normales durante el proceso de producción.

- flujo

corriente	Q21	Q22	Q1	Q11	Q15	Q5
flujo m <sup>3</sup> /hr	450	143.73	500.09	306.2	25	168.89

- pH

corriente	C21	C22	C1	C11	C15	C5
pH	10.76	3.5	3.5	11	2	3

#### 4.2 Objetivos.

Se persiguen los siguientes objetivos:

- Obtener un modelo que exprese adecuadamente el proceso.
- Realizar un sistema de control para mantener los valores de pH de la corriente de alimentación a celdas entre 3.5 y 4.5 manipulando la corriente de HCl.

Para alcanzar los objetivos mencionados se establecieron una serie de pasos :

- Desarrollo del modelo.
- Diseño de una estrategia de control.
- Simulación del modelo y la estrategia de control.
- Pruebas encaminadas a verificar el correcto funcionamiento del sistema.

### 4.3 Desarrollo del modelo.

En este inciso se realizan los balances de materia necesarios para obtener una descripción del proceso con base en ecuaciones diferenciales con cuya respuesta se pueda simular el proceso en una microcomputadora PC compatible.

#### 4.3.1 Consideraciones.

Para elaborar el modelo se hicieron las siguientes consideraciones:

1. El volumen del tanque TK 506 es constante.
2. El volumen del tanque TK 505 se controla pero no necesariamente permanece constante.
3. La concentración en el tanque TK 506 es la misma que la concentración en la corriente de alimentación a celdas.
4. Las alimentaciones de ácido clorhídrico y salmuera ácida son hechas en el tanque y no en la tubería como sucede en la planta.
5. El volumen que maneja la bomba P504 es igual al flujo de alimentación a celdas, más el flujo de recirculación por rebosamiento del tanque TK 506.
6. El tiempo de respuesta del sistema de control es prácticamente instantáneo.
7. La concentración de las soluciones no se ve alterada por el agua formada durante las reacciones.
8. El electrodo medidor de pH, se encuentra siempre calibrado y no necesita ajuste. Su medición es perfectamente confiable.
9. No existen otras perturbaciones tanto internas (con excepción de errores por tratamiento numérico en el momento de realizar la simulación), como externas aparte de las producidas durante las pruebas.

#### 4.3.2 Nomenclatura y Unidades.

Flujos en  $m^3/hr.$

Q1 = Flujo de salmuera a celdas.

Q11 = Flujo de salmuera alcalina.

Q15 = Flujo de ácido clorhídrico.

Q21 = Flujo de salmuera del tanque TK 505 al tanque TK 506.

Q22 = Flujo de salmuera del tanque TK 506 al tanque TK 505.

Q5 = Flujo de salmuera ácida.

Concentraciones en  $Kgmol/m^3$ .

La concentración se refiere al ión hidrógeno, en moles.

C1 = Concentración en salmuera a celdas, del tanque TK 506 y en salmuera que circula del tanque TK 506 al tanque TK 505.

C11 = Concentración en la salmuera alcalina.

C15 = Concentración en el ácido clorhídrico.

C21 = Concentración en el tanque TK 505 y en la salmuera del tanque TK 505 al tanque TK 506.

C5 = Concentración en la salmuera ácida.

Volúmenes en  $m^3$ .

V1 = Volumen del tanque TK 506.

V21 = Volumen del tanque TK 505.

Moles en Kgmol.

M1 = Moles en el tanque TK 506.

M21 = Moles en el tanque TK 505.

Tiempo en horas:

t = Tiempo.

#### 4.3.3. Desarrollo de las ecuaciones que representan el proceso.

A continuación se muestran las ecuaciones diferenciales que representan el proceso. Se obtuvieron ecuaciones por medio de las cuales se consigue la concentración de ion hidrógeno en ambos tanques, a partir de la cual se obtiene el pH. Además se establece el balance de materia de todo el sistema.

Para el desarrollo, se empleará la figura 4.1 y se establece la convención siguiente: aquello que entra al sistema es positivo y todo lo que sale tiene un signo negativo.

$$\frac{dV21}{dt} = Q11 + Q5 + Q15 - Q1$$

$$\frac{dC21}{dt} = \frac{Q11(C11 - C21) + (C1 - C21)(Q5 + Q15 + Q21 - Q1)}{V21}$$

$$\frac{dC1}{dt} = \frac{C5Q5 + C15Q15 + C21Q21 - C1(Q21 + Q5 + Q15)}{V1}$$

#### 4.4 Estrategia de control propuesta.

El siguiente diagrama, ilustra la estrategia de control que se considera necesaria para mantener la acidez cercana al objetivo de un pH de 3.5 para la corriente destinada a las celdas electrolíticas. La estrategia se basa en la manipulación de la corriente de ácido clorhídrico, Q15 y el control de nivel en el tanque TK 505.



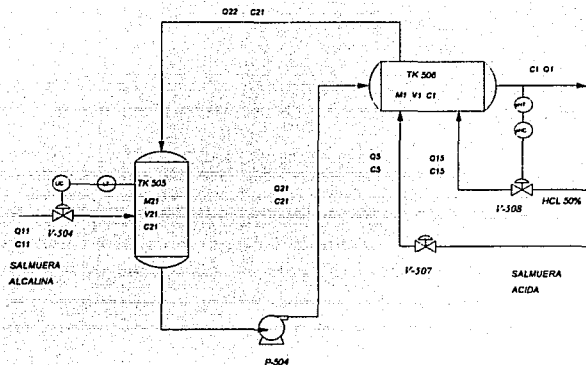


Figura 4.2

#### 4.4.1 Tanque 505.

En el tanque 505 se ilustra un control de flujo de entrada basado en el nivel que guarda el tanque. El primer lazo sencillo consiste en un medidor de la altura del líquido del tanque que entra como señal al controlador que recibe un valor de *setpoint* de 3.66 metros . En este caso la válvula V-504 se abre o cierra, según sea el caso permitiendo la entrada o no de salmuera alcalina.

#### 4.4.2 Tanque 506.

En este tanque, se sugiere el esquema de control por medio del cual se mide el valor de pH de la corriente de salida y con base en un punto de ajuste de 3.5 unidades preestablecido, se acciona la salida de la válvula de flujo de HCl, V-508.

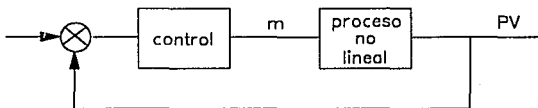
#### 4.4.3 Algoritmo de control.

El objetivo de los dos lazos de control propuestos es mantener al proceso dentro de las condiciones de estado estable determinados de antemano.

El control de pH presenta la característica especial de ser no lineal por causas de la curva de titulación ácido-base. Debido a esto, los sistemas de este tipo presentan una medición no lineal y una operación dentro de un intervalo amplio.

Esta propiedad puede ser problemática para el control del proceso ya que se tiene un sistema no lineal, la señal de salida no es proporcional a la señal de entrada. En un caso de control de pH, la variable de proceso depende de una función no lineal. Se puede desarrollar un control lineal, en forma de control proporcional-integral PI. Se puede desarrollar una función diferente a la no lineal de la cual depende la variable de proceso

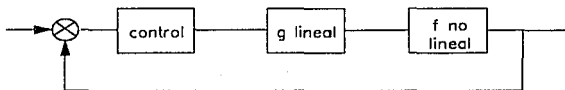
En forma de diagrama de bloques, queda de la siguiente manera:



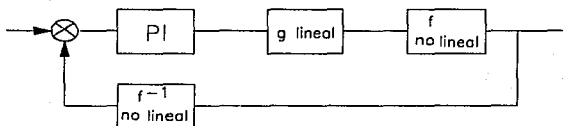
donde PV, la variable de proceso es igual a

$$PV = f_{no\ lineal}(g_{lineal}(m))$$

por tanto:



Si queremos un control lineal, proporcional-integral el diagrama es:



Donde la variable de proceso se ve controlada por la nueva variable  $f^{-1}$

## 4.5 Simulación.

### 4.5.1 Simulador.

Las ecuaciones y estrategias de control desarrolladas en la secciones anteriores y que representan el proceso, fueron empleadas para simular la operación mediante un programa comercial conocido como SIMNON, desarrollado por el Lund Institute of Technology de Suecia. Aunque estas ecuaciones se pudieron haber resuelto de otras maneras (resolviendo las ecuaciones diferenciales por medio de métodos numéricos como el Runge-Kutta de cuarto orden para después agrupar los resultados y graficarlos en una hoja de cálculo, por ejemplo), se escogió el simulador SIMNON por las grandes ventajas que presenta para la resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales, teniéndose un monitoreo exacto de cada una de las variables. Además, la presentación automática de los resultados en forma de gráficas facilita grandemente el análisis. La siguiente descripción se tomó directamente del manual del SIMNON:

"En este programa se simulan sistemas dinámicos, que pueden ser definidos como una interconexión de subsistemas, cuyo comportamiento puede ser descrito por ecuaciones diferenciales o en diferencias. Modelos de este tipo

son comunes en matemáticas, biología, economía y muchas ramas de la ingeniería. SIMNON tiene una implementación interactiva que facilita al operador trabajar con el sistema. El usuario interactúa con el sistema tecleando comandos. Los parámetros, condiciones iniciales y las descripciones del sistema se pueden modificar interactivamente. Los resultados se muestran como curvas en la pantalla." <sup>15</sup>

#### 4.5.2 Codificación de modelo.

##### 4.5.2.1 Ecuaciones de altura y pH.

Los valores de concentración obtenidos de las ecuaciones del modelo, se convierten a la variable pH por medio de las dos ecuaciones siguientes:

$$\text{pH} = -\log C$$
$$\text{pH} = \log (-C) + 14$$

La primera ecuación se utiliza para el caso de que la concentración sea positiva, es decir, se tenga un pH menor a 7. La segunda se usa en el caso de un valor en la escala de pH mayor a 7, caso de una base..

Para el caso de la altura, se emplea una ecuación que basada en las características geométricas del tanque obtiene el valor de la altura en función del volumen contenido. La ecuación es:

$$H_{21} = V_{21}/75 - 3$$

##### 4.5.2.2 Escalamiento.

Debido a que los valores de concentración empleados en la ecuación de pH son muy pequeños, se realizó un escalamiento lineal de éstos,

---

<sup>15</sup>Elmqvist Hilding, et. al. *SIMNON, User's guide for MS-DOS Computers* Department of Automatic Control Lund Institute of Technology, pag 17

multiplicándolos por un factor constante de 1000. Así, los valores de pH ya listados en el inciso 4.1 toman los siguientes valores de concentración:

corriente	C21	C22	C1	C11	C15	C5
concentración	-5.7943E-4	3.1622E-4	3.1622E-4	-1E-3	0.01	1E-3
escalada	-0.5794392	0.3162277	0.3162277	-1	-1E-3	1

El desescalamiento se realiza en el momento de obtener el valor de pH.

Ya que la salida y entrada del controlador sólo puede estar en el rango de 0 a 1 los valores que entran y salen de éste también deben de ser escalados. Para esto, se calcularon factores de escalamiento que consideraban los valores máximos y mínimos de cada una de las corrientes que salían del programa de simulación del proceso para entrar al programa de control o bien, que salían del programa de control para entrar al programa de simulación. También se deben de escalar los valores de *setpoint* que se introducen al controlador.

En la siguiente tabla se ilustran los valores que fueron escalados, sus valores máximos, considerándose éste como 100% y el factor de escalamiento empleado.

	Q15 (m3/hr)	Q11 (m3/hr)	pH1(unidad)	H21(metros)
valor normal	25	306.2	3.5	3.66
factor escalamiento	0.0203	0.2	7.1428	14.666
valor escalado	0.5099	61.24	25	53.677

#### 4.5.2.3 Programas del modelo.

Para lograr el modelo el programa SIMNON necesita tres tipo de subprogramas que actuando juntos realizan la simulación. Los tipos son:

- Programas que simulan el proceso.
- Programas de control.
- Programas conectores.

#### 4.5.2.4 Ejemplo de listados.

A continuación se exponen a manera de ejemplo algunos de los programas empleados en la simulación. El listado total de los programas empleados se expone en el anexo de esta tesis.

- Programa del proceso.

Primeramente se elaboró el programa principal, el programa del sistema continuo que incluye las ecuaciones desarrolladas en el apartado 4.3.3. Por medio de este programa se simula el estado estable. Este programa se incluye a continuación, así como algunos breves comentarios sobre su estructura y funcionamiento:

```
Continuos system tosiel
"sistema sin control
"simulacion de la tesis
" declaracion de las variables
state c21 v21 c1
der dc21 dv21 dc1
"ecuaciones que simulan el proceso
dc21=((q11*(c11-r21))+((c1-c21)*(q3+q15+q21)))/v21
dv21=(q11*(q5+q15)-q1)/v1
dc1=((c5+q3+c15*(q15+c21*q21)-(c1*(q21+q3+q15)))/v1
" ecuaciones necesarias para convertir a variables de pH y altura
ca: 0.0
cb:7
cc:14
ph:=if c1>ca then -log(c1/1000) else if c1<ca then log(-c1/1000)+cc else cb
h21=c21/75-3
"declaraci7n de variables iniciales
"nota los valores de concentracion estan escalados
q21:450
q22:143.7329305
q1:500.09
q11:306.2
q15:25
q5:160.09
v21:500
v1:100
c11:-1
c21:-.5794392367
c1: .316227766
c5:1
c15:10
c22:.316227766
end
```

En la primera parte del programa se hace la declaración de las variables usadas.

En la parte media se especifican las derivadas de las variables de estado y las ecuaciones auxiliares.

En la parte final se encuentra la declaración de todos los parámetros y valores iniciales, mismos que se exponen en la sección 4.1

- Programas de control y conectores.

Tomando como base el programa anterior, éste se modificó ligeramente para permitir la combinación de los programas de control y conectores. Se desarrollaron programas del proceso, de control y conectores para tres casos:

a - Control del pH de salida en la corriente Q1, únicamente.

b - Control del nivel del tanque 505, únicamente.

c - La combinación de las dos anteriores, control del pH y de nivel del tanque.

Los programas son similares entre sí, radicando las diferencias en las entradas y salidas de las variables que los conectan. Se ilustran a continuación los tres programas, comentados para facilitar su seguimiento, para el caso c, la combinación de ambos sistemas.

- Programa de Control.

```
DISCRETE SYSTEM comb2
"PI regulator para tesis
"combinacion altura y ph
"variables de entra y salida
input phasc stpoint
input altasc stepoint
output ql5asc
"declaración de variables
state i ij
uow ni nij
time t
tsamp ts
"obtencion del valor de error
e=phasc-stpoint
v=k*e+i
ql5asc-if v<ulow then ulow else if v<uhigh then v else uhigh
ni=i+k*eeh/ti+ql5asc-v
ts=t+h
ki.5
ti.005
hi0.01
ulow=0
uhigh=i
"equi va el controlador de altura
e=stepoint-altasc
b=hj*e+j
ql5asc-if b<ulow then ulow else if b<uhigh then b else uhigh
ni=i+kj*e+nj/tj+ql5asc-b
tj=t+hj
kj.5
tj.1
hj.01
end
```

## Programa del proceso.

```
Continuous system comb1
* combinaci?n de ambos sistemas
* simulaci?n de la toxic
* declaraci?n de variables
state c21 v21 c1
der dc21 dv21 dc1
!aqu? se hace la conexi?n con otros programas
output phesc altesc
input q15esc q15esc
*ecuaciones
dc21=(q11*(c11-c21)+(c1-c21)*(q3+q15+q21-q11))/(v21)
dv21=(q11+q5+q15-q11)
dc1=(c3+q3+c15+q15+c21*q21-c1*(q21+q3+q15))/v1
q15=(q15esc/203.998)*10000
q11=(q15esc/.2)*100
*obtenci?n del ph y altura y su respectivo escalamiento
ca: 0.0
cb:7
cc:14
ph:=if c1>ca then -log(c1/1000) else if c1<ca then log(-c1/1000)+cc else cb
phesc=(ph+.14206)/100
* ID anterior es el escalamiento del ph para entrada del controlador
h21=(v21)/75-3
altesc=(h21+4.6664)/100
*variables iniciales
q21:400
q22:103.7329305
q1:500.09
q5:168.09
v21:500
v1:100
c11:-1
c21:-.5794392367
C1:316227766
c5:1
c15:10
c22:316227766
end
```

## - Programa de conexi?n.

```
CONNECTING SYSTEM comb3
*Conecting system for p1rege and nafine
* combinaci?n de los dos sistemas
*conexi?n al sistema de ph
*ambos setpoints est?n escalados
time t
stpoint[p1rege]=.25
phesc[p1rege]=phesc[nafine]
q15esc[nafine]=q15esc[p1rege]
*connecting system for altura
stpoint[p1rege]=.537728
altesc[p1rege]=altesc[nafine]
q15esc[nafine]=q15esc[p1rege]
end
```



## 4.6 Pruebas.

### 4.6.1 Simulación en estado estable.

Objetivo: Observar la simulación del proceso en estado estable.

Acciones: Se corre el sistema en estado estable. Se elaboran las siguientes gráficas, que representan las variables importantes del proceso:

- pH contra tiempo.
- Entrada de salmuera alcalina, Q11 contra tiempo.
- Nivel en el tanque TK-505 contra tiempo.
- Flujo dosificador Q15 contra tiempo.

### 4.6.2 Simulaciones con perturbación.

A continuación se realizan una serie de pruebas específicas al sistema. En éstas se introducen una serie de señales que modifican el estado original en que se encuentra el sistema. El objetivo de estas perturbaciones es observar la respuesta de las estrategias de control establecidas y el funcionamiento adecuado del sistema.

#### 4.6.2.1 Prueba 1

Objetivo: Comprobar que el sistema es autoregulado a cambios en el flujo de salmuera ácida.

Acciones: Se procede a cambiar el valor de flujo de salmuera ácida con un aumento y disminución de 40% del valor normal.

Control empleado: Ninguno

Gráficas:

- pH contra tiempo
- Nivel del tanque 505 contra tiempo.

#### 4.6.2.2. Prueba 2

**Objetivo:** Comprobar la respuesta autorregulada del sistema a cambios en el pH de la corriente de salmuera alcalina, Q11.

**Acciones:** Se modifica el pH de la corriente de entrada hasta los valores de 12 y 10, en vez del valor normal de 11.

**Control empleado:** ninguno

**Gráficas:** Se elaboran las siguientes

- pH contra tiempo.

Para ambos casos de perturbación (pH con valor de diez y doce).

#### 4.6.2.3 Prueba 3

**Objetivo:** Determinar el funcionamiento del controlador PI para el pH sin que exista un control de nivel.

**Acciones:** Se introduce una perturbación del pH de la corriente Q5 de 50%, positiva y negativa, respecto al valor normal.

**Control empleado:** caso a, únicamente control de pH.

**Gráficas:**

- pH contra tiempo

- flujo de la variable manipulada, Q15.

#### 4.6.2.4 Prueba 4

**Objetivo:** Comprobar el funcionamiento del controlador PI para el nivel sin que exista control del pH.

**Acciones:** Se introduce una perturbación de pH de la corriente de Q5 de 50%, positiva y negativa respecto al valor normal.

**Control empleado:** caso b, control de nivel únicamente.

**Gráficas:**

- nivel contra tiempo.

- flujo de la variable manipulada Q11.

#### 4.6.2.5 Prueba 5

Objetivo: Determinar el funcionamiento del controlador PI para el pH y del controlador PI para el nivel.

Acciones: Se conectan ambos controladores y se introduce una perturbación, de Q5 de 50% del valor normal., variando tanto positiva como negativamente.

Control empleado: caso c, ambos controladores simultáneamente.

Graficas:

Estas son.

- pH contra tiempo.
- nivel del tanque 505 contra tiempo.
- flujo de la variable manipulada Q15 contra tiempo.
- flujo de la corriente de entrada Q11 contra el tiempo.

#### 4.6.2.6 Prueba 6

Objetivo: Comprobar la respuesta del controlador de pH con las perturbaciones en el pH de salmuera alcalina, Q11 y en el flujo Q5.

Acciones: Se introducen dos perturbaciones, la primera es la variación de Q11 (en 20%), la segunda es una variación del flujo de Q5 (en 50%).

Gráficas:

Control Empleado: caso a, controlado de pH.

- pH contra el tiempo.
- variable Q15 contra el tiempo.

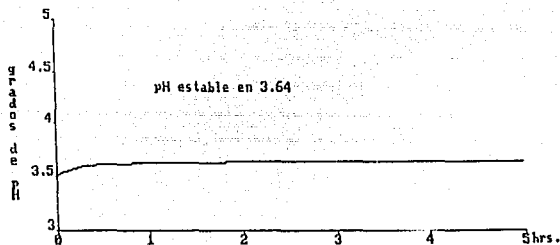
Para las combinaciones positivas y negativas de las variaciones.

#### 4.7 Gráficas.

##### 4.7.1 Simulación en estado estable.

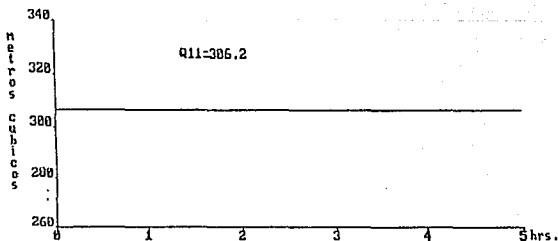
- pH contra tiempo.

92.10.11 - 10:47:06



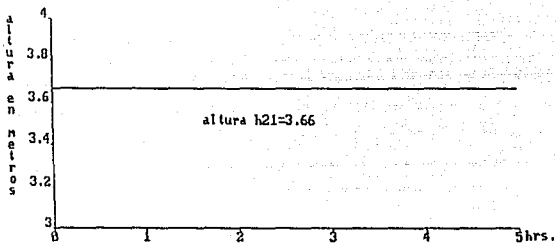
- Entrada de salmuera alcalina, Q11 contra tiempo.

92.10.11 - 19:05:20



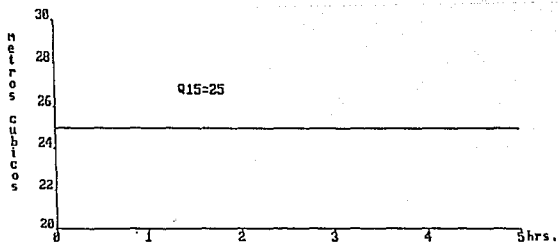
- Nivel en el tanque 505 contra tiempo.

92.10.11 - 19:08:51



- Flujo dosificador Q15 contra tiempo.

92.10.11 - 19:25:38

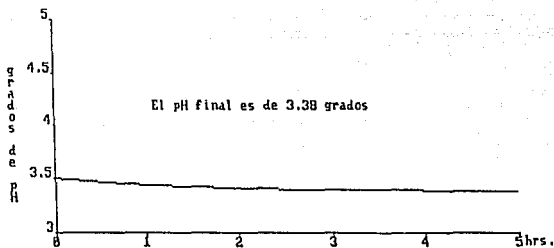


#### 4.7.2 Prueba 1

Para un aumento de Q5 de 40%

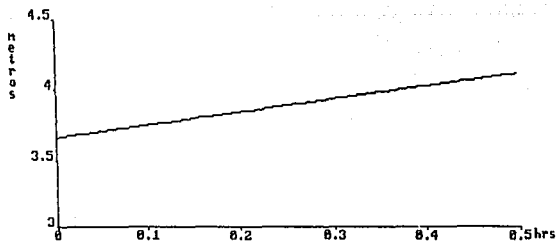
- pH contra tiempo.

92.10.11 - 19:44:13



- Altura en el tanque número 505 contra tiempo.

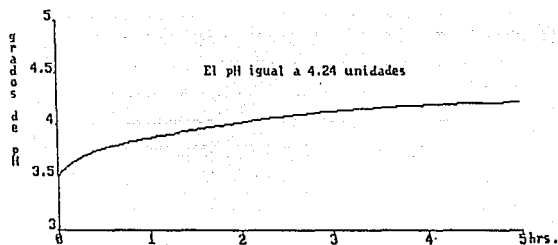
92.10.11 - 19:52:49



Para una disminución de 40% en el flujo de salmuera ácida.

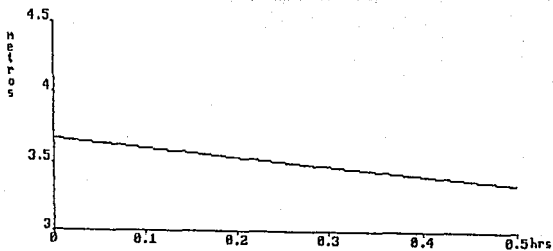
- pH contra tiempo.

92.10.11 - 19:46:42



- Nivel del tanque 505 contra tiempo.

92.10.11 - 19:50:42

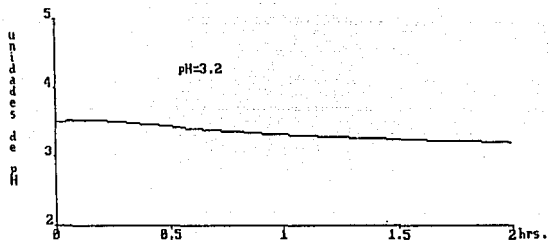


#### 4.7.3 Prueba 2

Modificación en el pH de entrada, tomando éste el valor de 10 unidades.

- pH contra tiempo.

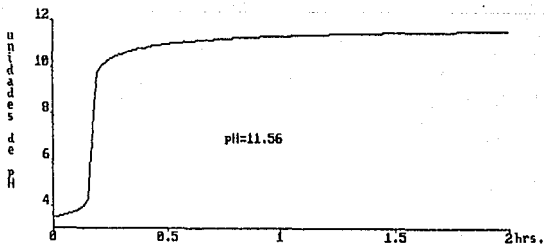
92.10.11 - 20:05:03



Con un valor de entrada de pH=12.

- pH contra tiempo.

92.10.11 - 20:07:57



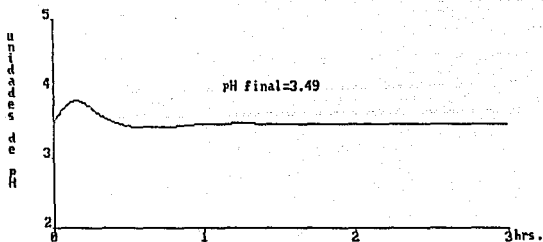


#### 4.7.4 Prueba 3.

Para una modificación en el pH de Q5 de 50%, positivo.

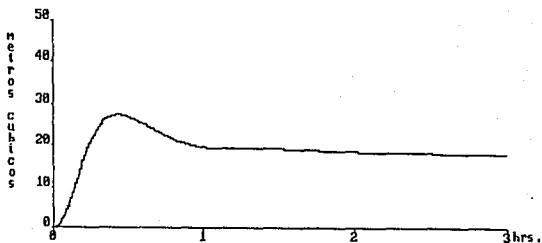
- pH contra tiempo.

92.10.11 - 20:19:00



- Flujo de Q15, la variable manipulada.

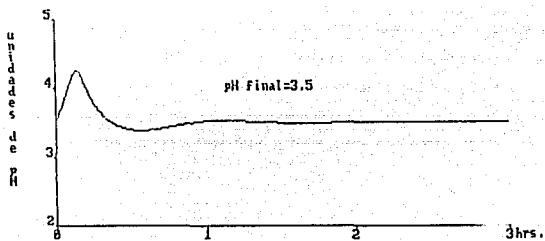
92.10.11 - 20:30:28



Para una desviación donde Q5 toma un valor 50% menor.

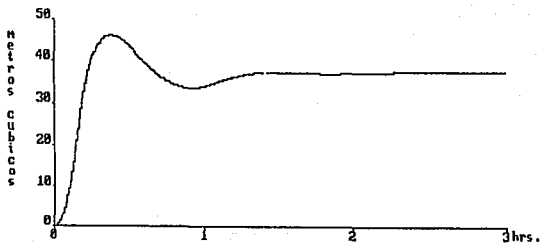
- pH contra tiempo.

92.10.11 - 20:21:34



- Flujo de la variable manipulada Q15.

92.10.11 - 20:28:23

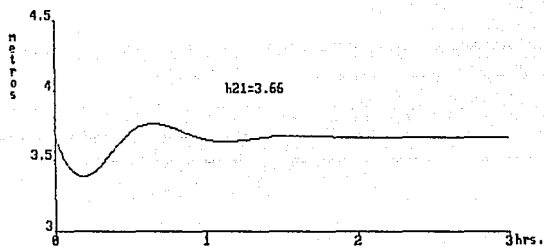


#### 4.7.5 Prueba 4

Para una perturbación en Q5 50% mayor al valor normal.

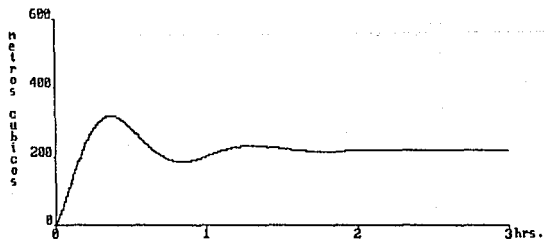
- nivel en el tanque contra tiempo.

92.10.11 - 21:02:30



- Flujo de la variable manipulada Q11.

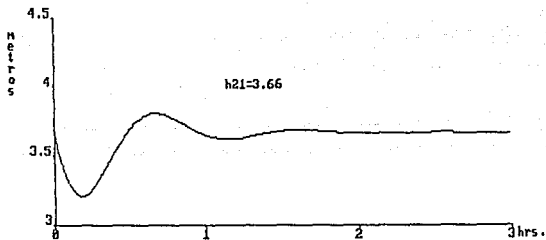
92.10.11 - 21:11:39



Para una variación de Q5, tomando ésta un valor 50% menor al valor normal.

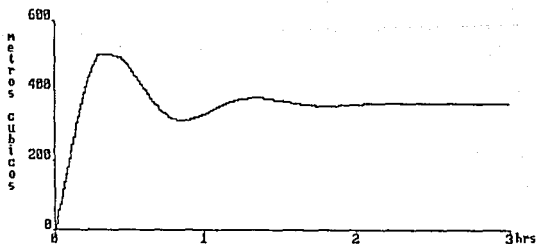
- Nivel en el tanque contra tiempo.

92.10.11 - 21:04:36



- Flujo de la variable manipulada Q11.

92.10.11 - 21:06:48

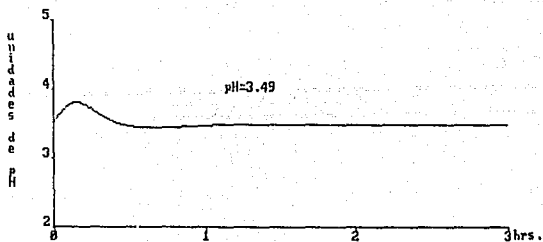


#### 4.7.6 Prueba 5.

Para una perturbación de Q5 50% mayor al valor normal.

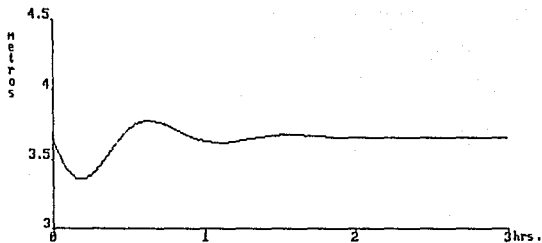
- pH contra tiempo.

92.10.11 - 21:42:12



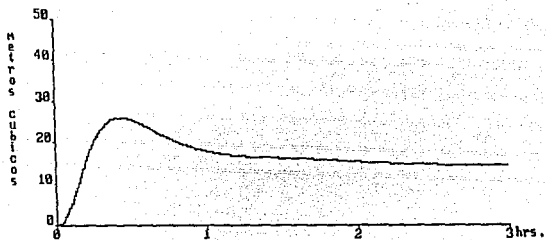
- Nivel del tanque 505 contra tiempo.

92.10.11 - 21:49:53



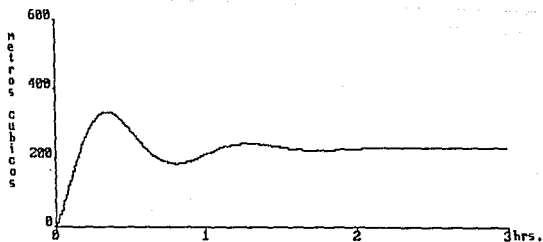
- Flujo de la variable manipulada Q15 contra tiempo.

92.10.11 - 21:52:47



- Flujo de la corriente de entrada, Q11, contra tiempo.

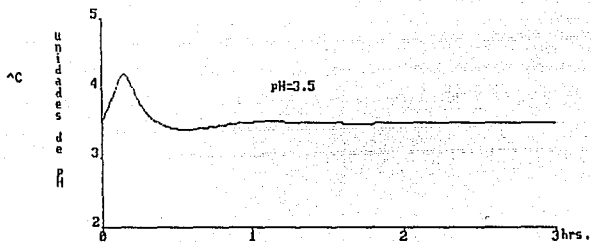
92.10.11 - 22:02:54



Para una perturbación de Q5 50% menor al valor normal.

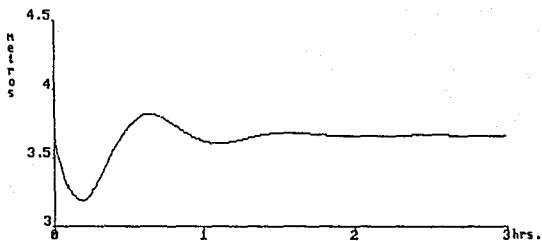
- pH contra tiempo.

92.10.11 - 21:45:14



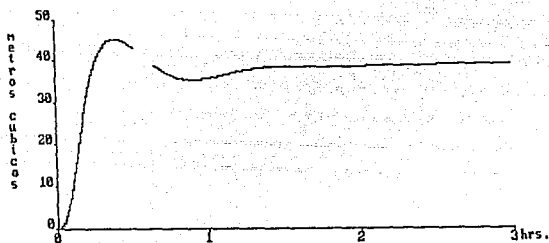
- Nivel del tanque 505 contra tiempo.

92.10.11 - 21:47:28



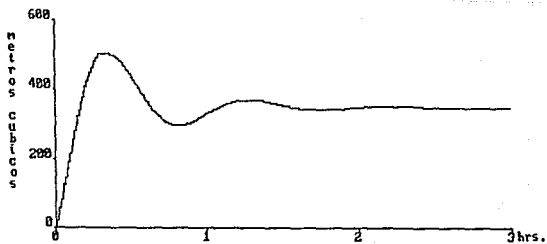
- Flujo de la variable manipulada Q15 contra tiempo.

92.10.11 - 21:56:36



- Flujo de la corriente de entrada, Q11, contra tiempo.

92.10.11 - 21:59:32



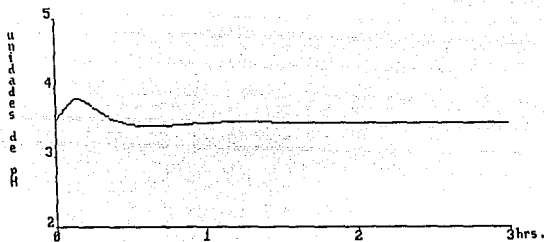


#### 4.7.7 Prueba 6.

Combinaciones positivas, variación de Q5 +50% y Q11 +20%

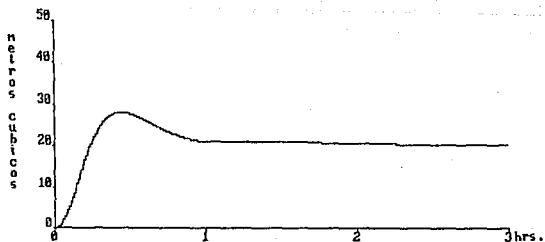
- pH contra tiempo.

92.10.11 - 22:22:32



- Variable Q15 contra tiempo.

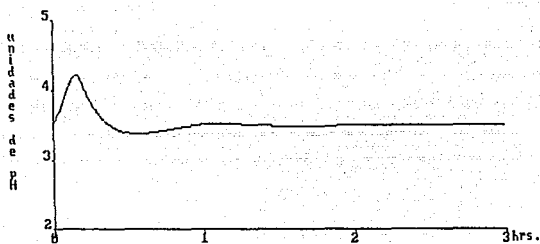
92.10.11 - 22:24:24



Combinaciones negativas, variación de Q5 -50% y Q11 -20%

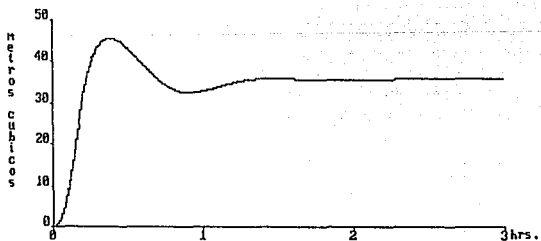
- pH contra tiempo.

92.10.11 - 22:30:48



- Variable Q15 contra tiempo.

92.10.11 - 22:27:31



## CONCLUSIONES

- Se obtuvo un modelo que expresa el proceso en estado estable como se observa en las gráficas de la sección 4.7.1

El modelo también representa adecuadamente la respuesta del sistema a las perturbaciones externas, como se observa en las pruebas realizadas en los apartados 4.7.2 y 4.7.3, donde las variables principales, altura del tanque y grado de pH, tienen una respuesta previsible a las modificaciones efectuadas.

Para la obtención del modelo se hacen ciertas consideraciones y simplificaciones que aunque adecuados para los objetivos de esta tesis, pueden limitar su empleo en alguna aplicación más específica. Sin embargo, el modelo se puede refinar más en caso de ser necesario.

- Se verificó la efectividad de la estrategia de control propuesta que cumple con el objetivo de mantener el pH cercano a 3.5 unidades, manejando las variables de flujo de salmuera de entrada al sistema y de ácido al tanque TK 506.

En las gráficas de las secciones 4.7.4 y 4.7.5, se observan individualmente los resultados de las estrategias de control para el pH y el nivel, mientras que en la sección 4.7.6 se ilustran actuando conjuntamente. Se puede observar que se cumple el objetivo de compensar las desviaciones, ya que se alcanzan sobretiros que en ningún caso sobrepasaron de 1 unidad de pH y tiempos de asentamiento menores a dos horas.

- Al llevarse a cabo las pruebas empleando el programa SIMNON se permite simplificar en gran medida el proceso de simulación y control, facilitando el seguimiento y graficación de los resultados. Además los parámetros se pueden modificar según se requiera.

El uso de este programa no se limita únicamente a casos como los expuestos en el presente trabajo, ya que se puede aplicar como auxiliar efectivo para sustituir procesos que involucren ecuaciones diferenciales, las cuales se tendrían que resolver por métodos como el de transformación de Laplace para resolverse después por métodos numéricos como el de Runge-Kutta.

- La elaboración de un modelo computacional para la simulación del proceso permite conocer de antemano algunos parámetros de utilidad, por ejemplo, las condiciones de sintonía del controlador que pueden servir como referencia para la implantación del lazo en la planta y facilitar la sintonía óptima.

## BIBLIOGRAFIA

Atkins P.W. *Fisicoquímica*, Fondo Educativo Interamericano, México 1985.

Baker, J.E. et. al. "Startup and Operating Problems in Chlorine Plants", *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 63, No. 12, Dec 1967.

Bates, Roger G. *Determination of pH, Theory and Practice*, John Wiley & Sons, New York, 1973.

Considine, Douglas M. ed. *Process Instruments and Controls Handbook*, McGraw Hill Company, New York.

Considine, Douglas M. ed. *Chemical and Process Technology Encyclopedia*, McGraw Hill, New York, 1974.

Elmqvist, Hilding et. al. *SIMNON, User's guide for MS DOS Computers*, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Sweden, 1986.

Harter, T:C. *Basic Operator Training Manual*, PPG Chemical Industries, Chemical Division, Barberton, Ohio. 1973.

Kirk-Othmer ed. *Encyclopedia of Chemical Technology*, John Wiley & Sons, Vol 1, New York, 1978.

Luyben, William L. *Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers*, McGraw Hill, New York, 1989.

Mantell C. L. *Electrochemical Engineering*, McGraw Hill, New York, 1960.

McKetta, John J. *Encyclopedia of Chemical Process and Design*, Marcel Dekker Inc, Vol 7, New York, 1984.

MckMillan, Gregory K. *pH Control*, Instrument Society of America, North Carolina, 1984.

MckMillan, Gregory K. "pH Control: A magical Mistry Tour", *Intech*, September 1984.

Pletcher, Derek. *Industrial Electrochemistry*, Chapman and Hall, New York, 1984.

Shinsky, F.G. *pH and pIon Control in Process and Waste Streams*, John Wiley & Sons, New York, 1973.

## ANEXO

### LISTA COMPLETA DE PROGRAMAS

#### I. PROGRAMA DEL PROCESO

```
Continuous system nafin22
"sistema sin control
"simulacion de la tesis
state c21 v21 c1
der dc21 dv21 dc1
dc21=((q11*(c11-c21))+((c1-c21)*(q5+q15+q21-q1)))/v21
dv21=(q11+q5+q15-q1)
dc1=((c5*q5+c15*q15+c21*q21)-(c1*(q21+q5+q15)))/v1
ca: 0.0
cb:7
cc:14
ph=if c1>ca then -log(c1/1000) else if c1<ca then log(-c1/1000)+cc else cb
phesc=ph*7.14286
" lo anterior es el escalamiento del ph para entrada del controlador
h21=v21/75-3
q21:450
q22:143.7329305
q1:500.09
q11:306.2
q15:25
q5:168.89
v21:500
v1:100
c11:-1
c21:-.5794392367
c1:.316227766
c5:1
c15:10
c22:.316227766

end
```

## II. CONTROL DE pH

- programa del sistema

```
Continuous system nafiny
" con valores edo inicial
" simulacion de la tesis
state c21 v21 c1
der dc21 dv21 dc1
output phesc
input q15esc
dc21=(e*q11*(c11-c21)+(c1-c21)*(e*q5+e*q15+e*q21-e*q1))/(v21)
dv21=(e*q11+e*q5+e*q15-e*q1)
dc1=(e*c5*q5+e*c15*q15+e*c21*q21-c1*(e*q21+e*q5+e*q15))/v1
q15=(q15esc/203.998)*10000
ca: 0.0
cb: 7
cc: 14
ph=if c1>ca then -log(c1/1000) else if c1<ca then log(-c1/1000)+cc else cb
phesc=(ph*7.14286)/100
" lo anterior es el escalamiento del ph para entrada del controlador
h21=(v21)/75-3
e: 1
q21: 450
q22: 143.7329305
q1: 500.09
q11: 306.2

q5: 168.89
v21: 500
v1: 100
c11: -1
c21: -.5794392367
C1: .316227766
c5: 1
c15: 10
c22: .316227766

end
```



- programa de control

```
DISCRETE SYSTEM pirezg
"Pi regulator para tesis
input phesc stpoint
output q15esc
state i
new ni
time t
  tsamp ts
  e=phesc-stpoint
  v=k*e+i
  q15esc=if v<ulow then ulow else if v<uhigh then v else uhigh
  ni=i+k*e*h/ti+q15esc-v
  ts=t+h
  k:.5
  ti:.005
  h:0.01
  ulow:0
  uhigh:1
end
```

- programa de conexión

```
CONNECTING SYSTEM connaf
"Conecting system for pirezg and nafiny
time t
stpoint[pirezg]=.25
phesc[pirezg]=phesc[nafiny]
q15esc[nafiny]=q15esc[pirezg]
end
```

### III. CONTROL DE NIVEL

- programa del sistema

```
Continuous system nafinh
" con control solo para altura
" simulacion de la tesis
state c21 v21 c1
der dc21 dv21 dc1
output altesc
input q11esc
dc21=((q11*(c11-c21))+((c1-c21)*(q5+q15+q21-q1)))/v21
dv21=(q11+q5+q15-q1)
dc1=((c5*q5+c15*q15+c21*q21)-(c1*(q21+q5+q15)))/v1
q11=(q11esc/.2)*100
ca: 0.0
cb: 7
cc: 14
ph=if c1>ca then -log(c1/1000) else if c1<ca then log(-c1/1000)+cc else cb
phesc=ph*7.14286
" lo anterior es el escalamiento del ph para entrada del controlador
h21=v21/75-3
altesc=(h21*14.6664)/100
q21: 450
q22: 143.7329305
q1: 500.09

q15: 25
q5: 168.89
v21: 500
v1: 100
c11: -1
c21: -.5794392367
c1: .316227766
c5: 1
c15: 10
c22: .316227766

end
```

- programa de control

```
DISCRETE SYSTEM piregh
"Pi regulator para tesis
input altesc stpoint
output qllesc
state i
new ni
time t
  tsamp ts
e=(stpoint-altesc)
v=k*e+i
qllesc=if v<ulow then ulow else if v<uhigh then v else uhigh
ni=i+k*e*h/ti+qllesc-v
ts=t+h
k:.5
ti:.005
h:0.01
ulow:0
uhigh:1
end
```

- programa de conexión

```
CONNECTING SYSTEM connafh
"Conecting system for piregh and nafinh
time t
stpoint[piregh]=.5377728
altesc[piregh]=altesc[nafinh]
qllesc[nafinh]=qllesc[piregh]
end
```

#### IV. COMBINACION DE pH Y ALTURA

- programa del sistema

```
Continuous system nafine
" con valores edo inicial
"simulacion de la tesis
state c21 v21 c1
der dc21 dv21 dc1
output phesc altesc
input q15esc q11esc
dc21=(e*q11*(c11-c21)+(c1-c21)*(e*q5+e*q15+e*q21-e*q1))/(v21)
dv21=(e*q11+e*q5+e*q15-e*q1)
dc1=(e*c5*q5+e*c15*q15+e*c21*q21-c1*(e*q21+e*q5+e*q15))/v1
q15=(q15esc/203.998)*10000
q11=(q11esc/.2)*100
ca: 0.0
cb:7
cc:14
ph=if c1>ca then -log(c1/1000) else if c1<ca then log(-c1/1000)+cc else cb
phesc=(ph*7.14286)/100
" lo anterior es el escalamiento del ph para entrada del controlador
h21=(v21)/75-3
altesc=(h21*14.6664)/100
e:1
q21:450
q22:143.7329305
q1:500.09

q5:168.89
v21:500
v1:100
c11:-1
c21:-.5794392367
C1:.316227766
c5:1
c15:10
c22:.316227766

end
```

- programá de control

```
DISCRETE SYSTEM pirege
"Pi regulator para tesis
"combinacion altura y ph
input phesc stpoint
input altesc stepoint
output q15esc
output q11esc
state i ij
new ni nij
time t
tsamp ts
e=phesc-stpoint
v=k*e+i
q15esc=if v<ulow then ulow else if v<uhigh then v else uhigh
ni=i+k*e*h/ti+q15esc-v
ts=t+h
k:.5
ti:.005
h:0.01
ulow:0
uhigh:1
"aquí va el controlador de altura

ej=stepoint-altesc
b=kj*ej+ij
q11esc=if b<ulow then ulow else if b<uhigh then b else uhigh
nij=i+j+kj*ej*hj/tj+q11esc-b
tsj=t+hj
kj:5
tj:.1
```

- programa de conexión

```
CONNECTING SYSTEM connafe
"Conecting system for pirege and nafiny
time t
stpoint[pirege]=.25
phesc[pirege]=phesc[nafine]
q15esc[nafine]=q15esc[pirege]
"connecting system for altura
stepoint[pirege]=.5377728
altesc[pirege]=altesc[nafine]
q11esc[nafine]=q11esc[pirege]
end
```