



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA PLANTA HIDRAULICA

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

PRESENTA :

**CARLOS GARCIA MORENO PACCHIANO**

**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

1. INTRODUCCION	1
2. REPASO DE HIDRAULICA	6
Sistemas hidráulicos	6
Leyes básicas de hidráulica	12
Modelado matemático de sistemas hidráulicos	21
3. PARTES DE LA PLANTA	27
a) Tanques	27
b) Tubos y válvulas	35
c) Dispositivos de medición de nivel y flujo	58
d) Bombas	84
4. MODELO MATEMATICO Y COMPORTAMIENTO	93
5. CONCLUSIONES	105
APENDICES	
a) Programa en ensamblador	110
b) Graficas de comportamiento real	122
BIBLIOGRAFIA	125

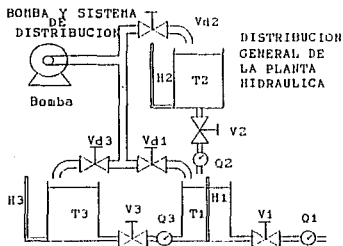
## 1. INTRODUCCION

La planta hidráulica, tema de esta tesis, es una pequeña planta experimental cuyo fin es el de mostrar un proceso hidráulico, en el cual se puede medir, analizar y controlar el flujo y nivel de un fluido líquido; en este caso agua.

Físicamente, la planta consiste de:

- a) Tres tanques, que representan capacitancias hidráulicas.
- b) Válvulas para poder aislar o conectar los tanques entre sí.
- c) Una bomba y una serie de válvulas que forman el sistema de distribución.
- d) Dispositivos de medición de presión, para determinar la altura de la columna de agua presente en los tanques.
- e) Dispositivos de medición de flujo. En este caso, la medición de flujo será por medio de una placa de orificio y unos medidores de presión diferencial.
- f) Un microcontrolador que controlará la información que reciba de parte de la instrumentación de la planta.

La disposición básica de la planta será como lo muestra la figura.



La idea de desarrollar esta planta experimental surgió por parte del departamento de control, con el objeto de tener un sistema físico hidráulico, en el cual se puedan observar distintos procesos; así como ilustrar el funcionamiento de dispositivos hidráulicos como lo son bombas, válvulas, dispositivos de medición de flujo, de nivel, etc.

Esta planta será útil en varias asignaturas que dependen del departamento, principalmente dinámica de sistemas físicos y control digital.

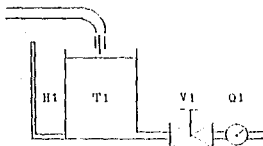
Su aplicación en dinámica de sistemas físicos consistirá en mostrar el comportamiento de sistemas hidráulicos de diferentes ordenes. Para poder cumplir con esta aplicación, la planta debe tener la capacidad de aislar los tanques de agua por medio de las válvulas.

Los diferentes tipos de sistemas que se pueden observar en la planta son:

a) Sistema hidráulico de primer orden:

Un sistema hidráulico de primer orden como el que muestra la siguiente ilustración, se puede observar en la planta hidráulica.

Este tipo de sistema consiste de solamente un tanque, que representa una capacitancia hidráulica, y una válvula, la cual representa una resistencia hidráulica. Se puede lograr aislando el tanque T1 al cerrar la válvula V3, utilizando como única entrada para el sistema, la válvula 3 del sistema de distribución Vd3.

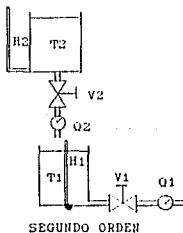


SISTEMA DE PRIMER ORDEN

b) Sistema hidráulico de segundo orden.

Los sistemas de segundo orden se pueden presentar de dos formas en la planta.

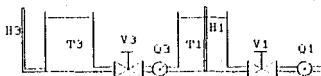
i) Sistema de segundo orden, en el cual el tanque de salida no interactúa con el primer tanque. Es decir, las variaciones que tenga el tanque de salida, no le afectan al tanque de entrada, aunque las variaciones en el tanque de entrada sí le afectan al de salida, como se muestra en la figura.



Este tipo de sistema se puede observar en la planta hidráulica si se utilizan los tanques T1 y T2, aislando el tanque T3 manteniendo cerrada la válvula V3. Como alimentación, se pueden usar las válvulas 1 y 2 de distribución, es decir, Vd1 y Vd2, o solamente Vd2.

ii) Sistema de segundo orden en el cual los dos tanques interactúan entre si.

Los dos tanques están comunicados, y por vasos comunicantes, las variaciones en el tanque de salida afectan al tanque de entrada. Este sistema es de la siguiente manera.



SEGUNDO ORDEN CON INTERACCION

Se puede lograr este tipo de sistema aislando el tanque T2, cerrando la válvula V2, y alimentando el sistema mediante las válvulas 1 y 3 de distribución, es decir Vd1 y Vd3.

También se pueden hacer algunas combinaciones de sistemas de tercer orden, pero no resultan demasiado ilustrativos, por lo que no las trataré durante esta tesis.

La aplicación de la planta en control digital será la de mostrar la aplicación de algunos algoritmos de control digital a sistemas hidráulicos de diferentes tipos u órdenes.



## 2. REPASO DE HIDRAULICA.

A continuación presento un resumen sobre hidráulica. En este trato tanto conceptos básicos de mecánica de fluidos como características, ventajas y desventajas de los sistemas hidráulicos.

### Sistemas Hidráulicos:

Se componen básicamente de:

Un tanque para almacenar el fluido

Bombas y válvulas, y actuadores para convertir la energía hidráulica en mecánica.

**Unidad Hidráulica de potencia:** Incluye una reserva, motor eléctrico para mover las bombas hidráulicas y una válvula de control de presión.

Las bombas hidráulicas se dividen en :

Desplazamiento no positivo

Desplazamiento positivo. En las últimas, la salida es independiente de las variaciones de presión. Se pueden clasificar en desplazamiento fijo o variable, y hay 4 tipos: De pistón axial, de pistón radial, de engranes y tipo "Veleta".

En general, para aplicaciones de control se emplean las bombas de desplazamiento positivo.

Las bombas pueden funcionar por su construcción, como motores hidráulicos.

**Acumuladores:** Almacenan fluido a presión a la salida de una bomba hidráulica. Se usa para tener disponible fluido presurizado, así como suavizar las pulsaciones en el flujo.

**Actuadores:** Convierten energía hidráulica en mecánica. Pueden ser actuadores lineales o rotatorios, y en general son iguales a las bombas.

**Válvulas hidráulicas de control:** Usan movimiento mecánico para controlar la dirección del flujo de un fluido al actuador. Se dividen en Carrete deslizante, deflector o compuerta, Jet pipe y disco.

#### Ventajas y desventajas de los sistemas hidráulicos:

##### **Ventajas:**

- El fluido funciona como lubricante y puede transmitir también el calor hasta un intercambiador de calor adecuado.
- Los actuadores hidráulicos, con tamaños pequeños pueden lograr fuerzas y pares relativamente grandes, son de respuesta muy rápida y pueden trabajar continuamente bajo condiciones difíciles de operación sin sufrir daños.
- Tienen estos sistemas mucha flexibilidad al haber actuadores lineales y rotatorios, a los que las variaciones en la carga les

afectan poco en su operación.

**Desventajas:**

-La potencia hidráulica no es tan fácil de obtener como la eléctrica.

-Su costo es mayor que el de un sistema eléctrico.

-Dependiendo del fluido que se utiliza, puede haber riesgo de fuego o explosiones.

-Los sistemas hidráulicos, debido a posibles fugas, son relativamente sucios. Un sistema puede fallar al ensuciarse o contaminarse el fluido, lo cual ocurre en cierto tiempo.

-El diseño es complejo debido a las alinealidades de estos sistemas.

-Las características de amortiguamiento de estos sistemas son bastante malas.

Otros problemas que se presentan en sistemas hidráulicos son:

**Golpe de Ariete:** Al cerrar una válvula, se crea una presión alta, dependiendo de la velocidad del fluido. Como regla, experimentalmente se ha visto que hay que limitar la velocidad hidráulica a 5 m/s, empleando diámetros adecuados para las tuberías. En tuberías muy largas, hay que poner válvulas de cerrado

lento o una cámara de aire para amortiguar este efecto.

**Cavitación:** Ocurre cuando baja localmente la presión hasta el punto en que el fluido se evapora. Al pasar de nuevo a zonas de alta presión, las partículas evaporadas se colapsan, causando vibraciones y ruido. Este efecto se puede evitar eliminando regiones locales de baja presión, o si no se puede evitar, hay que emplear materiales especiales resistentes a la cavitación.

#### Propiedades de los fluidos hidráulicos.

**Densidad y volumen específicos:** La densidad es la medida de la masa de un material, en relación al volumen que ocupa. El volumen específico, es el inverso de la densidad. Matemáticamente se puede expresar como:

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V}$$

La densidad del agua es  $d = 1000 \text{ kg/m}^3$

La densidad del aceite es  $d = 820 \text{ kg/m}^3$

La densidad es función de la presión y la temperatura.

$$\rho = \rho_0 [1 + a(p - p_0) - b(\theta - \theta_0)]$$

### **Peso específico y gravedad específica:**

La gravedad específica es la relación entre el peso de un líquido contra el peso de un volumen igual de agua. También se conoce como densidad relativa.

El peso específico es la medida del peso de un material, En relación al volumen que ocupa. Matemáticamente se puede expresar como:

$$\gamma = \rho g$$

### **Compresibilidad y Módulo de Elasticidad Volumétrico:**

Si la presión en un líquido se incrementa, su volumen disminuye en  $dv$ . El Módulo de elasticidad volumétrico  $K$  indica que tan compresible es un líquido. Su inverso es el módulo de compresibilidad.

$$K = - \frac{dp}{dv/v}$$

**Viscosidad:**

En un sistema, un fluido poco viscoso aumenta las fugas, y mucha viscosidad, lo vuelve lento. Se mide la viscosidad midiendo el tiempo que se requiere para que un volumen de líquido pase bajo ciertas condiciones a través de un agujero. La resistencia al movimiento relativo de las partículas de un fluido es la viscosidad dinámica o absoluta, cuya unidad es el centi-Poise.

El coeficiente  $\mu$  es la resistencia causada por una capa de fluido al movimiento paralelo a dicha capa de otra capa de fluido a una unidad de distancia, con una unidad de velocidad relativa.

$$1 \text{ P} = 100 \text{ CP} = .1 \text{N-s/m}^2$$

La viscosidad cinemática es:

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

**Notas:**

1. El agua, petróleo crudo o aceites animales o vegetales transmiten potencia hidráulica, pero no deben usarse como fluidos hidráulicos por no lubricar adecuadamente ni resistir oxidación, corrosión, formación de espuma, etc.
2. La vida útil de un fluido hidráulico depende de su resistencia a la oxidación, la cual es causada por el aire, calor o

contaminación. La temperatura de operación de un sistema hidráulico, debe mantenerse entre 30 y 60° C, para evitar la oxidación acelerada del fluido.

3. Si se opera a alta temperatura un sistema hidráulico, hay que considerar que propiedades importantes de los fluidos como lubricidad, viscosidad, estabilidad térmica, estabilidad del fluido, peso y modulo de elasticidad se alteran, y hay que considerar estas alteraciones.

4. Para sistemas hidráulicos situados cerca de fuentes de alta temperatura, se deben emplear fluidos resistentes al fuego como agua-glycol, aceite sintético o emulsiones de agua-aceite.

#### Leyes Básicas de hidráulica.

##### **Número de Reynolds**

Las fuerzas que afectan flujo son gravedad, flotación, inercia, viscosidad, tensión superficial, etc. En ocasiones, las debidas a inercia y viscosidad son las mas significativas. El radio adimensional entre fuerza de inercia contra viscosidad es el número de Reynolds. Un Re grande indica que dominan las fuerzas de inercia y uno pequeño, las de viscosidad.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Donde  $v$  es la velocidad promedio,  $D$  es una longitud característica.

En el caso de flujo en tuberías:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

De donde el número de Reynolds es:

$$Re = \frac{4Q\rho}{\pi\mu D}$$

Donde  $D$  es el diámetro del tubo.

#### Flujo laminar y turbulento:

En flujo laminar, la fuerza que domina es la de viscosidad, por lo que el número de Reynolds es pequeño, y el flujo es laminar. En el flujo turbulento, en general dominan las fuerzas de inercia. En general, si  $Re < 2000$ , el flujo es laminar, y si  $Re > 4000$ , es turbulento, salvo contadas excepciones.

En general, en tuberías, el flujo es laminar si la sección de tubería es pequeña o el tubo es muy largo. Si no, es turbulento. El flujo laminar es muy sensible a cambios de temperatura, por el cambio en la viscosidad.



**Línea de flujo:** Línea continua que tiene la dirección del vector velocidad en cada punto. Un flujo no puede cruzar una línea de flujo.

**Tubo de flujo:** Es el tubo que forman todas las líneas de flujo en una curva cerrada.

**Volumen de control:** Es una región en el espacio. En general se escoge de tal manera que facilite el análisis. Es útil al analizar situaciones en que hay flujo desde y hacia un espacio, el cual se puede seleccionar como volumen de control.

**Flujo Permanente:** Se dice que un fluido está en condición de flujo permanente si sus condiciones ( Presión, vector velocidad y temperatura) no cambian en el tiempo. Es decir:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = 0, \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = 0, \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

**Ecuación de continuidad:**

Viene del principio de conservación de la masa.

Tenemos que para un tubo de flujo se cumple que

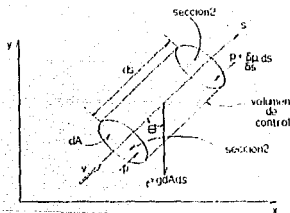
$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2$$

Para flujo incompresible y permanente, la densidad no varía y se puede expresar como  $\rho_1 V_1 = \rho_2 V_2$

Y como  $Q = AV$ , tenemos que  $Q_1 = Q_2$

### Ecuación de movimiento de Euler

Supongamos un volumen de control como el que se muestra en la figura.



Tenemos que la masa de fluido que contiene el volumen de control está dada por la ecuación

$$m = \rho dA ds$$

por definición, la aceleración es  $dV/dt$  y la fuerza debida a la presión es  $F_p = p dA$

De la gráfica tenemos que la presión en el punto 2 es

$$P_2 = (-P_1 + \frac{\partial p}{\partial s} ds) dA$$

La única fuerza en dirección de  $ds$  que queda es la fuerza debida a la gravedad que está dada por

$$F_g = \rho g dA ds$$

Aplicando estas fuerzas en la 2ª ley de Newton tenemos que

$$m \frac{dV}{dt} = p dA - (p + \frac{\partial p}{\partial s} ds) dA - \rho g dA ds \cos \theta$$

$$\rho dA ds \frac{dV}{dt} = - \frac{\partial p}{\partial s} ds dA - \rho g dA ds \cos \theta$$

De donde

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - g \cos \theta$$

Si además  $V$  es función de  $s$  y  $t$ ,  $V = V(s, t)$ , tenemos que

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{ds} \frac{ds}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} = V \frac{\partial V}{\partial s} + \frac{\partial V}{\partial t}$$

que al sustituir nos da

$$V \frac{\partial V}{\partial s} + \frac{\partial V}{\partial t} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - g \cos \theta$$

Sustituyendo  $\cos \theta = \delta z / \delta s$  tenemos

$$V \frac{\partial V}{\partial s} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - g \frac{\partial z}{\partial s} = 0$$

Que es la ecuación de movimiento de Euler.

En el caso de flujo permanente, podemos considerar la ecuación de movimiento de Euler para flujo permanente que es

$$VdV + \frac{1}{\rho} dp + g dz = 0$$

### Ecuación de Bernoulli

Para flujo permanente, sin fricción e incompresible, la ecuación de movimiento de Euler se puede integrar dando como resultado

$$\frac{V^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = cte$$

Que se conoce como la ecuación de la energía para flujo ideal. Si la dividimos entre  $g$ , obtenemos la ecuación de Bernoulli, que es

$$\frac{V^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z = cte$$

Si el flujo no es estático, tenemos que

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial s} \left( \frac{V^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz \right) = 0$$

Si la integramos obtenemos

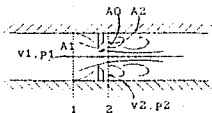
O expresada como la ecuación de la energía para flujo no estático

$$\int \frac{\partial V}{\partial t} ds + \frac{V^2}{2} + \frac{P}{\rho} + gz = cte$$

$$\left( \frac{V_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} + gz_1 \right) - \left( \frac{V_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho} - gz_2 \right) = \int \frac{\partial V}{\partial t} ds$$

### Flujo en orificios

Supongamos un flujo que pasa por un agujero como se muestra en la figura.



El flujo pasa por el orificio, pero se sigue contrayendo hasta llegar al área  $A_2$  que es la mínima área y se llama Vena contracta. Definimos el coeficiente de contracción  $C_c$  que es la relación entre el área de la vena contracta y el orificio.  $C_c = A_2/A_0$

Entre  $A_1$  y  $A_2$  se puede aplicar la ecuación de Bernoulli.

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2$$

Si  $z_1 = z_2$ , obtenemos

$$V_2^2 - V_1^2 = \frac{2g}{\gamma} (p_1 - p_2)$$

De la ecuación de continuidad, tenemos que  $V_1 A_1 = V_2 A_2$

Y sustituyendo, obtenemos

$$V_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{2 \frac{g}{\gamma} (p_1 - p_2)}$$

Considerando el gasto hidráulico

$$Q_2 = A_2 V_2 = \frac{C C A_0}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{2 \frac{g}{\gamma} (p_1 - p_2)} = \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{2 \frac{g}{\gamma} (p_1 - p_2)}$$

Este resultado es aproximado por no considerar la fricción viscosa.

Para tomar en cuenta este factor, se propone un factor empírico  $C_v$ , que es el coeficiente de velocidad. tenemos que  $Q = C_v V_2 A_2$  y por lo tanto

$$Q = \frac{C_v C_c A_0}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{2 \frac{g}{\gamma} (p_1 - p_2)} = C A_0 \sqrt{2 \frac{g}{\gamma} (p_1 - p_2)}$$

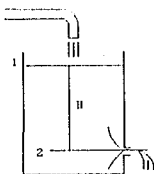
### Notas:

-Hay que evitar excesos de pérdidas por fricción en líneas hidráulicas, quitando longitud excesiva de líneas, números excesivos de curvas, ajustes y válvulas, así como velocidad excesiva de flujo por usar tuberías de diámetro muy pequeño o fluidos excesivamente viscosos.

### Modelado matemático de sistemas hidráulicos

Los sistemas hidráulicos se pueden analizar por las leyes fundamentales antes revisadas. Existen tres clases de elementos básicos, al igual que en sistemas eléctricos y mecánicos. Estos son: Elementos de inercia o inductancia, de amortiguamiento o capacitancia y resistencias. En los sistemas hidráulicos, a estos elementos se les conoce como resistencia, capacitancia e inercia.

Ejemplo. Flujo a través de un orificio en la pared de un tanque.





Para fluido poco viscoso, suponemos flujo turbulento.

H es la carga hidráulica hasta el orificio, y es constante.

De la ecuación de Bernoulli tenemos

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2$$

Que si consideramos que H es constante,  $V_1 = 0$ ,  $p_1$  y  $p_2$  son iguales y son la presión atmosférica y  $z_2$  es la referencia, queda reducida a:

$$H = \frac{V_2^2}{2g} \rightarrow V_2 = \sqrt{2gH}$$

Considerando que  $A_2 = C_c A_0$ , tenemos que el flujo es

$$Q = C_v C_c A_0 \sqrt{2gH} = C A_0 \sqrt{2gH} = k\sqrt{H}$$

En general para flujo en orificios, la constante c vale alrededor de  $c = 0.61$

### Resistencia hidráulica

Es el cambio de potencial requerido para cambiar la corriente, flujo o velocidad en una unidad.

$$\text{Resistencia} = \frac{\text{Cambio de potencial}}{\text{Cambio en flujo}} ; \quad \left[ \frac{\text{N-s}}{\text{m}^2} \right] \quad \left[ \frac{\text{s}}{\text{m}^2} \right]$$

Para el flujo en tuberías, el potencial puede ser presión o carga hidráulica, y el flujo puede ser el flujo volumétrico.

### Capacitancia hidráulica

Es el cambio en la cantidad de material o distancia para variar el potencial en 1 unidad.

$$\text{Capacitancia} = \frac{\text{Cambio de cant de material o distancia}}{\text{Cambio de potencial}}$$

$$\text{En un tanque: } C = \frac{\text{Cambio de cantidad de líquido}}{\text{Cambio de presión}} ; \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{N/m}^2} \right] \quad \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{N}} \right]$$

$$C = \frac{\text{Cambio de cantidad de líquido}}{\text{Cambio de carga hidráulica}} ; \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{m}} \right] \quad [\text{m}^2]$$

Si se emplea la carga hidráulica como medida de potencial, la capacitancia es igual al área del tanque. No es lo mismo la capacitancia que la capacidad del tanque.

## Inertancia Hidráulica

Es el cambio en el potencial requerido para variar la rapidez de cambio de el flujo, la velocidad o la corriente.

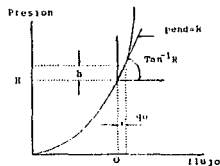
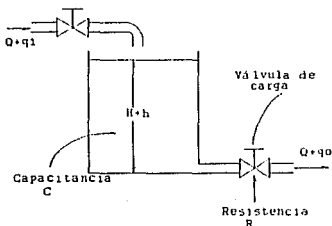
$$I = \frac{\text{Cambio en presión}}{\text{Cambio en flujo/seg}} ; \left[ \frac{\text{N/m}^2}{\text{m}^3/\text{s}} \right] \left[ \frac{\text{N} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^3} \right]$$

$$I = \frac{\text{Cambio en carga hidráulica}}{\text{Cambio en flujo/seg}} ; \left[ \frac{\text{m}}{\text{m}^3/\text{s}} \right] \left[ \frac{\text{s}^2}{\text{m}^2} \right]$$

Comentarios:

1. La capacitancia y la inertancia almacenan energía resultante del flujo y la presión. la resistencia disipa energía.
2. En sistemas hidráulicos, la inertancia es en general despreciable, excepto en casos como vibración, golpe de ariete, etc. Esta vibración resulta de efectos de inertancia-capacitancia, como análogo de la oscilación que se produce en circuitos eléctricos LC resonantes.

## Ejemplo de modelado matemático de sistemas de nivel de líquido.



Suponemos que la carga y el flujo varían poco para un cierto tiempo y que el flujo en la válvula es turbulento.

$H$  = Carga hidráulica en estado estable

$h$  = Diferencial de carga hidráulica, medido a partir de estado estable

$Q$  = Flujo en estado estable

$q_o$  = Diferencial de flujo de salida desde su valor de estado estable

$q_i$  = Diferencial de flujo de entrada desde su valor de estado estable

El cambio en el líquido almacenado en  $dt$  es  $Cdh = (q_i - q_o)dt$

Definimos:

$$R = \frac{dH}{dQ} \quad \text{y} \quad Q = k\sqrt{H}$$

$R$  no es constante y aunque la  $k$  no sea conocida, pueden haber curvas experimentales de carga contra flujo como la que se muestra en la gráfica.

De la gráfica,  $R$  es la pendiente de la curva. Cambia según el flujo, pero se puede linealizar.

El cambio en el líquido almacenado es

$$\frac{Cdh}{dt} = q_i - \frac{h}{R}$$

de donde

$$RC \frac{dh}{dt} + h = Rq_i$$

Esta ecuación es válida para variaciones pequeñas de Altura o carga hidráulica y de flujo.

### 3. PARTES DE LA PLANTA

La planta hidráulica está compuesta por varios elementos. Entre estos, están los tanques de agua, los cuales determinan en gran medida el comportamiento de la planta, válvulas, elementos de medición tanto de flujo como de nivel de agua y los tubos que conducirán al agua.

A continuación presento la descripción de estos elementos.

#### a) Tanques.

Son los elementos de almacenamiento de agua.

El comportamiento de la planta hidráulica depende básicamente de la capacitancia hidráulica de sus elementos, la cual depende de los tanques, así como de la resistencia hidráulica, que está compuesta principalmente por la resistencia tanto de los tubos como de las válvulas, y dispositivos de medición de flujo.

#### i) Forma de los tanques.

Por lo general, los tanques presentan una de tres formas:

a) Cilindro vertical

b) Cilindro horizontal. Una variante del cilindro horizontal es el tanque llamado tipo "bala", que es un cilindro horizontal con los extremos terminados en una sección esférica.

c) Esfera.

Existen varias razones por la que la mejor opción para la planta hidráulica sea utilizar tanques en forma de cilindro vertical.

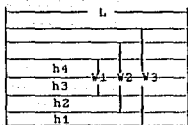
1. La primera razón es por sencillez para la instrumentación y control de la planta. Como señalé anteriormente, la capacitancia hidráulica de los tanques depende de el área horizontal de los mismos.

El área horizontal de un cilindro vertical es constante en todo el tanque, por lo que la capacitancia hidráulica es constante, y no depende del nivel del líquido en cada momento. Además, es muy sencillo calcularla, ya que es solamente el área de un círculo, cuya fórmula es:

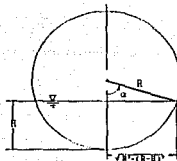
$$A=\pi r^2$$

En el caso del cilindro horizontal, y la esfera, la capacitancia hidráulica es mas complicada de calcular, pues depende del nivel de agua presente cada instante, ya que el área horizontal no es constante.

La capacitancia hidráulica de un cilindro horizontal, como se puede ver en la figura, varía para cada nivel, de modo que es un rectángulo que a mayor altura del nivel de agua, se hace mas ancho. En el caso del tanque de tipo bala, además contribuyen a la capacitancia hidráulica dos segmentos circulares correspondientes a la terminación esférica del tanque. El tamaño del radio de estos segmentos aumenta conforme aumenta el nivel.



Áreas para diferentes niveles en un tanque cilíndrico horizontal



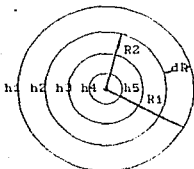
Vista lateral de cilindro horizontal

De la figura anterior podemos ver que la capacitancia hidráulica es función del radio del cilindro horizontal, así como de la altura del líquido.

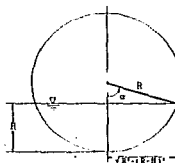
El área o capacitancia hidráulica en este caso se puede expresar:

$$A = 2L\sqrt{R^2 - (R-H)^2}$$

En el caso de la esfera, la capacitancia hidráulica es también función del radio y de la altura.



Áreas para diferentes niveles en un tanque esférico



Vista lateral de cilindro horizontal



El área horizontal de la esfera se puede expresar:

$$A = \pi [\sqrt{R^2 - (R-H)^2}]^2$$

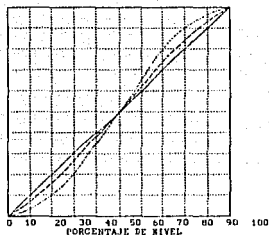
2. Otra razón importante para escoger un cilindro vertical es la relación entre nivel y volumen del tanque.

La relación entre nivel y volumen en un tanque que presenta una superficie constante es lineal, mientras que en el caso de un cilindro horizontal o una esfera, esto no es cierto.

Esto puede traer problemas en el algoritmo de control, y además, la planta hidráulica tiene un fin ilustrativo. Se ve mas claramente como varía el volumen con la altura si existe una relación lineal.

En el caso del cilindro horizontal y la esfera, la proporción de nivel y volumen coincide para 0, 50 y 100 por ciento del nivel con el 0, 50 y 100 por ciento del volumen, pero por ejemplo, en una esfera, indicará el nivel al 20 % del tanque, aunque solo 10.4% de la esfera esté llena; cuando el tanque esté lleno al 97.2 %, el nivel indicará el 90 % y se incrementará muy rápidamente.

En la gráfica se puede ver como varía el porcentaje de volumen contra el porcentaje de nivel para diferentes formas de tanques.



Estas alinealidades pueden presentarse como cambios en la ganancia del proceso, haciendo difícil el ajuste del controlador, existiendo inclusive la posibilidad de que estos cambios introduzcan inestabilidad. Además, harían al proceso menos ilustrativo.

#### Proceso para construir los tanques.

**i) Forma de los tanques.** Los tanques de la planta hidráulica, como ya se expuso anteriormente, son unos cilindros verticales. Están hechos a partir de un tubo de acrílico de 6 pulgadas de diámetro, con paredes de 3mm de espesor, y con una altura de 40 cm.

Con el objeto de reforzar la base de los tanques y tener una pared de mayor espesor para hacer las conexiones a los tubos y las tomas para medir la presión hidrostática en el fondo del tanque, se le hizo a la base de los tanques un recubrimiento de resina cristal, de 2 cm de espesor y 7 cm de altura, y se le dejo también un centímetro de espesor en el piso de los tanques. Esto también fue con el objeto de hacerlos mas resistentes.

**ii) Proceso de fabricación de los tanques.**

a) Cortar el tubo de acrílico de 6 pulgadas para obtener una longitud de 40 cm.

b) Lijar los bordes del tubo, para tener superficies mas uniformes. Esto se hace con doble objeto. Por un lado, para tener una mejor superficie de pegado a la hora de taparlo, y por otro lado, por estética.

c) Tapar uno de los lados del tubo. Para esto, se requirió cortar círculos de acrílico y luego pegarlos al tubo con Pegacril. Para cortar el acrílico y darle la forma circular, primero se cortaron cuadros de acrílico, se marcaron los círculos y luego se esmerilaron. Finalmente se limaron para darles un buen acabado. Se tuvieron que tapar los tubos para que la resina no penetrara al tubo, sino que solamente lo envolviera.

d) Poner al acrílico líquido abrillantador y antiestático, para evitar que se le adhiera el polvo.

e) Hacer el molde para el vaciado de la resina. Este molde se hizo con estireno, por la flexibilidad y la facilidad de manejo de este material. El molde consistió en un cilindro de estireno, reforzado con 2 aros de 5 cm de espesor, también de estireno, para aguantar el esfuerzo ocasionado por la reacción química de la resina al fraguar. Esta reacción es muy violenta.

Este cilindro se apoya en una superficie plana, también de estireno y se sella con plastilina. Posteriormente se procede a esparcirle una película separadora basada en alcohol, para que no se pegue el estireno con el acrílico.

f) Sellar el tubo con su tapa con sellador de silicón.

g) Cortar una varilla de acrílico en pedacitos de 1 cm de largo para apoyar el tubo, y dejar así una capa de 1 cm de espesor de resina en el piso del tanque.

h) Apoyar el tubo tapado en las piezas cortadas de la varilla de acrílico dentro del molde, y llenar el tubo por dentro con algo pesado para evitar que flote en la resina al vaciarsela.

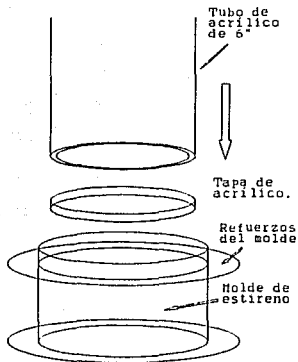
i) Preparar la resina. A 800 g de resina cristal, se le agregan 200g de monómero de estireno. luego se le agrega .5% de promotor, (5 ml) se revuelve bien. Luego se le agrega 1% de catalizador (10ml), y se revuelve bien.

j) Vaciar la resina ya preparada en el molde, y dejarla fraguar.

k) Retirar la pieza del molde y hacerle las perforaciones para los sensores de presión y para los conectores que unirán los tanques con sus respectivos tubos.

l) Meter los conectores para tomas de presión de los sensores en las perforaciones, así como los conectores de los tubos. Luego sellar bien estas piezas de modo que no hayan fugas.

m) Ya que están los conectores y las tomas de presión, se colocan los tubos en los conectores y se sellan bien.



## b) Tubos y válvulas.

Estos elementos forman, junto con los dispositivos de medición de flujo, la resistencia hidráulica del sistema, que con la capacitancia hidráulica definen el comportamiento del sistema hidráulico.

### i) Válvulas.

Las válvulas constituyen del 20% al 30% del costo de la tubería de una planta, según sea el proceso; el costo de un tipo y tamaño dados de válvulas puede variar en 100% según sea su construcción, por lo que la selección de válvulas es de suma importancia en los aspectos económicos, así como en la operación de plantas de proceso.

Una válvula se utiliza para controlar el flujo de un fluido en un tubo. El requisito de control puede ser de paso y corte, estrangulación (modulación del flujo), reducción de la presión del fluido, etc.

En este capítulo presento una guía para la selección de la válvula, según la aplicación para la cual será empleada. En general, la válvula que se utiliza es la que cumpla mejor los requisitos, y que además esté disponible comercialmente.

Para seleccionar la válvula, se deben tomar en cuenta los siguientes puntos referentes al proceso.

- Límites de temperatura de diseño
- Límites de presión de diseño
- Requisitos de control
- Caída de presión permisible
- Características corrosivas del fluido
- Posibilidades de erosión
- Posibilidades de obstrucción
- Peligros de las fugas
- Conservación del calor

#### Materiales de construcción.

El material de construcción para una válvula está restringido por las características corrosivas y erosivas del fluido y también por la temperatura y presión de diseño.

Cuando se toman en cuenta estos factores, se puede determinar la aceptación de un solo material de construcción, pero por lo general, hay elección de mas de uno, y la selección definitiva del material se basa entonces en aspectos económicos.

Las gráficas y tablas de corrosión son útiles para la selección general de los materiales de construcción, pero no aseguran la elección correcta para una aplicación particular. En general es bueno contar con datos de pruebas dinámicas efectuadas con muestras sometidas a los fluidos que se van a manejar durante la operación real de la planta.

Las propiedades de los materiales establecen los límites físicos de

funcionamiento en las válvulas. Dentro de determinados valores, se puede trabajar con una presión más alta con solo aumentar el espesor de pared del cuerpo y de la válvula en general. En la tabla se presentan algunas limitaciones generales para el servicio de las válvulas.

Material	Límites típicos de temp.		Límites típicos de presión
	Mín. °F	Max. °F	psig
Aluminio	-325	400	300
Latón	-400	450	300
Bronce	-400	550	300
Hierro fundido	0	350	200
Acero fundido	- 20	1 000	6 000
Hierro dúctil	- 20	650	6 000
Acero forjado	- 20	850	50 000
Acero al Níquel	-150	1 100	50 000
Acero inoxidable	-325	1 600	50 000

#### Válvulas para servicio de paso y cierre.

La mayor parte de las válvulas manuales en las plantas de procesos químicos están en servicio de paso y cierre. Los nombres generales de algunas válvulas en este servicio son los siguientes.

**Válvulas de cierre.** Son válvulas normalmente abiertas para permitir flujo pleno, pero que se pueden cerrar para desviar el flujo o aislar un equipo para mantenimiento.

**Válvulas de respiración.** Se suelen colocar en el punto mas alto de una tubería, recipiente u otro equipo para permitir la descarga de vapores o gases y pueden estar abiertas durante el funcionamiento normal.



**Válvulas de drenaje.** Están colocadas en un punto bajo en la tubería, recipiente u otro equipo para descargar los líquidos del sistema. En condiciones normales, están cerradas y sólo funcionan ocasionalmente.

**Válvulas de purga.** Son pequeñas y se colocan en sistemas en donde se espera un cierre de cuando en cuando mientras el sistema está sometido a presión. La válvula de purga permite desahogar con seguridad la presión en el sistema aislado con la descarga de vapores o líquidos antes de abrirlo, o para purgar un fluido antes de introducir otro. También se suelen instalar entre dobles válvulas de cierre; se abren para evitar la mezcla de fluidos diferentes en dos sistemas separados por las válvulas de cierre colocadas en serie.

**Válvulas de descarga.** Son para la descarga rápida del fluido de un recipiente a otro. Se coloca en el punto bajo del equipo y es diferente a la válvula de drenaje, porque se emplea cuando hay urgencia de descargar el fluido. Es de apertura rápida y de tamaño para mayor volumen que la de drenaje.

Entre las válvulas de servicio de paso y cierre están:

**Válvulas de compuerta.**

La válvula de compuerta es de flujo rectilíneo. La barrera al flujo es un disco o una represa en forma de cuña que se desliza en ángulo recto con el sentido del flujo y tiene asentamiento hermético en el

cuerpo. Cuando está parcialmente abierta, tiene una abertura en forma de media luna que cambia con gran rapidez su superficie con un ligero ajuste del volante, lo cual la hace indeseable para control parcial del flujo.

Sus ventajas son: el tipo de cierre es tal que el cuerpo de la válvula de compuerta es de perfil delgado comparado con otros tipos de válvulas, lo cual produce menor masa del cuerpo y un costo reducido. Su corta dimensión entre cara y cara permite instalarla en tubos con menor espacio que casi todas las otras válvulas. El flujo rectilíneo y la zona para flujo pleno, que es de la misma configuración que la tubería, solo agrega una caída de presión muy pequeña en la tubería. Además no requiere lubricación en la cara de las piezas movibles internas, por lo que no hay riesgo de contaminar el fluido del proceso.

Sus desventajas son: El asiento es parte integral del cuerpo y produce una cavidad que puede retener sólidos y evitar el cierre completo de la válvula. Por ello, se suelen utilizar para servicio limpio, y son indeseables para la mayor parte de pastas fluidas. Las fugas del fluido por el porta-empaquetadura son un problema inherente en estas válvulas, por lo que no pueden emplearse en servicio con materiales muy tóxicos o inflamables. Además, no se pueden utilizar cuando se requiere modulación de flujo. Para el momento en que la válvula está abierta entre 5% y 10%, el flujo ya es del 85% al 95% del de apertura total. La velocidad en la apertura en forma de media luna abierta 5% a 10% es muy alta y el disco no está diseñado para resistir la fuerza erosiva resultante.

### **Válvulas de macho.**

Es de flujo rectilíneo. En el conducto para flujo está colocado un macho cónico con una abertura de fundición o taladrada. Un giro de 90° del macho abre o cierra el conducto. Esta válvula es de construcción sencilla y una de las más antiguas que se conocen. La abertura del macho puede ser de cualquier tamaño o configuración. Ventajas: La válvula de macho tiene pocas piezas y es de mantenimiento sencillo. La apertura o cierre totales se logran con 1/4 de vuelta del macho, por lo que son de apertura rápida. El flujo es aerodinámico y aumenta muy poco la caída de presión de la tubería. Como el asiento no permite que se acumulen sólidos que traben el macho, son útiles para servicio con pastas fluidas, líquidos y vapores.

Desventajas: Se puede arrastrar el lubricante de la cara del macho y contaminar la corriente del proceso. Aunque hay muchos lubricantes disponibles, algunos fluidos de proceso de muy baja lubricidad disuelven con rapidez el lubricante y permiten que el macho se peque y se raye. La válvula de macho con camisa de Teflón puede eliminar este problema, ya que no requiere lubricante, pero es de mayor costo. Además, una parte del líquido de proceso queda atrapada en el conducto en el macho cada vez que se cierra la válvula.

### **Válvulas de bola.**

La válvula de bola es una modificación de la válvula de macho. El flujo se regula con la rotación de un elemento esférico o bola en lugar de un macho cónico y el conducto en la esfera es de la misma

forma y superficie seccional que la tubería.

**Ventajas:** Tienen pocas piezas y son de mantenimiento sencillo. La apertura o cierre totales se obtienen con 1/4 de vuelta de la bola. El flujo en la tubería no tiene interrupción y la válvula aumenta muy poco la caída de presión en el sistema. Es muy adecuada para servicio con pastas fluidas y sólidos fluidificados.

**Desventajas:** La dimensión total de cara a cara es mayor que en casi todos los demás tipos de válvulas y requiere más espacio en el sistema de tubería. Una parte del fluido de proceso queda atrapado en el conducto cada vez que se cierra la válvula.

#### **Válvula para tanques con fondo plano.**

Esta válvula es para controlar el flujo de un líquido o pasta fluida desde el fondo de un recipiente. Se distingue en que cierra al ras con el fondo del tanque, por lo cual no se retienen sólidos en el cuerpo de la válvula.

Esta válvula es apta para conectarla directamente en la salida del fondo de un tanque y su asiento se encuentra dentro de la boquilla de salida del tanque. La barrera al flujo es un macho cónico que se mueve en sentido vertical con un vástago a lo largo del eje del tapón. La salida descarga a 45° de la vertical.

**Ventajas!** Cada vez que se acciona la válvula se obtiene la descarga completa del material que pasa por ella. Permite descargar todo el recipiente si se coloca en el centro de la cabeza cóncava. Se puede lograr la mezcla completa del contenido del recipiente porque no hay cavidad para estancamiento en la boquilla de salida. No se necesita lubricante para las piezas internas, por lo que no hay

peligro de contaminación del fluido de proceso.

Desventajas: Hay que dejar una distancia considerable debajo del fondo del tanque, para instalar y accionar la válvula. Además, no hay normas para estas válvulas. Cada fabricante tiene su propio diseño con dimensiones similares a los demás fabricantes.

#### Servicio de modulación de flujo.

La mayor parte de las operaciones de un proceso que requieren variación cuantitativa continua en el flujo de fluido cuentan con válvulas de control. Hay varios tipos diferentes de válvulas moduladoras de flujo para los requisitos específicos de diversas situaciones del proceso. Algunas de estas son:

#### **Válvulas de Globo.**

Reciben este nombre por la configuración del cuerpo. El flujo en esta válvula se dirige hacia arriba o abajo por una abertura circular en el laberinto que se puede cerrar, ya sea al mover un disco reemplazable contra un asiento plano o al introducir un macho metálico cónico en un asiento cónico. Están disponibles con diversas construcciones. El vástago puede ser elevable o solo girar cuando se abre la válvula; las roscas de tornillo en el vástago pueden estar dentro o fuera de la zona de presión, el asiento puede ser permanente o reemplazable y la válvula se puede accionar con cierta carrera de una manija o varias vueltas de un volante. La válvula de globo de orificio en V es un diseño especial en que se emplean un macho cilíndrico con muescas en V, por las cuales circula el fluido. Esta válvula produce buen control con bajos

volúmenes de fluido.

**Ventajas.** La válvula de globo es excelente para regular el flujo en la gama desde moderado hasta flujo pleno. La válvula de globo de disco o de macho produce buen cierre. Las válvulas de globo destinadas para apertura y cierre permiten cambiar la empaquetadura del vástago en servicio, con la válvula totalmente abierta.

**Desventajas.** La configuración en laberinto de estas válvulas requiere que el flujo cambie de dirección varias veces dentro del cuerpo, lo cual aumenta mucho la caída de presión en la tubería. El asiento se daña con facilidad con los sólidos atrapados entre el macho o el disco y el asiento. Por ello se prefieren estas válvulas para servicio con materiales limpios.

#### **Válvulas en ángulo.**

Son una modificación de las válvulas de globo y funcionan con los mismos principios, pero la salida está en ángulo con la entrada. Esto permite un cuerpo de construcción mas sencilla y menos voluminoso que el de la válvula de globo.

**Ventajas:** Tiene las mismas características de control de flujo que la de globo. El costo de la válvula suele ser menor que el de la de globo. La caída de presión es menor que en la de globo. Puede eliminar una conexión cuando se necesita un cambio de 90° en el sentido de la tubería.

**Desventajas:** La tubería es demasiado complicada cuando no se desea un cambio en el sentido de flujo. El asiento se daña con la misma facilidad que el de la de globo. La manija solo puede estar en una posición con respecto a la tubería.

### **Válvulas en Y.**

Se llaman así porque la forma de su cuerpo es similar a una Y. El cierre y funcionamiento son similares a los de una válvula de globo. El fluido entra por un extremo del cuerpo y sale por el lado opuesto de la válvula, pero circula en el mismo sentido. El disco o macho asientan en contra del flujo y el vástago sale a 45° del eje de la tubería en que está la válvula. En la válvula en Y son posibles las mismas variantes que en la de globo.

**Ventajas.** Tienen el mismo grado de buen control del flujo que la de globo. El disco o macho producen buen cierre. Las válvulas destinadas para apertura permiten cambiar la empaquetadura del vástago en la válvula funcionando en su posición de máxima apertura. La caída de presión es mucho menor que en una válvula de globo. Cuando la válvula está abierta se puede ver el interior, por lo cual es posible limpiarlo con varillas o escobillones y es satisfactoria para servicio con pastas fluidas no abrasivas.

**Desventajas.** El asiento se daña con facilidad con materiales abrasivos.

### **Válvulas de aguja.**

Es un tipo especial de la válvula de globo con macho en donde este es una aguja delgada y cónica que asienta en un orificio pequeño de diferente conicidad. El cuerpo puede ser convencional de globo o en ángulo. Otras características de diseño son similares a las de la válvula de globo.

**Ventajas:** Está especialmente adaptada para un control muy preciso de bajos volúmenes de flujo. Permite reemplazar la empaquetadura

con la válvula funcionando y totalmente abierta. La válvula de aguja produce buen cierre en servicio con materiales limpios.

Desventajas: La caída de presión en estas válvulas es considerable. El anillo para flujo se obstruye con facilidad con partículas de sólidos.

#### **Válvulas de diafragma.**

Consiste en un cuerpo con flujo rectilíneo que puede o no estar interrumpido por un vertedero transversal. El cierre de la válvula se efectúa al oprimir un diafragma flexible contra la pared interna del cuerpo o contra el vertedero transversal. El diafragma sella entre el cuerpo y el vástago y el compresor en forma de galleta, por lo cual la válvula es a prueba de fugas.

Ventajas: Es a prueba de fugas y no requiere empaquetadura.

Desventajas. No es adecuada para funcionamiento con altas presiones y el control de flujo no es bueno con volúmenes muy bajos.

#### **Válvulas flexibles.**

Consisten en una manguera o tubo flexible y algún tipo de opresor para comprimir y aplanar el tubo para cerrar la válvula. La forma mas sencilla es el gancho opresor con resorte. El opresor se puede obtener en muy diversas formas según los requisitos de funcionamiento. La abrazadera de tornillo es la que permite un control mas exacto, pero también se utilizan cuñas, rodillos y palancas. Una reciente adición a esta clase de válvulas es la llamada válvula de manguito o camisa en la cual se emplea presión hidráulica o neumática para aplanar la sección de tubo o manguera



alojada en un cuerpo de acero dividido o partido en sentido horizontal.

**Ventajas:** Es a prueba de fugas y no requiere empaquetadura. El flujo es aerodinámico y la válvula produce una insignificante caída de presión en el sistema. Se requiere muy poco espacio para su instalación y hay buen control para flujo desde moderado hasta total. Esta válvula es adecuada en particular para sistemas en que se emplean mangueras de caucho. Es casi la única válvula que se puede emplear con corrientes de líquidos y pastas fluidas que tienden a depositar incrustaciones en las paredes de las mangueras con gran rapidez.

**Desventajas:** El material de la manguera limita la temperatura permisible de funcionamiento. La válvula flexible no es adecuada para altas presiones. El control de flujo no es muy bueno con bajos volúmenes. Para servicio con vacío se necesita manguera de pared gruesa, que es más costosa, y por último, la manguera tiende a debilitarse en el punto de compresión.

#### **Válvulas de discos de laberinto.**

Está diseñada para producir una gran caída de presión en un laberinto. Este tipo de válvula está disponible con cuerpo en ángulo o con flujo rectilíneo. El elemento de control de flujo es una pila de discos con laberintos de flujo radial hacia fuera. La válvula se puede diseñar para una expansión uniforme del fluido del proceso. El vástago mueve un macho o tapón elevable para descubrir en secuencia las entradas a los laberintos a fin de que aumente el flujo.

**Ventajas:** La válvula de discos de laberinto es útil para reducir presiones con urea, agua caliente y otros líquidos que vaporizan. Sus características de estrangulación son buenas. Producen poca intensidad de ruido. hay cierre hermético, y el asiento y el macho tienen larga duración.

**Desventajas:** Solo se puede utilizar cuando se permite una gran caída de presión. Este tipo de válvula es muy costoso.

#### **Válvulas de mariposa.**

Es del tipo de flujo rectilíneo. La barrera al flujo es un disco oscilante que gira sobre un eje transversal central y se acciona con la rotación del eje. El disco se asienta en las paredes del cuerpo de la válvula; La rotación del eje se logra por medio de una palanca, engranes cónicos o engranes de sinfín o rectos; el sello del eje es con una empaquetadura. Estas válvulas se utilizan en general, para control de gases. En ocasiones se emplean dos válvulas que funcionan en paralelo con líquidos o gases para proveer al control de temperatura con una derivación alrededor de un intercambiador de calor.

**Ventajas:** Aumenta muy poco la caída de presión en el sistema de tubería. Su cuerpo es muy corto y requiere poco espacio en tubería. Se puede lograr un control moderado del flujo con la válvula en posiciones desde cerrada hasta unos 60°.

**Desventajas.** No son satisfactorias para control preciso del flujo. Los sólidos entorpecen el funcionamiento del disco; las corrientes que tienden a formar incrustaciones pueden inutilizarla pronto.

Además de este tipo de válvulas existen las válvulas de flujo unidireccional. Su nombre común es válvulas de retención (check). Su finalidad es permitir flujo sin limitaciones en un sentido y restringirlo en el sentido opuesto. Hay diversos tipos para requisitos específicos de funcionamiento y cada uno se identifica por su denominación. Algunos usos son:

i) La descarga de una bomba centrífuga tiene una válvula de retención para impedir el retroceso del líquido en la bomba cuando está parada, para que el impulsor no gire en sentido opuesto.

ii) Las válvulas de retención se instalan para servicios separados conectados con un sistema común, para evitar flujo inverso hacia las tuberías de cada material e impedir la contaminación.

iii) Las válvulas de retención se utilizan para evitar que un aumento súbito de presión en un sistema someta a los servicios de presión mas baja conectados con el mismo a una presión superior a sus límites de diseño.

#### Selección de las válvulas para la planta hidráulica.

De acuerdo con el tipo de proceso que vamos a observar, no tenemos muchas restricciones en cuanto al material de fabricación. Analizando el proceso, los límites de temperatura y presión de diseño, son de temperatura ambiente, y una presión no mayor a 40 cm de H<sub>2</sub>O, es un fluido no corrosivo, y no hay posibilidad de erosión ni peligros de fugas, debido a que el fluido es agua y las presiones y por tanto velocidades de flujo son muy reducidas.

En cuanto a la caída de presión permisible, debido a que es un

proceso cuyo único objeto es didáctico, no hay problema.

El único requisito que se debe observar es que la válvula debe ser capaz de regular eficientemente el flujo en la planta. Por lo que las válvulas adecuadas serían: Válvula de globo, válvula en ángulo, válvula en Y , válvula de aguja o válvula de discos de laberinto. La última se puede descartar por su elevado costo, y la válvula en ángulo también, pues no se desea un cambio en el sentido de flujo. Por costo y por disponibilidad en el mercado, elegí las válvulas de globo, ya que se encuentran fácilmente, y su costo es bastante bajo.

## ii) Tubos.

En toda planta hidráulica, son indispensables las tuberías, ya que son el elemento que conduce al fluido en la planta. Se pudiera creer que las tuberías necesarias para la instalación de una planta de fuerza no son de vital importancia. Sin embargo, su selección y disposición merecen el estudio más cuidadoso. Al ir aumentando las temperaturas y presiones, el costo del sistema de tuberías ha llegado a ser uno de los mayores factores de gasto, y su selección e instalación uno de los problemas más difíciles de resolver de proyectos hidráulicos.

Las condiciones a las que deben trabajar los sistemas de tuberías son con frecuencia rigurosas. Puede por ejemplo, suponerse que las tuberías para el agua de alimentación de una caldera llevarán presiones de 3.5 a 7 kg/cm<sup>2</sup> mayores que las de la caldera misma. En algunas plantas se emplean temperaturas mayores de 583°C; se bombean algunas veces líquidos corrosivos, otras veces líquidos con arena; el vapor húmedo tiene que manejarse a altas velocidades, y algunas de las tuberías para el agua tienen que resistir el ariete hidráulico, al mismo tiempo que la presión hidrostática. Todas estas diferentes condiciones de operación exigen diferente construcción, si es que se desea que el sistema resulte lo menos costoso.

Para clasificar los sistemas de tuberías puede tomarse en cuenta el tipo de fluido que llevan, por ejemplo vapor, agua fría, agua

caliente, aceite, etc., pero se puede hacer una clasificación más general tomando como base las condiciones de servicio, como sigue:

1. Tuberías para vapor recalentado o saturado a alta presión.
2. Tuberías para agua condensada a alta presión.
3. Tuberías para vapor a baja presión.
4. Tuberías para alimentación de calderas.
5. Tuberías para calentadores.
6. Tuberías de descarga.
7. Tuberías para agua condensada.
8. Tuberías para servicio de agua fría y caliente.
9. Tuberías para circulación de agua.
10. Tuberías para aceite (lubricante, combustible, aislador).
11. Tuberías para instrumentación.
12. Tuberías para aire comprimido.
13. Tuberías para sopladores de hollín.
14. Tuberías para drenajes, etc.

#### Tubo comercial.

El tubo comercial usualmente es forjado o colado. El forjado puede ser soldado o sin soldar. El material puede ser hierro, acero al carbón o acero de aleación, hierro forjado, latón o cobre. En las plantas de fuerza, la mayor parte de los tubos son de acero dulce, aunque se usan en bastante cantidad tubos de hierro dulce, por su resistencia a la corrosión, como se hace en las tuberías de condensación. Entre los tubos más comunes tenemos:

**1. Tubo de hierro vaciado:** Este tubo se emplea principalmente para drenaje por la resistencia que tiene para el desgaste y la corrosión.

**2. Tubo de acero dulce:** La mayoría de las tuberías se hacen de acero dulce barato. Se aumenta su resistencia mediante una capa de protección de zinc. A este tubo se le llama tubo galvanizado y se emplea en tubos de pequeño diámetro para el agua, mientras que los de gran diámetro, para el gas, vapor, aire o aceite son de tubo negro. Los tubos de gran diámetro se soldan al martillo o se remachan en hélice.

**3. Tubos de acero de aleación:** Los aceros de que se fabrican estos tubos deben las propiedades especiales que tienen a los elementos aleantes que tienen. Estos tubos se requieren para las temperaturas que sobrepasan en exceso los 455°C y pueden emplearse con ventaja arriba de los 395°C. Los tubos de gran diámetro, para muy elevadas temperaturas y presiones se hacen torneando y barrenando barras forjadas.

**4. Tubos de hierro dulce.** El metal de estos tubos está formado por dos compuestos: hierro y silicato de hierro en forma muy dividida distribuido uniformemente en cantidades entre 1 y 3%. Este metal tiene una gran resistencia para todas las formas de corrosión, aunque no se recomienda su uso cuando la presión excede 17.6 kg/cm<sup>2</sup>.

5. **Tubos de Cobre y Latón.** Se usan muchas composiciones de latón para la fabricación de tubos, teniendo todas ellas más de 60% de Cu, siendo el resto principalmente Zn. El tubo de latón se estira en frío hasta el tamaño deseado y luego se recuece, puede roscarse y es rígido comparado con el de cobre puro. Los tubos de cobre pueden emplearse cuando se requiere mayor flexibilidad o cuando alguna propiedad particular del fluido que va a circular por el tubo es perjudicial al latón. Por su costo, el uso de estos dos tipos de tubo se limita a los casos en que es necesaria la flexibilidad, apariencia o resistencia a una forma determinada de corrosión. Se usan también en tuberías para aceite y en ocasiones para tuberías de alimentación de calderas. Los tubos de latón no deben usarse para presiones superiores a los 21 kg/cm<sup>2</sup>, ni para temperaturas mayores a 204°C.

6. **Tubos plásticos.** Se emplean mucho los tubos de PVC actualmente para aplicaciones que no presentan muchos esfuerzos, por ejemplo, en drenajes.

#### CONEXIONES PARA TUBERÍAS.

Las secciones adyacentes de tubos se unen de varias maneras, pero en general, las conexiones se pueden clasificar en cuatro grupos:



**1. Juntas con empaques.** Como los tubos de macho y campana, o uniones sencillas, que se usan principalmente para bajas presiones, en los tubos de barro para drenajes, de diámetro exterior grande.

**2. Juntas de rosca.** Generalmente se usan en los tamaños menores de 10.6 cm, aunque también se encuentran en el mercado en tamaños mayores.

**3. Las juntas de platina en pares.** Ya sean sueltas, con roscas, o sujetadas por contracción, remachadas o soldadas a los tubos. Las conexiones con platinas son las que se usan generalmente en los tubos de tamaños mayores, y en los trabajos que se usan grandes presiones o altas temperaturas.

**4. Juntas soldadas.** Las soldaduras hechas por los procesos de fusión (en oposición a las soldaduras al martillo) usando equipos para soldar de acetileno o eléctricos. Su costo inicial es una ventaja en tubos de gran tamaño. Soportan altas presiones y temperaturas.

Para elegir el tipo de unión que se va a emplear hay que tomar en cuenta varios factores, por ejemplo, tamaño de tubo, presión y temperatura, el mantenimiento que se prevee, el personal especializado con que se cuenta en la instalación y obviamente, el costo inicial.

El sistema de tuberías para cumplir la función de formar un conducto en el que puedan circular líquidos y vapores de una planta de fuerza, rara vez es un tubo recto entre dos puntos. La circulación de los diferentes fluidos se une, se separa, se interrumpe y se regula en el sistema de tuberías. Solo rara vez es posible lograr un tramo de tubería recta entre conexiones extremas; el recorrido del tubo debe seguir la configuración del equipo, paredes, pisos, vigas, etc. Las conexiones y las válvulas permiten resolver esas variadas condiciones de servicio.

En general, las conexiones consisten en piezas para dar vueltas, uniones y reducciones. Las conexiones en que las entradas son del mismo tamaño son los codos de 45 y 90°, las térs, las cruces, Ys, laterales y reducciones. La forma de la conexión varía mucho con el tipo de junta. Se pueden obtener todo tipo de conexiones tanto para juntas con rosca como para juntas con platinas. También muchas de ellas para conexiones soldadas.

En el diseño de una tubería hay que tener especial cuidado en que esta puede a estar sujeta a dilataciones debidas a altas temperaturas. Cuando una tubería se dilata, queda sometida a esfuerzos que no deben pasar de ciertos límites; así mismo, sus extremos, o bien los equipos que se conectan en estos, se someten a esfuerzos que no deben rebasar los límites especificados por los fabricantes. Estos esfuerzos pueden ser calculados de antemano por varios métodos, y cuando se encuentra que estos sobrepasan los límites de seguridad, se procede a aliviarlos de alguna de las

siguientes maneras:

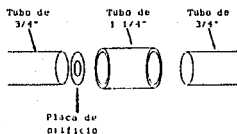
1. Dando mayor flexibilidad a la ruta de la tubería.
2. Instalando circuitos en forma de U para que absorban las dilataciones.
3. Instalando mangueras o juntas de expansión.
4. Dando un acortamiento en frío.

#### Fabricación de los tubos para la planta hidráulica.

En el caso de la Planta Hidráulica, no se trabajará con presiones altas, y la temperatura de operación será la temperatura ambiente. Además, el flujo utilizado será agua, por lo que no es corrosivo. Debido a esto, y al fin didáctico de la planta, opté por utilizar tubos de acrílico transparente, ya que de esta manera, se puede ver el dispositivo de medición de flujo, así como las turbulencias que se producen tanto en los dispositivos de medición de flujo como en las entradas y salidas de las válvulas y de los tanques.

Para construir los tramos de tubos, se cortó un tubo de acrílico de 3/4 de pulgada de diámetro. Se carearon en torno los tramos, y se rebajaron en los extremos en los que va montada la placa de orificio hasta que dieran el diámetro interno de un tubo de acrílico de 1 1/4. Posteriormente, se pegó la placa de orificio a la superficie careada del tubo, se le puso un pequeño tramo de tubo de 1 1/4" pulgadas como refuerzo y luego se metió en el refuerzo el otro tramo de tubo de 3/4. Para darle resistencia a la unión, se pegaron las piezas con Kola-loka.

Las uniones a las válvulas se realizaron haciéndoles cuerda a los tubos de acrílico con el torno y luego sellándolas con silicón. Las uniones a los tanques consisten en unas piezas de latón hechas para entrar a presión. Estas entran al tanque y luego se sellaron también con sellador de silicón.



Integración de la placa de orificio  
A los tubos de acrílico

### c) Dispositivos de medición de nivel y flujo

En una planta de cualquier tipo es de gran importancia la instrumentación de la misma para lograr un control adecuado. La precisión con la que se puede controlar la planta depende directamente de que tan bien se puedan conocer sus parámetros de operación, y el estado de las variables con que opera. Si los errores que presentan los instrumentos de medición o los transductores son grandes, no se puede lograr un control preciso, ya que existe un error inherente al sistema, y el sistema de control trabajaría con datos erróneos.

### 1) Medición de flujo.

El flujo hidráulico es una de las variables mas medidas en la industria química. Por esta razón, existen alrededor de 15 tecnologías diferentes para medición de flujo.

Un concepto que surgió durante la década de los ochentas, y que en ese tiempo tuvo mucho auge fue el de un medidor "universal" de flujo. Las características de este tipo de medidor debían ser:

- Gran exactitud en un amplio rango de condiciones de operación.
- Capacidad de operar con fluidos de una fase o mas.
- Facilidad de instalación en cualquier sección de un sistema de tuberías sin necesidad de apagar el proceso.

- Ser lo suficientemente robusto para poder operar confiablemente por varios años sin necesidad de mantenimiento.
- Generar una caída de presión muy pequeña o nula.

Este medidor "universal" sigue siendo una utopía, y al parecer lo seguirá siendo por algún tiempo.

Cada proceso tiene características propias, y mientras no exista el medidor "universal", es necesario conocer los diferentes tipos de medidores, así como los procesos en que se van a aplicar, para determinar cual es el que mejor se adapta a las características del proceso, y así elegir uno que dé la precisión y exactitud requerida, sin incrementar demasiado el costo de la planta.

Los diferentes tipos de medidores se pueden clasificar dentro de dos grupos principales.

1. Medidores de flujo volumétrico
2. Medidores de flujo de masa

En el pasado, los ingenieros dedicados a instrumentación, estaban interesados principalmente en la precisión de los instrumentos. Sin embargo, con los aumentos en los costos de materia prima y de energía, los usuarios están cambiando a dispositivos de medición mas exactos, además de precisos.

En general, los medidores de flujo de masa son mas exactos que los de flujo volumétrico. Esto se debe principalmente a que en los medidores de flujo volumétrico se presuponen varias cosas, por ejemplo, que el proceso va a trabajar dentro de ciertos rangos de operación, que la densidad se mantiene constante, etc. Mientras que los medidores de flujo de masa trabajan con una variable que no depende de la viscosidad, densidad, conductividad, presión, ni temperatura. Pero tienen la desventaja de que son mucho mas caros. En algunas aplicaciones, por ejemplo cuando se está trabajando con fluidos caros, pese al mayor costo del medidor, es importante tener un medidor lo mas exacto posible, pues aunque cueste inicialmente mas, se compensa el sobrecosto rápidamente con los ahorros en materia prima debidos al alto costo del fluido empleado.

Existen también aplicaciones que no requieren de tanta exactitud, en las que basta con que el medidor sea preciso. Ejemplos de estas aplicaciones son aquellos procesos en los que la densidad se mantiene relativamente constante, o en los que el fluido es poco costoso. Para estos casos, normalmente resulta mas económico y mejor un medidor de flujo volumétrico.

Para elegir el tipo de medidor a utilizar, hay que tomar en cuenta varios puntos. Entre ellos están el tipo de fluido, de proceso, la instalación y las características propias de cada medidor.

## Selección del tipo de medidor de flujo para la planta hidráulica.

### **Consideraciones respecto al fluido.**

El fluido a utilizar será agua corriente de la llave. Considerando esto y las condiciones a las que trabajará la planta, es un fluido líquido, no crítico, con una sola fase presente. El fluido es Newtoniano.

### **Consideraciones en cuanto al proceso.**

Trabjará a temperatura ambiente, a presión atmosférica o cuando más, una presión relativa menor que 1m de agua. Los cambios serán muy pequeños por lo que las propiedades del fluido permanecerán prácticamente constantes. El flujo será turbulento, estable y habrán condiciones en que los tubos estén completamente llenos durante casi todo el proceso. No se requiere medir flujo en reversa si se presenta, ni puede existir vacío, ya que las caídas de presión son pequeñas.

### **Consideraciones en cuanto a la instalación.**

Los tubos son de diámetro no mayor que una pulgada. Lo ideal es emplear las tuberías lo mas corto posibles tanto antes como después del medidor por que debido a que el objetivo de esta planta es didáctico, y mientras menor espacio ocupe, es mas fácil de visualizar el proceso completo.



Las obstrucciones presentes son en la salida de los tubos del tanque y las válvulas de control.

No se espera que se presenten vibraciones fuertes.

El medidor debe ser instalado horizontalmente.

La planta estará en un laboratorio por lo que hay energía eléctrica disponible.

#### **Características del medidor.**

Tanto la precisión como la exactitud son muy importantes en el medidor, para poder controlar bien el nivel de agua en el tanque. Por la disposición de los tanques, debe de montarse horizontalmente.

Es importante que no sea muy costoso.

En cuanto a los diferentes tipos de medidores de flujo que hay, podemos descartar los siguientes:

Rotámetro (medidor de área variable). Tiene que ir montado verticalmente.

De coriolis, magnético y de ultrasonido, son muy costosos.

De dispersión térmica: es muy costoso.

De vórtice: Se requiere un número de Reynolds  $Re$  demasiado alto.

Vénturi y de tobera: Requieren un número de Reynolds menor que el de vórtice pero sigue siendo muy alto.

De "segmentan Wedge": Es mas o menos caro.

De turbina: le afecta mucho la tubería, en el sentido de que requiere tramos largos de tubo recto antes y después del medidor.

Además ocasiona una caída de presión muy alta. Otra desventaja es

que tiene partes móviles a las que hay que dar mantenimiento.

De "Veleta Osciladora": También le afecta mucho la tubería.

Los medidores que mejor se apegan a los requerimientos de la planta hidráulica son:

El de cono en "V", ya que no requiere tanta tubería recta, la caída de presión no es demasiado grande, no es demasiado costoso, y es bastante preciso.

El de placa de orificio: Le afecta algo la tubería pero es de costo muy reducido, y proporciona la precisión y exactitud suficientes para la planta.

Debido a que un factor muy importante es el costo, el que empleé en la planta hidráulica fue el de placa de orificio.

Mediante la placa de orificio, se causa una caída de presión en la tubería en donde está la placa. Esta caída de presión se puede medir y convertir en una señal útil. Para esto utilice un sensor de presión diferencial.

Como ya se vio en el capítulo 3, el flujo está relacionado con esta caída de presión mediante la ecuación

$$Q = C A_0 \sqrt{2 \frac{g}{\gamma} (p_1 - p_2)}$$

Esta ecuación se puede representar de una forma mas simple si agrupamos las constantes en una sola.

$$Q = c\sqrt{\delta P}$$

Para calcular el diámetro del orificio de la placa de orificio, despejamos  $A_2$  en la ecuación

$$Q = cA_2\sqrt{2gH} = \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{2 \frac{g}{\gamma} (P_1 - P_2)}$$

Quedando

$$A_2 = \sqrt{\left(1 - \frac{h}{c^2 H}\right) A_1^2}$$

Donde  $h$  es la caída de presión ocasionada por la placa de orificio,  $H$  es la altura máxima del tanque,  $c$  es una constante (según el libro de System Dynamics de Ogata, esta constante vale alrededor de .61), y  $A_1$  es el diámetro del tubo.

$H$  vale 35 cm, ya que es la altura del tanque,  $A_1$  vale 1.266 cm<sup>2</sup>, ya que es el área transversal de un tubo de media pulgada.

Una caída aceptable, para poderla medir con buena exactitud, sería de alrededor de 10 cm de agua, considerando la altura del tanque.

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación, nos da un valor del diámetro del orificio de 0.777 cm. Sin embargo, utilicé un orificio de .7 cm, para compensar por las pérdidas que pueda tener la planta en las válvulas, o en las uniones entre los tubos y los tanques, ya que estas no fueron consideradas en este desarrollo.

Ya armado el prototipo, realicé mediciones experimentales, para determinar de manera directa las constantes propias que se deben emplear en la planta. Estas mediciones consistieron en mantener un flujo constante, tomar el tiempo en que se llenaba un recipiente con un volumen de 1 litro, y medir la caída de presión en la placa de orificio mediante un tubo en U. De esta manera, obtuve una tabla de presión contra flujo, luego ajusté la curva y obtuve la constante.

Este proceso se repitió varias veces para obtener valores promedio, y hacerlo así mas preciso. Los valores obtenidos fueron:

<u>ΔP [cm]</u>	<u>tiempo</u>
0.50	1'16.10
1.00	41.55
1.50	36.05
2.00	32.55
2.50	29.15
3.05	26.20
3.50	24.90
4.00	23.68
4.55	22.15
6.10	20.70

Los valores de presión hay que multiplicarlos por dos, ya que se midió el cambio de altura de la columna de agua en una rama del tubo en U, sin considerar la caída en la otra rama.

Al convertir estos valores a unidades de presión y flujo, obtenemos la tabla siguiente. Además de en unidades de presión y flujo, también incluyo en la tabla los valores de voltajes a la entrada del convertidor A/D, y el valor al que equivaldrían.

<u>ΔP [mPsi]</u>	<u>Flujo [cm<sup>3</sup>/s]</u>	<u>Volts</u>	<u>Divs del ADC</u>
14.208	19.390	0.2557	17
28.418	24.067	0.5116	35
42.628	27.740	0.7672	54
56.836	30.770	1.0230	72
71.046	34.305	1.2788	90
85.254	38.170	1.5346	108
99.464	40.161	1.7904	126
113.672	42.370	2.0460	144
129.304	45.150	2.3274	165
173.352	48.310	3.1200	220

Los valores en mPsi se obtuvieron con la conversión de que 1mm de agua es igual a 1.4209 mPsi.

El flujo en cm<sup>3</sup> se obtuvo multiplicando el inverso del tiempo que se tardó en llenar un volumen de 1000 cm<sup>3</sup> (un litro) por 1000.

El sensor que se empleó para medir la caída de presión en la placa de orificio tenía una sensibilidad de 18mV/psi. Esta señal se amplificó 1000 veces, de tal modo que el voltaje de entrada a los ADCs es de 18V/psi, y es el valor que aparece en la columna 3 (volts).

Cada división del ADC equivale a 3.6V/256 divisiones, es decir 0.014063 V/div. De esta equivalencia obtuve la columna 4 (Divisiones del ADC).

Como se puede observar de esta tabla de valores, se presenta una discontinuidad entre los primeros dos valores y los siguientes. Esto se debe a que el flujo no es aún turbulento, y la placa de orificio no funciona apropiadamente para el flujo laminar. Por esta razón, no los tomé en cuenta para el cálculo de la constante c.

Para obtener la constante c experimental propia de este proceso, sustituí los valores de las lecturas del ADC en la ecuación

$$Q = c\sqrt{\delta P} \Rightarrow c = \frac{Q}{\sqrt{\delta P}}$$

y obtuve el promedio de los valores. Estos valores fueron

<u>Lectura ADC</u>	<u>c</u>
54	3.7749
72	3.6262
90	3.6160
108	3.6729
126	3.5778
144	3.5308
165	3.5149
PROMEDIO	3.6162

Quedando la ecuación del flujo como

$$Q = 3.6162\sqrt{\delta P}$$

Pero como el microcontrolador no tiene instrucciones para obtener raíz cuadrada, linealicé esta función.

$$f(x) = f(a) - f'(a)(x-a) + \frac{f''(a)(x-a)^2}{2!} - \dots$$

Considerando que los valores están alrededor de 100, linealicé la función alrededor de 100.

$$Q = 3.6162 \left[ 10 - \frac{1}{20} (100-P) - \frac{1}{4000} (100-P)^2 \right]$$

A continuación presento una tabla con los valores exactos de la ecuación, los valores obtenidos mediante la linealización, considerando solo hasta el término de primer grado, y los valores obtenidos considerando hasta el término de segundo grado, así como los valores obtenidos experimentalmente.

<u>lect. ADC</u>	<u>c/δP</u>	<u>c[10-(100-P)/20]</u>	<u>...-(100-P)<sup>2</sup>/4000]</u>	<u>Q<sub>exp</sub></u>
17	14.84	21.06	14.86	19.390
35	21.29	24.30	20.49	24.498
54	26.45	27.72	25.82	27.740
72	30.55	30.96	30.25	30.770
90	34.15	34.20	34.11	34.305
108	37.41	37.44	37.38	38.170
126	40.41	40.68	40.07	40.161
144	43.25	43.92	42.18	42.370
165	46.24	47.70	43.90	45.150
220	53.39	57.60	44.64	48.310

Todos estos valores de flujo están expresados en cm<sup>3</sup>/s.

Como se puede ver, con excepción de los primeros 2 valores, mismos que había señalado anteriormente que se podían descartar, ya que el dispositivo de medición de flujo no trabaja apropiadamente con esas

magnitudes de flujo, los valores obtenidos con un solo término de la serie de Taylor son casi tan parecidos a los de la ecuación no linealizada como los obtenidos con dos términos de esta ecuación. Por esta razón, opté por utilizar un solo término de la serie al realizar el programa en el microcontrolador.

### ii) Mediciones de nivel

Existen también varios métodos para medir el nivel de un líquido en un tanque. Entre estos están:

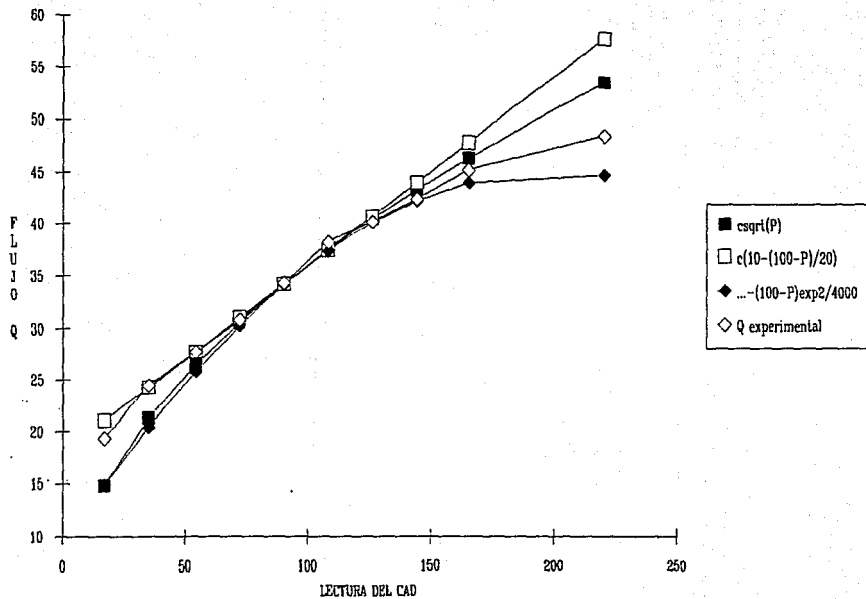
- a) Interruptores colocados en la pared del tanque
- b) Flotador
- c) Capacitancia entre 2 electrodos
- d) Ultrasonido
- e) Presión hidrostática

A continuación presento una breve descripción de los diferentes métodos.

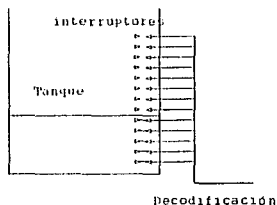
#### **a) Interruptores colocados en la pared del tanque.**

Consiste en colocar varios interruptores en el tanque. De esta forma, al subir el nivel de agua, siendo ésta conductora, va cerrando los interruptores. Luego, estos interruptores se conectan a algún circuito electrónico para detectar que interruptor es el último en cerrarse, y así, conociendo las distancias que existen entre ellos, se puede calcular el nivel del líquido.





Este método tiene la ventaja de que es fácil de implementar y es de costo reducido. Sin embargo, la máxima resolución que se puede lograr es la distancia que separa a los interruptores. Por esta misma razón, si se quiere una resolución muy alta, se requieren muchos interruptores, y el trabajo de alamberrarlos y decodificarlos se vuelve muy engorroso.



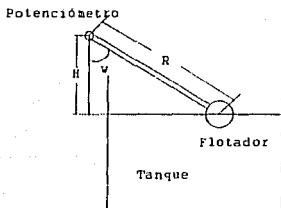
#### b) Flotador.

Este método es muy utilizado, debido a su bajo costo y a su simpleza.

Consiste en un flotador conectado a una varilla, y esta a su vez está conectada a un potenciómetro. Según la posición del flotador, varía el voltaje en el potenciómetro, y este voltaje es proporcional al nivel de líquido.

El principal inconveniente de este método es que tiene partes móviles que requieren mantenimiento, por lo que con el tiempo se deteriora su exactitud. Otro inconveniente importante es que la

relación entre la posición del potenciómetro y el nivel del líquido no es lineal, sino trigonométrica, por lo que meterla en un microcontrolador no es tan sencillo.



$$\omega = \arccos \frac{H}{R}$$

### c) Capacitancia entre 2 electrodos.

Consiste en poner 2 electrodos muy cerca uno de otro en el tanque. Entre ellos existe una capacitancia, la cual disminuye al subir el nivel del agua. Para obtener una señal proporcional a esta capacitancia, se puede utilizar un oscilador, que varíe su frecuencia al variar la capacitancia. Para detectar esta variación de frecuencia se emplea un convertidor de frecuencia a voltaje, y el voltaje es la variable eléctrica que mediríamos.

Este método presenta varios problemas:

i) Los electrodos tienen que estar perfectamente alineados y colocados muy cerca uno de otro para que la capacitancia sea lo suficientemente grande como para poder detectar los pequeños cambios que sufriría al subir el nivel del agua.

ii) El ruido eléctrico en las líneas le afectan mucho a este tipo de medidor, por lo que se tendrían que emplear cables blindados.

iii) El convertidor de frecuencia a voltaje debe tener una gran resolución, ya que las variaciones de frecuencia son muy pequeñas.

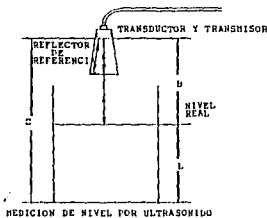
iv) Es un método caro.

**d) Por ultrasonido.**

Este método consiste en mandar una señal acústica de alta frecuencia, recibir el eco de ella, y calcular, mediante la velocidad del sonido y la mitad del tiempo que se tardó en recibir el eco, la distancia entre el transductor y la superficie del líquido.

$$d=vt$$

Donde  $d$  es la distancia del transductor a la superficie del líquido,  $v$  es la velocidad del sonido en el medio y  $t$  es la mitad del tiempo entre que se generó la señal ultrasónica y que se detectó el eco.



Los principales inconvenientes de este método son:

i) La resolución teórica depende de la frecuencia que se emplee. Si se quiere una resolución muy alta, la frecuencia a utilizar debe ser muy alta. Por ejemplo, si se quiere una resolución de 14.4 mm, se debe emplear una frecuencia de 23 kHz, si se requiere de una resolución de 3.3mm, se deberá emplear una frecuencia de 100kHz.

Además de esta resolución teórica, hay que considerar la velocidad del procesador que se está empleando, y ver si es posible detectar una señal de tan alta frecuencia, por lo que esta resolución máxima teórica puede ser menor al llevarla a la práctica.

ii) Por la forma de los tanques, se pueden generar ecos secundarios, que habría que diferenciarlos de los principales, para no tener errores en las mediciones.

iii) Si se presenta turbulencia en el tanque, se puede atenuar el eco, de tal forma que puede no ser detectado, metiendo errores en las mediciones.

iv) Es un método caro.

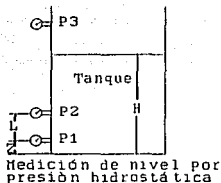
**e) Por presión hidrostática.**

Este es un método que últimamente ha tenido mucho auge, debido principalmente al desarrollo de sensores de presión de gran exactitud.

Consiste en colocar de 1 a 3 sensores de presión en el tanque en que se va a medir el nivel, y calcular el nivel de líquido dependiendo de estas presiones.

$$P = \rho g H \rightarrow H = \frac{P}{\rho g}$$

Donde  $g$  es la gravedad,  $H$  el nivel de líquido,  $P$  la presión hidrostática en el fondo del tanque,  $\rho$  la densidad del líquido.



La densidad del líquido se puede obtener de la misma instrumentación, conociendo la distancia que hay entre los sensores  $P_1$  y  $P_2$ , mediante la ecuación

$$\rho = \frac{P_1 - P_2}{L}$$

Esto permite tener mediciones más exactas del nivel, y de la masa contenida en el tanque debido a que si varía la densidad de él mismo, se detecta inmediatamente, y se toma ese valor, sin necesidad de presuponerlo.

Este método tiene las ventajas de que es fácil de instalar, es muy preciso, y no tiene partes móviles que requieran de mantenimiento constantemente, además de ser de costo reducido.

Las desventajas que tiene este método se presentan sobre todo en procesos en que se estratifiquen fluidos de diversas densidades,

entonces se obtiene un error, al suponer la densidad constante en todo el volumen.

El método que elegí por el costo y las características de la planta hidráulica y de su funcionamiento fue el de presión hidrostática.

Debido a que la columna de agua de la planta hidráulica es muy pequeña y a que el agua es un fluido prácticamente incompresible, y que va a trabajar en condiciones de laboratorio, a temperatura ambiente, en la instrumentación de la misma prescindí de  $P_2$ , y supuse una densidad de  $1g/cm_3$ .

El sensor de presión que empleé para medir el nivel de agua tiene una resolución de  $12mV/psi$ , y lo amplifiqué 300 veces para que diera  $3.6V/psi$ , que son valores que puede manejar directamente el Convertidor Analógico-Digital del MC68HC11.

Este valor, convirtiendo  $1psi$  a centímetros de agua nos da

$$Res = 3.6 \frac{V}{psi} = \frac{3.6V}{70.33cm_{H_2O}} = 51.153 \frac{mV}{cm_{H_2O}}$$

La resolución del Convertidor Analógico-Digital es de  
 $3.6V / 256 = 14.063 mV/división$



de donde la resolución del sistema de medición de nivel es

$$Res = \frac{14.063 \frac{mV}{división}}{51.153 \frac{mV}{cm}} = .275 \frac{cm}{división}$$

Por lo tanto, para obtener el nivel de agua en centímetros solamente se requiere multiplicar el valor obtenido en el ADC por 0.275.

### iii) Circuitos Electrónicos.

Mediante los métodos descritos anteriormente podemos calcular tanto el flujo como el nivel de líquido en la planta. Sin embargo, es necesario juntar esta información de manera que nos sea de utilidad. Una forma adecuada para centralizar esta información, es mediante un sistema electrónico digital, basado en un microprocesador. En el caso de la planta hidráulica, empleé el microcontrolador MC68HC11 de Motorola.

### Características de los equipos electrónicos utilizados.

#### **Sensores de presión.**

Los sensores de presión empleados son los modelos SCX01D y SCX05D de SenSym, que es una marca de la compañía Hawker-Siddeley. Estos sensores están internamente calibrados para un amplio rango de temperaturas. Están diseñados para dar una salida estable y precisa

en un intervalo de temperaturas de 0°C a 70°C. Y están diseñados para ser usados con fluidos no iónicos y no corrosivos.

El modelo SCX01D tiene capacidad hasta de 1 psi de presión diferencial, con una precisión de 18mV/psi. La señal de salida de estos sensores fue amplificada 1000 veces, para obtener voltajes mas manejables. El SCX05D puede medir hasta 5 psi, con una precisión de 12mV/psi. La salida en estos sensores fue amplificada 300 veces. Estos dispositivos están calibrados hasta 1% de toda la escala, y dan una salida con presión cero de máximo 300µV.

El voltaje de salida es proporcional a la presión aplicada.

La resolución del convertidor A/D es de 1/256, que en un intervalo entre 0 y 3.6V equivale a 14.063mV por división.

#### **Microcontrolador.**

El proyecto se realizó con el MC68HC11 por las siguientes razones:

1. Es un problema muy específico, y no requiere de demasiada flexibilidad para el usuario.
2. El microcontrolador tiene puertos suficientes para manejar los periféricos que requerirá, y por esta razón evita hacer mayor decodificación, y facilita el alambrado.
3. Tiene un convertidor A/D con 8 canales, de los cuales se pueden emplear 4 para tomar todos los datos que requiere el problema.

4. El micro controlador tiene operaciones de división y multiplicación que facilitan la programación y permiten hacer un programa más eficiente.

5. El MC68HC11 es lo suficientemente rápido para poderle agregar posteriormente rutinas de control, o algunas otras funciones que se requieran para expandir aun mas la planta hidráulica.

Las funciones que realiza el sistema se pueden resumir en:

1. Sensar la presión hidrostática del fondo de los tanques para determinar la altura que alcanza el agua y sensar también la caída de presión ocasionada por la placa de orificio para determinar el flujo.

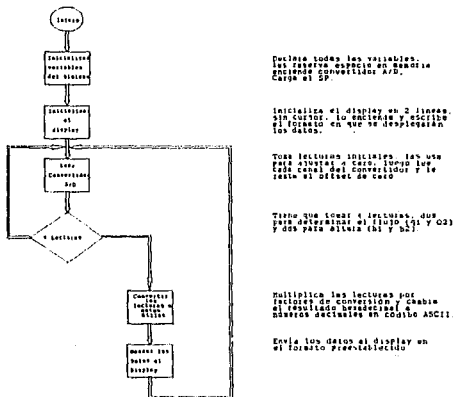
2. Convertir la señal analógica de los sensores de presión, en una señal digital. Para lograr esto, se debe antes amplificar la señal de los transductores de presión, ya que los voltajes de los sensores de presión son del orden de 18mV, y el convertidor analógico-digital opera con voltajes entre 0 y 3.6 V.

3. Hacer una lectura en vacío para calibrar a cero

4. Adaptar los valores digitales leídos y convertirlos a centímetros en el caso de las lecturas de altura de nivel de agua (sensores de presión hidrostática en el fondo de los tanques), o a  $\text{cm}^3/\text{s}$  en el caso de las lecturas de flujo (sensores de presión diferencial en las placas de orificio).

5. Convertir estos valores a caracteres ASCII, para poderlos desplegar en un Display de cristal líquido.

En general, el diagrama de bloques del sistema es el que sigue.



Para poder llevar a cabo este sistema se tuvo que hacer los siguiente.

1. Estudiar bien el micro controlador, su estructura, modos de direccionamiento, set de instrucciones, manejo de puertos, manejo del ADC, y su programación.
2. Estudiar bien el display de cristal líquido y su programación.

3. Alamberrar y probar por separado los diferentes módulos del sistema que son:

- i - Sensores de presión
- ii - Amplificadores
- iii - Display de cristal líquido
- iv - Microcontrolador

4. Juntar todo el sistema y probarlo todo junto.

En las páginas siguientes se muestran los diagramas de flujo de

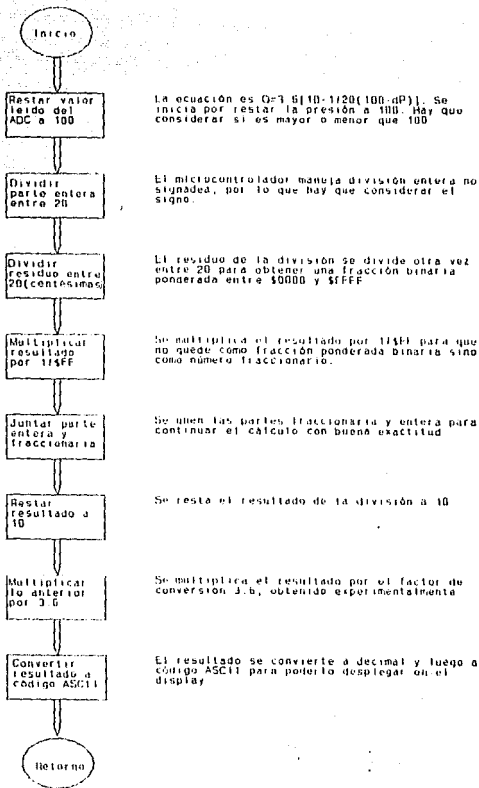
1. Los pasos que se tuvieron que seguir para convertir los valores leídos en los ADCs a valores de flujo

2. Los pasos requeridos para convertir los valores hexadecimales a caracteres ASCII.

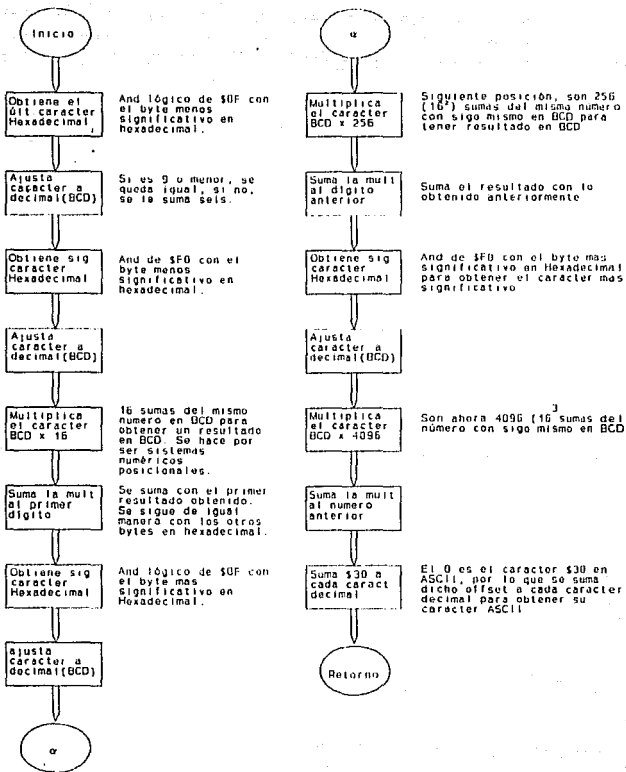
3. Diagrama electrónico de las conexiones del MC68HC11 con la memoria y el conector para conectar la tarjeta del display y los sensores de presión.

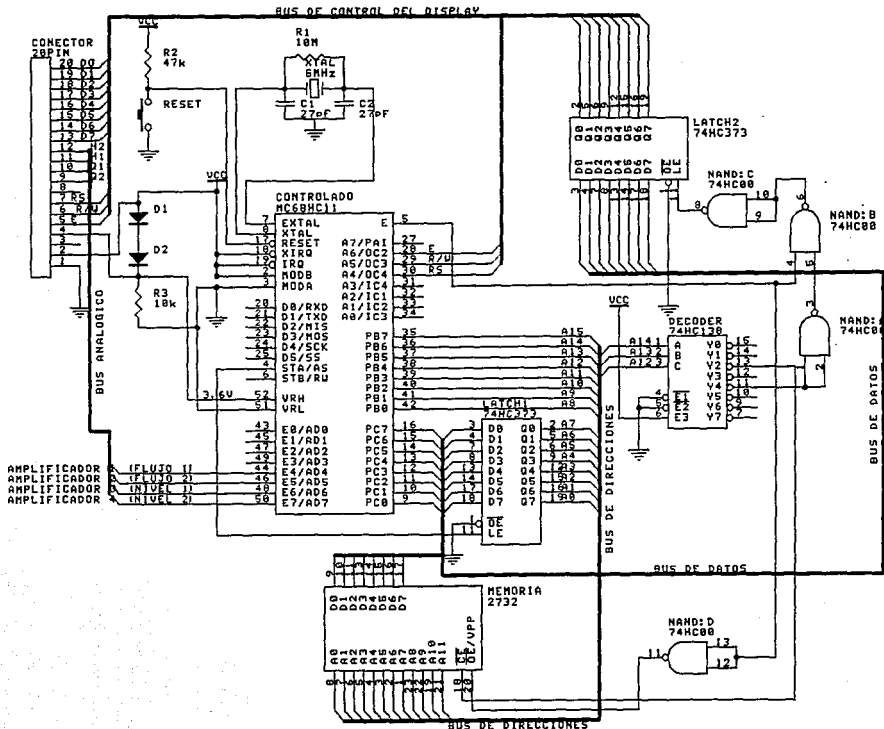
4. Diagrama electrónico de la tarjeta donde están el display de cristal líquido y los sensores de presión con sus respectivos amplificadores.

DIAGRAMA DE LA CONVERSIÓN DE LAS LECTURAS DE LOS ADCs  
A VALORES REALES DE FLUJO.

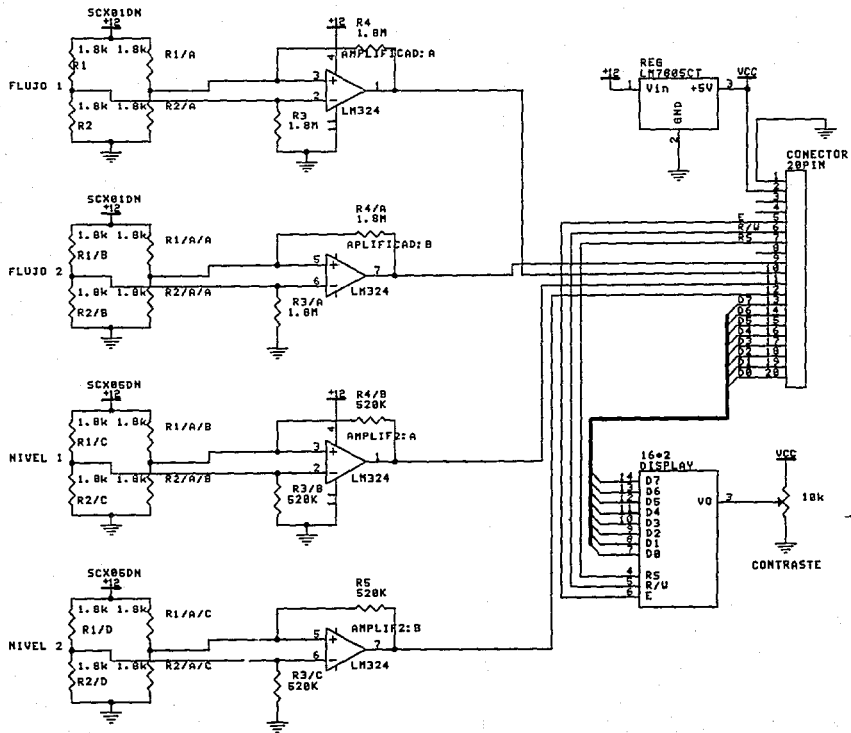


CONVERSION DE UN NUMERO HEXADECIMAL A DECIMAL  
Y LUEGO A CODIGO ASCII









#### d) Bombas.

Toda sistema físico requiere de un elemento que le proporcione energía para trabajar. Una planta hidráulica, no es la excepción. En una planta de este tipo, esta energía puede ser obtenida mediante la gravedad, en el caso en que se cuente con un depósito del fluido a una altura mayor, y por lo tanto, con una mayor energía potencial, que se manifiesta como presión hidrostática. Si no se cuenta con este almacenamiento de energía, o si se requiere de una mayor energía (por ejemplo, mayor presión o mayor velocidad), entonces es necesaria una bomba, que proporcione esta energía.

En el diseño de un sistema de bombeo hay muchos elementos que deben considerarse, no importando la clase de bomba que finalmente se escoja para la instalación. Estos elementos incluyen: Columna de agua, capacidad de la bomba, naturaleza del líquido, tuberías, motores y economía. De manera que en general una discusión completa de cualesquiera de estos factores se aplica igualmente a una bomba centrífuga que a una rotatoria o que a una reciprocante.

En el caso de la planta hidráulica, debido a que no se requiere una presión muy elevada para poder estudiar los sistemas hidráulicos que en ella se manifiestan, además de tratarse de cantidades de agua relativamente pequeñas, con un fluido limpio, se puede utilizar cualquiera de las dos opciones; un tanque de agua colocado por arriba de la planta hidráulica o una bomba de poca capacidad.

A continuación presento un breve estudio sobre los diferentes tipos de bombas que hay, con sus características principales y los casos para los cuales son útiles estos diferentes tipos de bombas.

Las bombas se pueden clasificar en tres clases principales, cada una de éstas, con varios tipos diferentes. Estas clases son:

i) **Bombas centrífugas.** Entre esta clase de bombas están las de tipo Voluta, difusor, turbina regenerativa, turbina vertical, flujo mixto y flujo axial. Estos tipos pueden ser a su vez de un solo paso o de pasos múltiples.

ii) **Bombas rotatorias.** Sus tipos son de engrane, álabe, leva y pistón, tornillo, lóbulo y bloque de vaivén.

iii) **Bombas reciprocantes.** Se pueden subdividir en: Acción directa, potencia (incluyendo manivela y volante), diafragma, rotatoria-pistón.

En la tabla a continuación se pueden ver las características generales de los diferentes tipos de bombas.

	Centrífuga		Rotatoria	Recíprocante		
	Voluta y difusor	Flujo axial	Tornillo y engrane	Vapor de acc dir	Doble acción	Triplex
Descarga tipo	Continua	Continua	Continua	Pulsante	Pulsante	Pulsante
Elevación máx. de succión	4.5m	4.5m	6.6m	6.6m	6.6m	6.6m
Líquidos que maneja	Limpio, claro, sucio abrasivo, líquidos con alto contenido de sólidos		Viscoso, no abrasivo		Limpio y claro	
Variación de la presión descarga	Baja a alta		Media		Pequeña	
Región de capacid. habitual	Pequeña a la mayor obtenible		Pequeña a media		Relativamente pequeña	
Afectac. de una columna aumentada:						
Capacidad	Disminuye		Nada	Disminuye	Nada	Nada
Potencia entrada	Depende de la velocidad específica		Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta
Afectac. de una col. disminuida:						
Capacidad	Aumenta		Nada	Pequeño aumento	Nada	Nada
Demanda de poten.	Depende de la velocidad específica		Disminuye	Disminuye	Disminuye	Disminuye

### 1) Bombas centrífugas.

1. Bombas de tipo Voluta. El impulsor descarga en una caja espiral que se expande progresivamente, proporcionada en tal forma que la velocidad del líquido se reduce en forma gradual. Por este medio, parte de la energía de velocidad del líquido se convierte en presión estática.

**2. Bombas de tipo difusor.** Los álabes direccionales estacionarios rodean al rotor o impulsor en una bomba del tipo de difusor. Esos pasajes con expansión gradual cambian la dirección del flujo del líquido y convierten la energía de velocidad a columna de presión.

**3. Bombas de tipo turbina.** También se conocen como bombas de vórtice, periféricas y regenerativas; en este tipo se producen remolinos en el líquido por medio de los álabes a velocidades muy altas dentro del canal anular en el que gira el impulsor. El líquido va recibiendo impulsos de energía.

**4. Bombas de flujo mixto y de flujo axial.** Las bombas de flujo mixto desarrollan su columna parcialmente por fuerza centrífuga, y parcialmente por el impulsor de los álabes sobre el líquido. El diámetro de descarga de los impulsores es mayor que el de entrada. Las bombas de flujo axial desarrollan su columna por la acción de impulso o elevación de las paletas sobre el líquido. El diámetro del impulsor es el mismo en el lado de succión y en el de descarga.

Además de esta clasificación, existe otra que se basa en el tipo de servicio para el cual la bomba ha sido diseñada. Las bombas

centrífugas se pueden subdividir entonces en alimentación de caldera, de propósito general, de sumidero, pozo profundo, de refinería, condensadas, de vacío, de proceso, drenaje, circulación, agua de retroceso, etc. En general, cada una tiene características específicas de diseño, así como los materiales que el constructor recomienda para el servicio particular.

#### ii) Bombas rotatorias.

Las bombas rotatorias generalmente son unidades de desplazamiento positivo. Consisten de una caja fija que contiene engranes, aspas, pistones, levas, segmentos, tornillos, etc, que operan con un claro mínimo. En lugar de "aventar" el líquido como en una bomba centrífuga, lo atrapan y lo empujan contra la caja fija. Generalmente se les considera como bombas para líquidos viscosos, pero pueden manejar casi cualquier líquido libre de sólidos abrasivos.

Si se desprecian las fugas, las bombas rotatorias descargan un gasto constante independiente de las presiones variables de descarga. El desplazamiento de una bomba rotatoria varía en forma directamente proporcional con la velocidad, solo que la capacidad puede verse afectada por viscosidades y otros factores. Los líquidos gruesos y viscosos pueden limitar la capacidad de la bomba en altas velocidades, debido a que el líquido no puede fluir a la carcasa con la rapidez necesaria para llenarla completamente.

1. Bombas de leva y pistón. También se llaman bombas de émbolo

rotatorio, y consisten en un excéntrico con un brazo ranurado en la parte superior. La rotación de la flecha hace que el excéntrico atrape el líquido contra la caja. Conforme continúa la rotación, el líquido se fuerza de la caja a través de la ranura a la salida de la bomba.

**2. Bombas de engranes externos.** Constituyen el tipo rotatorio mas simple. Conforme los dientes de los engranes se separan en el lado de succión de la bomba, el líquido llena el espacio entre ellos. Este se conduce en trayectoria circular hacia afuera y es exprimido al engranar nuevamente los dientes. Los engranes pueden tener dientes simples, dobles, o de involuta. Algunos diseños tienen agujeros de flujo radiales en el engrane, que van de la corona y del fondo de los dientes a la perforación interna. Estos permiten que el líquido se comuniqué de un diente al siguiente evitando la formación de presiones excesivas que pudiesen sobrecargar las chumaceras y causar operación ruidosa.

**3. Bombas de engrane interno.** Este tipo tiene un rotor con dientes cortados internamente y que encajan en un engrane, cortado externamente. Puede usarse una partición en forma de luna creciente para evitar que el líquido pase de nuevo al lado de succión de la bomba.

**4. Bombas lobulares.** Estas se asemejan a las bombas del tipo de engranes en su forma de acción. Tienen dos o mas rotores cortados

con tres, cuatro o más lóbulos en cada rotor. Los rotores se sincronizan para obtener una rotación positiva por medio de engranes externos. Como el líquido se descarga en un número mas reducido de cantidades mayores que en la bomba de engranes, esta bomba no es tan constante como la de engranes.

5. **Bombas de tornillo.** Tienen de uno a tres tornillos roscados convenientemente que giran en una caja fija. Existe un gran número de diseños apropiados para varias aplicaciones.

6. **Bombas de aspas.** Las bombas de aspas oscilantes, tienen una serie de aspas articuladas que se balancean conforme gira el rotor, atrapando al líquido y forzándolo en el tubo de descarga de la bomba. Las bombas de aspas deslizantes usan aspas que se presionan contra la carcasa por la fuerza centrífuga cuando gira el rotor. El líquido atrapado entre las dos aspas se conduce y fuerza hacia la descarga de la bomba.

### iii) Bombas reciprocantes.

Las bombas reciprocantes son unidades de desplazamiento positivo. Descargan una cantidad definida de líquido durante el movimiento del pistón o émbolo a través de la distancia de la carrera. Sin embargo, no todo el líquido llega necesariamente al tubo de descarga debido a fugas o arreglos de pasos de alivio que puedan



evitarlo. Despreciando éstos, el volumen del líquido desplazado en una carrera del pistón o émbolo es igual al producto del área del pistón por la longitud de la carrera.

Existen básicamente dos tipos de bombas reciprocantes: las de acción directa, movidas por vapor y las de potencia. Pero existen muchas modificaciones de los diseños básicos.

**1. Bombas de acción directa.** En este tipo, una varilla común de pistón conecta un pistón de vapor y uno de líquido o émbolo. Las bombas de acción directa se construyen simplex (un pistón de vapor y uno de líquido respectivamente) y duplex (dos pistones de vapor y dos de líquido). Estas bombas han sido muy apreciadas para diferentes servicios. Se caracterizan por la facilidad de ajuste de columna, velocidad y capacidad. Tienen buena eficiencia a lo largo de una extensa región de capacidades. Las bombas de émbolo se usan generalmente para presiones más altas que las de pistón. Tienen un flujo de descarga pulsante.

**2. Bombas de potencia.** Tienen un cigüeñal movido por una fuente externa, banda o cadena. Frecuentemente se usan engranes entre el motor y el cigüeñal para reducir la velocidad de salida del elemento motor. Cuando se mueve a velocidad constante, las bombas de potencia proporcionan un gasto casi constante para una amplia variación de columna, y tienen buena eficiencia.

El extremo líquido, que puede ser del tipo de pistón o émbolo, desarrollará una presión elevada cuando se cierra la válvula de

descarga. Por esta razón, es práctica común el proporcionar una válvula de alivio para descarga, con objeto de proteger la bomba y su tubería. Las bombas de potencia se encuentran particularmente bien adaptadas para servicios de alta presión.

**3. Bombas del tipo potencia de baja capacidad.** Estas unidades se conocen también como bombas de capacidad variable, volumen controlado o de "proporción". Su uso principal es para controlar el flujo de pequeñas cantidades de líquido. Su capacidad puede variarse cambiando la longitud de la carrera.

**4. Bombas del tipo de diafragma.** Se usan para gastos elevados de líquidos, ya sea claros o conteniendo sólidos. También son apropiados para pulpas gruesas, drenajes, lodos, etc. Un diafragma de material flexible no metálico, puede soportar mejor la acción corrosiva o erosiva que las partes metálicas de algunas bombas reciprocantes.

Además de estas existen un gran número de otros tipos de bombas reciprocantes, diseñadas para servicios especializados, como manejos de lubricación, químicos, etc.

#### 4. MODELO MATEMATICO Y COMPORTAMIENTO

Para poder controlar un sistema físico, es de suma importancia conocer su comportamiento. Para lograr esto, hay que modelarlo matemáticamente, y hacer simulaciones del comportamiento de la planta con ese modelo y compararlos con el comportamiento real, para definir si el modelo es adecuado o si se debe mejorar.

En el caso de la planta hidráulica, ésta se puede modelar de dos maneras, de forma alineal o lineal. Generalmente el modelo alineal es mas cercano al comportamiento real, pues son las ecuaciones de flujo y nivel aplicadas directamente. Sin embargo, si la ecuación lineal da un modelo muy aproximado, es conveniente usarla, ya que es mas sencillo su manejo.

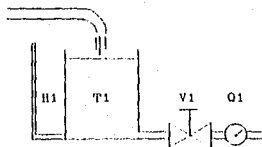
Debido a que se pueden estudiar diferentes tipos de sistemas en la planta hidráulica, se requieren varios modelos matemáticos, los cuales corresponden al sistema de primer orden, al sistema de segundo orden sin interacción entre tanques, y al sistema de segundo orden con interacción entre los tanques. Además, de cada uno de estos sistemas se obtuvieron tanto el modelo lineal como el alineal.

Después de obtener los modelos matemáticos, se simuló su comportamiento con el programa SIMNON, y se obtuvo la gráfica del comportamiento real de los sistemas para compararla con los

modelos. La salida "y" es en todos los modelos el nivel de agua del tanque en los modelos de primer orden, y el nivel de agua del tanque de salida en los de segundo orden.

Los modelos matemáticos que se encontraron fueron:

Primer orden:



SISTEMA DE PRIMER ORDEN

Modelo lineal

$$Cdh + \frac{h}{R} dt = qdt$$

$$dh = -\frac{h}{RC} dt + \frac{q}{C} dt$$

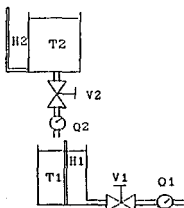
$$\frac{dh}{dt} = -\frac{h}{RC} + \frac{q}{C}$$

Modelo a lineal

$$Cdh + kA_0\sqrt{2gh}dt = qdt$$

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{kA_0}{C}\sqrt{2gh} + \frac{q}{C}$$

Segundo orden con el primer tanque independiente del segundo.



SEGUNDO ORDEN

Modelo lineal:

$$C_1 dh_1 + \frac{h_1}{R_1} dt = qdt$$

$$C_2 dh_2 + \frac{h_2}{R_2} dt = \frac{h_1}{R_1} dt$$

De donde tenemos que:

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{h_1}{R_1 C_1} + \frac{q}{C_1}$$

$$\frac{dh_2}{dt} = -\frac{h_2}{R_2 C_2} + \frac{h_1}{R_1 C_2}$$

Modelo a lineal:

$$C_1 dh_1 + kA_{01} \sqrt{2gh_1} dt = q dt$$

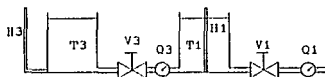
$$C_2 dh_2 + kA_{02} \sqrt{2gh_2} dt = kA_{01} \sqrt{2gh_1} dt$$

De donde:

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{kA_{02}}{C_1} \sqrt{2gh_1} + \frac{q}{C_1}$$

$$\frac{dh_2}{dt} = -\frac{kA_{02}}{C_2} \sqrt{2gh_2} + \frac{kA_{01}}{C_2} \sqrt{2gh_1}$$

Segundo orden con los tanques interactuando entre si.



SEGUNDO ORDEN CON INTERACCION

Modelo lineal.

$$C_1 dh_1 + \frac{h_1 - h_2}{R_1} dt = q dt$$

$$C_2 dh_2 + \frac{h_2}{R_2} dt = \frac{h_1 - h_2}{R_1} dt$$

De donde

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{h_1}{R_1 C_1} + \frac{h_2}{R_1 C_1} + \frac{q}{C_1}$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{h_1}{R_1 C_2} - \frac{h_2}{C_2} \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right)$$

Modelo a lineal.

$$C_1 dh_1 + kA_{01} \sqrt{2g} \sqrt{\delta h} dt = q dt$$

$$C_2 dh_2 + kA_{02} \sqrt{2g} \sqrt{h_2} dt + kA_{01} \sqrt{2g} \sqrt{\delta h} dt$$

En donde

$$\sqrt{\delta h} = \begin{cases} \sqrt{h_1 - h_2} & \text{si } h_1 \geq h_2 \\ -\sqrt{h_2 - h_1} & \text{si } h_1 < h_2 \end{cases}$$

Quedando las ecuaciones como

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{kA_{01}}{C_1} \sqrt{2g} \sqrt{\delta h} + \frac{q}{C_1}$$

$$\frac{dh_2}{dt} = -\frac{kA_{02}}{C_2} \sqrt{2g} \sqrt{h_2} + \frac{kA_{01}}{C_2} \sqrt{2g} \sqrt{\delta h}$$

Estas ecuaciones nos dan el comportamiento del sistema. Para obtener las gráficas de este comportamiento, se le proporcionaron estas ecuaciones como entrada al programa de simulación SIMNON. A continuación presento los programas de SIMNON, con sus gráficas de resultados. Al final de esta tesis, a manera de apéndice, presento las gráficas de comportamiento real de la planta, obtenidas con un graficador en el laboratorio, para los diferentes tipos de sistemas. Como se podrá observar, las gráficas teóricas son muy parecidas a las de comportamiento real.



```
CONTINUOUS SYSTEM Primord "identifica el sistema de primer orden
TIME t "declaración de las variables"
OUTPUT y
STATE h1
DER dh1
```

```
dh1 = -1/(R1*C1)*h1 + q/C1 "Ecuaciones de estado
                                "Donde C es la capacitancia hidráulica
                                y
```

```
flujo "R la resistencia hidráulica. q Es el
```

```
"De entrada y h1 es el nivel de agua
```

```
"Ecuación de salida
```

```
y= h1
```

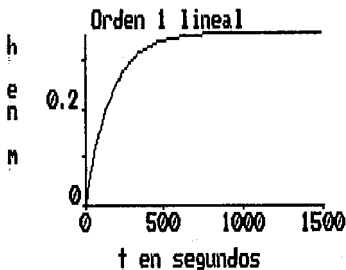
```
"Definición de parámetros
```

```
R1: 8907
C1:.0182
q: .00004
```

```
"Inicialización de variables de estado
```

```
h1 : 0
```

```
End
```



CONTINUOUS SYSTEM Primorda "identifica el sistema de primer orden  
TIME t "declaración de las variables"  
OUTPUT y  
STATE h1  
DER dh1

"ecuaciones de estado

$$dh1 = - k \cdot A01 / C1 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h1} + q / C1$$

"Donde C es la capacitancia hidráulica,  
"k una constante que generalmente vale  
"aprox .61, h1 es el nivel de agua, g la  
"gravedad, q es el flujo de entrada y A0  
"el área transversal equivalente

"Ecuación de salida

y= h1

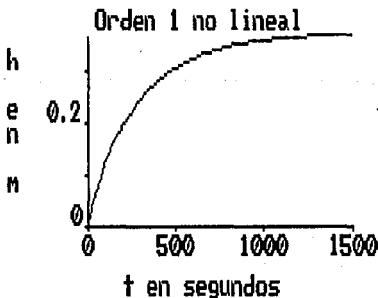
"Definición de parámetros

A01: 2.4227E-5  
k: .61  
C1: .0182  
q: .00004  
g: 9.81

"Inicialización de variables de estado

h1: 0

End



En el caso del sistema de segundo orden hay cuatro simulaciones.  
 Lineal y no lineal de sistemas que no interactúan entre ellos, y  
 lineal y no lineal de sistemas que interactúan entre los tanques.

CONTINUOUS SYSTEM Segord1 "identifica el sistema de segundo orden  
 TIME t "sin interacción. Las variables son:"  
 OUTPUT y,  
 STATE h1 h2  
 DER dh1 dh2

"Ecuaciones de estado

$$dh1 = -1/(R1*C1)*h1 + q/C1$$

$$dh2 = -1/(R2*C2)*h2 + 1/(R1*C2)*h1$$

"Donde C es la capacitancia hidráulica,  
 "R la resistencia hidráulica. q el flujo  
 "De entrada y h es el nivel de agua. El  
 "Número indica el tanque en cuestión.

"Ecuación de salida

$$y = h2$$

"Definición de parámetros

R1: 11049.72

R2: 8907

C1: .0182

C2: .0182

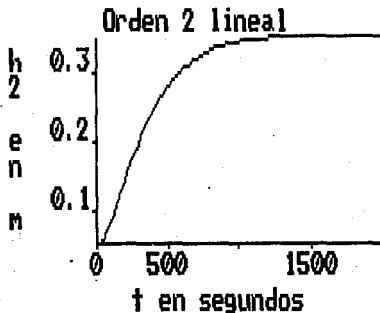
q: .00004

"Inicialización de variables de estado

h1 : .05

h2 : .05

End



CONTINUOUS SYSTEM Segordia "identifica el sistema de segundo orden  
TIME t "alineal y sin interacción entre los  
OUTPUT y "tanques.

STATE h1 h2  
DER dh1 dh2

"ecuaciones de estado

dh1 =  $-k \cdot A01 / C1 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h1} + q / C1$   
dh2 =  $-k \cdot A02 / C2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h2} + k \cdot A01 / C2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h1}$

"Donde A0 es el área transversal del  
"tubo, g es la gravedad, h el nivel  
"agua, q es el flujo de entrada, C es  
"la capacitancia hidráulica y k es una  
"constante que en general vale alrededor  
"de 0.61. Los números indican de qué  
"tanque se trata.

y= h2

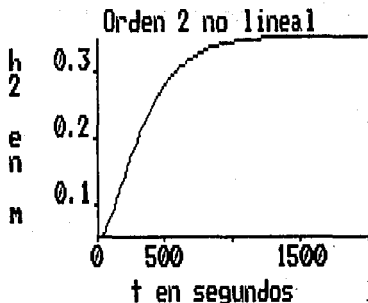
"Definición de parámetros

g : 9.81  
C1:.0182  
C2:.0182  
k :.61  
A01:1.9530E-5  
A02:2.4227E-5  
q: .00004

"Inicialización de variables de estado

h1 : .005  
h2 : .005

End



CONTINUOUS SYSTEM Segord2 "identifica el sistema de segundo orden  
 TIME t "con interacción de los tanques entre si  
 OUTPUT y  
 STATE h1 h2  
 DER dh1 dh2

"ecuaciones de estado

$$dh1 = -1/(R1*C1)*h1 + 1/(R1*C1)*h2 + q/C1$$

$$dh2 = 1/(C2*R1)*h1 - 1/C2*(1/R2+1/R1)*h2$$

"Donde C es la capacitancia hidráulica  
 "R la resistencia hidráulica. q el flujo  
 "De entrada y h es el nivel de agua. El  
 "Número indica el tanque en cuestión  
 "La variable

"Ecuación de salida

$$y = h2$$

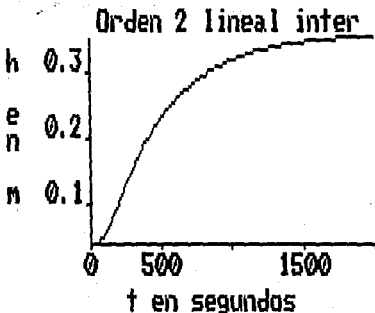
"Definición de parámetros

R1: 8907  
 R2: 8907  
 C1: .01824  
 C2: .01824  
 q : .00004

"Inicialización de variables de estado

h1 : 0  
 h2 : .05

End



```

CONTINUOUS SYSTEM Segord2a "identifica el sistema de segundo orden
TIME t                    "no lineal con interacción entre los
OUTPUT y                  "tanques
STATE h1 h2
DER dh1 dh2

```

```

"ecuaciones de estado
dh1 =-k*A01/C1*deltah + q/C1
dh2 =-k*A02/C2*sqrt(2*g*h2) + k*A01/C2*deltah
"Donde A0 es el área transversal del
"tubo, g es la gravedad, h el nivel de
"agua, q es el flujo de entrada, C es
"la capacitancia hidráulica y k es una
"constante que en general vale alrededor
"de 0.61. Los números indican de qué
"tanque se trata.
"deltah es  $\sqrt{h2-h1}$  si  $h2>h1$  o
"  $-\sqrt{h1-h2}$  si  $h2<h1$ 
"Ecuación de salida

```

```
y= h2
```

```

"Definición de parámetros
deltah =sqrt(2*g)*(sign(h1-h2)*sqrt(abs(h1-h2)))
g : 9.81
C1: .0182
C2: .0182
k : .61
A01: 2.4227E-5
A02: 2.4227E-5
q: .00004

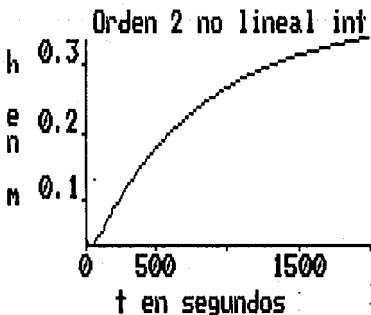
```

```
"Inicialización de variables de estado
```

```

h1 : .0
h2 : .05
End

```



## 5. CONCLUSIONES

La planta hidráulica es un proyecto muy ambicioso, y que se puede extender tanto como se desee. En esta tesis se realizó la construcción física de la planta y la instrumentación de la misma. Esta tesis es un trabajo que puede servir como base para nuevos proyectos, como por ejemplo, la automatización del movimiento de las válvulas mediante actuadores que pueden ser neumáticos, hidráulicos o eléctricos, así como llevar a la práctica algoritmos de control de nivel y flujo de agua en la planta.

El microcontrolador que se eligió para concentrar y manejar la información analógica de la planta es el MC68HC11 de Motorola, debido a que cuenta con suficientes puertos para manejar todo lo que requiere la planta hidráulica, además de que cuenta con un convertidor analógico-digital de 8 canales, suficiente para hacer las mediciones que requiere la planta hidráulica.

Otra ventaja de este microcontrolador es que cuenta con operaciones de multiplicación y de división que facilitan la programación, además de hacerla mas eficiente.

El programa para el microcontrolador se fue mejorando con el tiempo. En el programa original, la conversión de numeros hexadecimales a decimales se realizaba mediante series de sumas ajustadas a decimal, por lo que era bastante tardada la conversión, y en general el sistema tardaba alrededor de medio segundo entre lecturas del convertidor analógico-digital. Esta conversión se cambió en que al multiplicar el número por 256 y por 4096 ( $16^2$  y

16<sup>3</sup>) , en que se realizaban ciclos de sumas 256 y 4096 veces, se realiza ahora mediante tablas. Actualmente, debido a que en esta tesis se trató solo hasta la instrumentación, no es tan importante esta mejora, y de hecho, se le tuvo que poner al programa un ciclo de retraso de \$FFFF (65535), para que se puedan leer los datos, de modo que se despliegan alrededor de 3 veces por segundo. Sin embargo, le da al programa la capacidad de manejar nuevas rutinas en un futuro, como podría ser la rutina de control de los actuadores de las válvulas, y el algoritmo de control de nivel y flujo que a su vez controlaría el movimiento de los actuadores de las válvulas.

El sistema electrónico se realizó con la tarjeta de evaluación MC68HC11EVBU de motorola, basada en el MC68HC11E9 que cuenta solo con 512 bytes de memoria EEPROM para el usuario (12KB de ROM para conectarse con una PC, pero estos no se pueden utilizar para programas nuevos). Debido a esto y al tamaño del programa, se le tuvo que poner una memoria externa al sistema, lo que ocasionó tener que hacer decodificación de memoria y de un puerto (en este caso fué solo un latch). Sin embargo, existen microcontroladores de la familia MC68HC11 que tienen mayor cantidad de memoria, en los que no se reduciría en gran medida el alambrado del circuito.

Para sensar la presión, se utilizaron los sensores SCX01DN y SCX05DN de sensym, ya que son bastante precisos, y no son muy costosos. La desventaja que tuvieron es que la señal que dan de salida es muy pequeña (máximo 18mV), por lo que hubo que amplificar



esta señal 1000 veces, en el caso de los sensores de caída de presión en la placa de orificio para medir el flujo, y 300 veces para los sensores de presión hidrostática en el fondo de los tanques.

Para la medición de flujo, se tuvo que linealizar la función mediante series de Taylor. Se eligió utilizar solo un término de la serie, ya que facilita mucho la programación del microcontrolador, y da una muy buena aproximación a los valores reales al menos en los intervalos de operación de la planta hidráulica. Donde hay mayor error respecto a la ecuación de flujo  $Q = \sqrt{\delta h}$ , de cualquier forma, las mediciones no son válidas, pues las condiciones de flujo no son de flujo totalmente turbulento, y de hecho, se puede observar en la gráfica que la ecuación con solo un término de la serie de Taylor es en realidad la que más se parece al flujo obtenido experimentalmente para los valores de  $27 \text{ cm}^3/\text{s}$  y menores. Es importante notar que si el flujo no es de al menos alrededor de  $27 \text{ cm}^3/\text{s}$ , el flujo es aún laminar, y las mediciones de flujo no son completamente ciertas, sino que son aproximadas.

Para hacer la construcción física de la planta, fué necesario estudiar los diferentes elementos que la componen para poder elegir los que la puedan hacer trabajar de la mejor manera.

Entre estos elementos que se estudiaron están:

De los tanques se tuvieron que analizar las diferentes formas de tanques, y sus variaciones en capacitancia hidráulica, así como la

relación entre el volúmen y el nivel de líquido en los mismos. Se llegó a la conclusión de que la mejor forma para los tanques de la planta era la de cilindros verticales, ya que presentan una capacitancia hidráulica constante para todos los niveles de agua, haciendo en un futuro más sencillo el control de nivel y flujo, y también haciendo más ilustrativo el proceso para los alumnos que la vayan a emplear.

De las válvulas, se decidió que la mejor es la válvula de globo, ya que su uso es para regular el flujo, y para esto es la mejor, además de que es de costo reducido.

El método de medición de nivel de agua que se eligió es el método de presión hidrostática en el fondo de los tanques. Este método se eligió porque, por un lado, es un método que está haciéndose muy popular en la industria, y por otro lado, es sencillo de implementar y da una resolución bastante buena ( .275 cm).

En cuanto a la medición de flujo, se consideraron varios métodos, concluyéndose que el óptimo para la planta hidráulica es el de medir la caída de presión causada por una placa de orificio. Este método, además de ser poco costoso, es bastante preciso, y solo requiere que hayan tramos rectos de tubería de 15 a 20 veces el diámetro del tubo. Las placas de orificio se hicieron de aluminio, para evitar oxidación, haciéndolas así muy durables.

La planta se realizó con 3 tanques aunque en general solo va a

trabajar con 2 tanques a la vez. Esto es con el objeto de no tener que estar moviendo los tanques, sino que se pueden lograr los diferentes sistemas que se pretenden mostrar en la planta hidráulica con solo abrir y cerrar válvulas, aislando así los tanques que no se vayan a emplear en un momento dado.

El material que se eligió para la construcción de la planta hidráulica fue acrílico transparente, debido a que permite observar bien todo el proceso. Los tubos se hicieron de este mismo material, ya que es capaz de resistir las condiciones de operación de la planta, y además permite ver la placa de orificio, e inclusive se pueden apreciar las turbulencias que esta causa cuando el flujo es turbulento.

Se puede observar que las gráficas de comportamiento simuladas son muy parecidas a las de comportamiento real de la planta hidráulica. Se presentan diferencias pequeñas, sobre todo en las de segundo orden, las cuales se deben a las alinealidades que dan los elementos de medición, así como las válvulas, los que producen que se realice un sistema real de un orden superior a 2, como se puede observar en algunos puntos de inflexión de las gráficas, aunque se puede modelar sin mayor error como un sistema de segundo orden, ya que las componentes de orden superior a dos son en el caso de la planta despreciables.

## APENDICES

a) En este apéndice presento el listado del programa en ensamblador que corre en el microcontrolador MC68HC11.

\*\*\*\*\*  
\* DECLARACIONES DE VARIABLES A USAR\*  
\*\*\*\*\*

DISPLAY	EQU	\$4000
PTOB	EQU	\$1004
PIOC	EQU	\$1002
PTOA	EQU	\$1000
OFFSET1	EQU	\$00
EOT	EQU	\$04
ADCTRL	EQU	\$1030
NADCTRL	EQU	\$14
OPTION	EQU	\$1039
NOPTION	EQU	\$80
ADRI	EQU	\$1031
RESULT1	EQU	\$10
SGNFLG	EQU	\$20
ENTERO	EQU	\$21
SUMA	EQU	\$08
SUMA2	EQU	\$22
DECIMAL	EQU	\$25
TEMPORAL	EQU	\$28

ORG \$2000

\*\*\*\*\*  
\*INICIALIZACION DE LAS VARIABLES \*  
\*SP, ADC, ETC \*  
\*\*\*\*\*

	LDAA	#\$30	
	STAA	PTOA	INICIALIZA EL DISPLAY COMO
	LDS	#\$47	PUERTO Y CARGA EL SP CON 47
	LDAA	#NOPTION	ENCIENDE EL ADC
	STAA	OPTION	
	LDX	#\$FFFF	
DLYLOOP	DEX		
	BNE	DLYLOOP	

\*\*\*\*\*  
 \*INICIALIZACION DEL DISPLAY CON \*  
 \*DOS LINEAS, SIN CORRIMIENTOS, SIN \*  
 \*CURSOR. \*  
 \*\*\*\*\*

INIT	LDAA	#\$01	BORRA DISPLAY
	JSR	CONTROL	
	LDX	#\$215	
PAUSA	DEX		
	BNE	PAUSA	
	LDAA	#\$02	PONE CURSOR EN HOME
	JSR	CONTROL	
	LDAA	#\$06	SHIFT AL ESCRIBIR
	JSR	CONTROL	
	LDAA	#\$0C	DISP ON, CURSOR OFF, NO BLINK
	JSR	CONTROL	
	LDAA	#\$38	2 LINEAS, 8 BITS, 5X7
	JSR	CONTROL	

\*\*\*\*\*  
 \* TOMA LOS PRIMEROS VALORES DE LOS \*  
 \* ADCs PARA CONSIDERARLOS PARA \*  
 \* AJUSTAR A CERO. \*  
 \*\*\*\*\*

	LDAA	#NADCTRL	INICIA LA LECTURA DEL ADC
	STAA	ADCTRL	
	LDAA	#\$80	EMPIEZA A ESCRIBIR EN EL PRIMER
	JSR	CONTROL	RENGLON
	LDX	#MENS1	MENSAJE DE "AJUSTANDO A CERO"
	JSR	OUTMSG	
	LDX	#\$FFFF	TIENE UN RETRASO QUE PERMITE
DLYLOOP2	DEX		QUE LOS VOLTAJES DEL ADC SE
	BNE	DLYLOOP2	ESTABILICEN ANTES DE TOMAR LA
	LDAA	#NADCTRL	PRIMERA LECTURA QUE SERVIRA
	STAA	ADCTRL	COMO REFERENCIA
	LDX	#\$FFFF	
DLYLOOP3	DEX		
	BNE	DLYLOOP3	
	LDX	#OFFSET1	APUNTADOR A LA DIRECCION DEL
	LDY	#ADR1	PRIMER OFFSET Y LA PRIMERA
	LDAB	#4	LECTURA DEL ADC, CUENTA 4 CICLOS
			*(1 POR LECTURA DE ADC)
LECTINI	LDAA	,Y	LEE EL VALOR DEL ADCn
	STAA	,X	LO GUARDA EN OFFSETn
	INY		APUNTA AL SIGUIENTE VALOR DE
ADC			
	INX		Y DE OFFSET
	DECB		DECREMENTA EL CONTADOR
	BNE	LECTINI	SI NO ES CERO REPITE EL CICLO

```
*****
* SE ESCRIBE EL FORMATO CON EL QUE *
* SE VAN A DESPLEGAR LOS DATOS QUE *
* HAN SIDO LEIDOS DE LOS CANALES *
* DEL ADC Y ADAPTADOS PARA ASCII *
*****
```

```
LDAA    #S80    EMPIEZA A ESCRIBIR EN EL PRIMER
JSR     CONTROL RENGLON
LDX     #MENS2
JSR     OUTMSG
LDAA    #S0
JSR     CONTROL
LDX     #MENS3
JSR     OUTMSG
```

```
*****
* RUTINA PRINCIPAL DEL PROGRAMA, *
* LEE LOS ADCs, LO GUARDA EN MEMORIA*
* INICIA LA SIGUIENTE LECTURA Y *
* LLAMA LAS RUTINAS QUE ADAPTAN LOS *
* DATOS PARA MANDARLOS AL DISPLAY *
*****
```

```
OTRAVEZ LDX     #ADR1    LES RESTA A LOS VALORES DEL ADC
LDY     #OFFSET1  OFFSET PARA CALIBRAR A CERO Y
LDAA    #4        GUARDA LOS VALORES OBTENIDOS EN
PROX    LDAB    ,X    LAS DIRECCIONES 4 A 7 DE RAM
        SUBB    ,Y
        BHI     VALIDO
        LDAB    #0
VALIDO  STAB    4, Y
        INX
        INY
        DECA
        BNE     PROX

        LDAA    #NADCTRL  INICIA LA LECTURA DEL ADC
        STAA   ADCTRL

        LDX     #OFFSET1
        LDAB    4, X
        LDAA    #S83
        JSR     CONTROL
        JSR     FLUJO
        JSR     DESPLIEG
        INX
        LDAB    4, X
        LDAA    #S8C
        JSR     CONTROL
        JSR     FLUJO
        JSR     DESPLIEG
        INX
        LDAB    4, X
```

	LDAA	#%C3
	JSR	CONTROL
	JSR	NIVEL
	JSR	DESPLIEG
	INX	
	LDAB	4, X
	LDAA	#\$CC
	JSR	CONTROL
	JSR	NIVEL
	JSR	DESPLIEG
RETRASO	LDX	#\$FFFF
	DEX	
	BNE	RETRASO
	BRA	OTRAVEZ

\*\*\*\*\*  
 \* SUBROUTINA QUE ADAPTA LAS LECTURAS \*  
 \* DE FLUJO A VALORES DESPLEGABLES \*  
 \* EN DISPLAY (MULTIPLICA POR FACTOR \*  
 \* DE CONVERSION), CONVIERTE A \*  
 \* CODIGO ASCII Y GUARDA EN MEMORIA \*  
 \*\*\*\*\*

FLUJO	CLRA	SGNFLG	
	STAA	#100	VE SI ES POSITIVO O NEGATIVO Y
	CMPB	MAYOR	LO GUARDA EN SGNFLG
	BHS	#1	
	LDAA	SGNFLG	
	STAA		
	NEGB		
	ADDB	#\$64	Q=3.6[10-1/20(100-B)]
MAYOR	SUBB	#100	
	PSHX		
	LDX	#20	DIVIDE ENTERO ENTRE 20
	LDAA	#00	
	IDIV		
	XGDX		
	STAB	ENTERO	GUARDA EL RESULTADO ENTERO
	XGDX		
	LDX	#20	DIVIDE LOS DECIMALES ENTRE 20
	FDIV		Y OBTIENE LA FRACCION DECIMAL
	XGDX		
	LDAB	#39	MULTIPLICA EL BYTE MAS SIGNIF
	MUL		DE LA DIVISION POR EL FACTOR
	LDX	#100	PARA QUE NO QUEDE COMO FRACCION
	IDIV		BINARIA PONDERADA. LUEGO LA
	XGDX		DIVIDE ENTRE 100 PARA OBTENER
	LDAA	#36	EL BYTE MAS SIGNIFICATIVO
	MUL		

	STD	SUMA	SE MULTIPLICA LOS DECIMALES POR
	LDAA	#36	EL FACTOR DE CONVERSION 3.6
	LDAB	ENTERO	SE MULTIPLICA EL NUMERO ENTERO
	MUL		POR 3.6 Y POR 100
	LDAA	#100	
	MUL		
	ADDD	SUMA	SE SUMA CON LOS DECIMALES
*	STD	SUMA	Y LUEGO, DEPENDIENDO DEL SIGNO,
			SE SUMA O RESTA A 35000. EL
	LDAA	SGNFLG	RESULTADO ES EL FLUJO EN CM3/S
	CMPA	#1	MULTIPLICADO POR MIL
	BNE	POSITIVO	
	LDD	#36000	
	SUBD	SUMA	
POSITIVO	BRA	SIGUE	
	LDD	#36000	
SIGUE	ADDD	SUMA	
	STD	SUMA	ALMACENA EL VALOR EN SUMA Y
	PULX		LLAMA A LA SUBROUTINA QUE LO
	JSR	ASCII	CONVIERTA A ASCII
	RTS		

\*\*\*\*\*  
 \* SUBROUTINA QUE ADAPTA LAS LECTURAS \*  
 \* DE NIVEL A VALORES DESPLEGABLES \*  
 \* EN DISPLAY (MULTIPLICA POR FACTOR \*  
 \* DE CONVERSION), CONVIERTE A \*  
 \* CODIGO ASCII Y GUARDA EN MEMORIA \*  
 \*\*\*\*\*

NIVEL	LDAA	#28	MULTIPLICA LA LECTURA DE ADC
	MUL		POR 28 QUE ES EL FACTOR DE CONV
	STAA	TEMPORAL	LUEGO MULTIPLICA ESTE RESULTADO
	LDAA	#10	POR 10 PARA QUE QUEDE EN LAS
	MUL		POSICIONES ADECUADAS PARA LA
	STD	SUMA	SUBROUTINA DESPLIEG
	LDAA	TEMPORAL	
	LDAB	#10	
	MUL		
	LSLD		
	LSLD		
	LSLD		
	LSLD		
	LSLD		
	LSLD		
	LSLD		
	LSLD		
	ADDD	SUMA	
	STD	SUMA	
	JSR	ASCII	
	RTS		



```

*****
* SUBROUTINA QUE CONVIERTE LOS *
* NUMEROS GUARDADOS EN SUMA A 3 *
* CARACTERES ASCII *
*****

```

ASCII	PSHX		
	LDX	#\$00	INICIALIZA LOS ESPACIOS DE MEM
	STX	DECIMAL+2	
	STX	DECIMAL+1	PARA GUARDAR LOS DIGITOS EN BCD
	STX	DECIMAL	Y LOS RESULTADOS PARCIALES DE
	STX	SUMA2+2	
	STX	SUMA2+1	LA CONVERSION.
	STX	SUMA2	
	LDD	SUMA	OBTIENE EL ULTIMO CARACTER HEX
	ANDB	#\$0F	Y LO AJUSTA A DECIMAL
	STAB	TEMPORAL	
	LDAA	TEMPORAL	
	JSR	AJUSTA	
	LDY	#1	
	JSR	MULT16	
	JSR	ADICION	
	LDD	SUMA	OBTIENE EL TERCER CARACTER HEX
	ANDB	#\$F0	LO AJUSTA A DECIMAL Y LO MULT
	LSRB		POR 16, LO SUMA AL CARACTER
	LSRB		ANTERIOR
	LSRB		
	LSRB		
	STAB	TEMPORAL	
	LDAA	TEMPORAL	
	JSR	AJUSTA	
	LDY	#16	
	JSR	MULT16	
	JSR	ADICION	
	LDD	SUMA	OBTIENE EL SIGUIENTE CARACTER
	ANDA	#\$0F	HEX. LO AJUSTA A DECIMAL Y LO
	JSR	AJUSTA	MULT POR 16x16(256), LO SUMA A
	JSR	MULT256	LO ANTERIOR
	JSR	ADICION	
	LDD	SUMA	OBTIENE EL CARACTER HEX MAS
	ANDA	#\$F0	SIGNIFICATIVO, LO AJUSTA A
	LSRA		DECIMAL Y LO MULTIPLICA POR
	LSRA		16x16x16(4096)
	LSRA		
	LSRA		
	JSR	AJUSTA	
	JSR	MULT4096	
	JSR	ADICION	

PULX		ESTA PARTE CONVIERTE
LDAA	DECIMAL	EL VALOR DE LOS 3 DIGITOS MAS
ANDA	#\$0F	
ADDA	#\$30	SIGNIFICATIVOS DECIMALES A
STAA	RESULT1,X*3	ASCII Y LOS GUARDA EN RESULT
LDAA	DECIMAL+1	
ANDA	#\$F0	
LSRA		
LSRA		
LSRA		
ADDA	#\$30	
STAA	RESULT1+1,X*3	
LDAA	DECIMAL+1	
ANDA	#\$0F	
ADDA	#\$30	
STAA	RESULT1+2,X*3	

RTS

\*\*\*\*\*  
 \* SUBROUTINA QUE AJUSTA UN NUMERO \*  
 \* HEXADECIMAL A UNO DECIMAL \*  
 \*\*\*\*\*

AJUSTA	CMPA	#9	SI ES MENOR QUE 9, ASI QUEDA,
	BLE	AVANZ	SI NO, LE SUMA 6 PARA VOLVERLO
	ADDA	#6	UN NUMERO DECIMAL
AVANZ	RTS		

\*\*\*\*\*  
 \* SUBROUTINA PARA MULTIPLICAR NUMEROS\*  
 \* DECIMALES (POR SERIES DE SUMAS \*  
 \* AJUSTADAS A DECIMAL) \*  
 \*\*\*\*\*

MULT16	STX	SUMA2	BORRA LOS REGISTROS PARA
	STX	SUMA2+1	RESULTADOS PARCIALES
	STAA	TEMPORAL	GUARDA EL VALOR A MULTIPLICAR
OTRAVZ	LDAA	SUMA2+2	CARGA EL VALOR ANTERIOR DE LOS
	ADDA	TEMPORAL	DOS DIGS MENOS SIGNIFICAT. Y
	DAA		LES SUMA EL VALOR AJUSTA LA
	STAA	SUMA2+2	SUMA A DECIMAL Y GUARDA LOS
	LDAA	#0	DIGS MENOS SIGNIF. SI GENERO
	ADCA	SUMA2+1	CARRY LA SUMA, LA GUARDA EN LOS
	DAA		SIGUIENTES REGISTROS
	STAA	SUMA2+1	
	LDAA	#0	
	ADCA	SUMA2	
	DAA		
	STAA	SUMA2	
	DEY		DECREMENTA Y PARA EL SIGUIENTE
	BNE	OTRAVZ	CICLO
	RTS		

\*\*\*\*\*  
 \* SUBROUTINA QUE MULTIPLICA EL \*  
 \* CONTENIDO DEL ACUMULADOR A POR \*  
 \* 256 MEDIANTE TABLAS DECIMALES \*  
 \*\*\*\*\*

```

MULT256   PSHY
          PSHB
          PSHA
          TAB
          LDY          #MUL256_1   GUARDA LOS VALORES MENOS SIGNIF
          ABY          EN SUMA2+2 Y LOS MAS SIGNIF EN
          LDAA         0,Y        SUMA2+1
          STAA         SUMA2+2
          LDY          #MUL256_2
          ABY
          LDAA         0,Y
          STAA         SUMA2+1
          PULA
          PULB
          PULY
          RTS
  
```

```

MULT256_1  FCB          $0          TABLA CON LOS VALORES DE LOS 2
          FCB          $56          DIGS MENOS SIGNIFICATIVOS DE LA
          FCB          $12          TABLA DE MULTIPLICAR POR 256
          FCB          $68
          FCB          $24
          FCB          $80
          FCB          $36
          FCB          $92
          FCB          $48
          FCB          $04
          FCB          $60
          FCB          $16
          FCB          $72
          FCB          $28
          FCB          $84
          FCB          $40
  
```

```

MULT256_2  FCB          $0          TABLA CON LOS VALORES DE LOS 2
          FCB          $2          DIGS MAS SIGNIFICATIVOS DE LA
          FCB          $5          TABLA DE MULTIPLICAR POR 256
          FCB          $7
          FCB          $10
          FCB          $12
          FCB          $15
          FCB          $17
          FCB          $20
          FCB          $23
          FCB          $25
          FCB          $28
  
```

FCB	\$30
FCB	\$33
FCB	\$35
FCB	\$38

\*\*\*\*\*  
 \* SUBROUTINA QUE MULTIPLICA EL \*  
 \* CONTENIDO DEL ACUMULADOR A POR \*  
 \* 4096 MEDIANTE TABLAS DECIMALES \*  
 \*\*\*\*\*

MULT4096	PSHY	
	PSHB	
	PSHA	
	TAB	
	LDY	#MUL40961
	ABY	
	LDAA	0, Y
	STAA	SUMA2+2
	LDY	#MUL40962
	ABY	
	LDAA	0, Y
	STAA	SUMA2+1
	LDY	#MUL40963
	ABY	
	LDAA	0, Y
	STAA	SUMA2
	PULA	
	PULB	
	PULY	
	RTS	

MUL40961	FCB	\$0
	FCB	\$96
	FCB	\$92
	FCB	\$88
	FCB	\$84
	FCB	\$80
	FCB	\$76
	FCB	\$72
	FCB	\$68
	FCB	\$64
	FCB	\$60
	FCB	\$56
	FCB	\$52
	FCB	\$48
	FCB	\$44
	FCB	\$40

MUL40962	FCB	\$0
	FCB	\$40
	FCB	\$81

FCB	\$22
FCB	\$63
FCB	\$04
FCB	\$45
FCB	\$86
FCB	\$27
FCB	\$68
FCB	\$09
FCB	\$50
FCB	\$91
FCB	\$32
FCB	\$73
FCB	\$14

MUL40963	FCB	\$0
	FCB	\$0
	FCB	\$0
	FCB	\$1
	FCB	\$1
	FCB	\$2
	FCB	\$2
	FCB	\$2
	FCB	\$3
	FCB	\$3
	FCB	\$4
	FCB	\$4
	FCB	\$4
	FCB	\$5
	FCB	\$5
	FCB	\$6

\*\*\*\*\*  
 \* SUBROUTINA QUE SUMA DOS POSICIONES \*  
 \* DE NUMEROS DECIMALES EN 3 BYTES \*  
 \*\*\*\*\*

ADICION	LDAA	SUMA2+2	SUMA DECIMAL DE LOS NUMEROS QUE
	ADDA	DECIMAL+2	RESULTAN DE LA MULTIPLICACION
	DAA		Y LOS RESULTADOS ANTERIORES EN
	STAA	DECIMAL+2	NUMEROS DECIMALES.
	LDAA	SUMA2+1	
	ADCA	DECIMAL+1	
	DAA		
	STAA	DECIMAL+1	
	LDAA	SUMA2	
	ADCA	DECIMAL	
	DAA		
	STAA	DECIMAL	
	RTS		

\*\*\*\*\*  
 \* MENSAJES QUE SE MANDAN AL DISPLAY \*  
 \*\*\*\*\*

```

MENS1      FCC      'AJUSTANDO A CERO'
           FCB      #EOT
MENS2      FCC      'Q1=          Q2=  '
           FCB      #EOT
MENS3      FCC      'h1=          h2=  '
           FCB      #EOT
  
```

\*\*\*\*\*  
 \* SUBROUTINA PARA MANDAR EL DATO \*  
 \* ALMACENADO EN EL ACUMULADOR A LOS \*  
 \* REGISTROS DE CONTROL DEL DISPLAY \*  
 \*\*\*\*\*

```

CONTROL    PSHX
           STAA      DISPLAY      MANDA AL BUS DE DATOS
           LDAA      #$10
           STAA      PTOA        SELECCIONA WRITE
           LDAA      #$00
           STAA      PTOA        SELECCIONA REG DE CONTROL
           LDAA      #$40
           STAA      PTOA        PULSA ENABLE
           LDAA      #$00
           STAA      PTOA
           LDX       #$FF
RETRASO    DEX
           BNE       RETRASO
           PULX
           RTS
  
```

\*\*\*\*\*  
 \* SUBROUTINA PARA MANDAR EL DATO \*  
 \* ALMACENADO EN EL ACUMULADOR A LOS \*  
 \* REGISTROS DE DATOS DEL DISPLAY \*  
 \*\*\*\*\*

```

DATOS      PSHX
           STAA      DISPLAY      SELECCIONA ESCRIBIR
           LDAA      #$10
           STAA      PTOA
           LDAA      #$10        SELECCIONA REG DE DATOS
           STAA      PTOA
           LDAA      #$50        PULSA ENABLE
           STAA      PTOA
           LDAA      #$10
           STAA      PTOA
           LDAA      #$00        SELECCIONA REG DE CONTROL
           STAA      PTOA
           LDX       #$FF
  
```

```

TIEMPO      DEX
            BNE      TIEMPO
            PULX
            RTS

```

```

*****
* SUBROUTINA PARA MANDAR EL MENSAJE *
* QUE INICIA EN LA DIRECCION MARCADA*
* POR EL REGISTRO X AL DISPLAY      *
*****

```

```

OUTMSG      LDAA      ,X
            CMPA      #EOT
            BEQ      TERMIN
            JSR      DATOS
            INX
            BRA      OUTMSG
TERMIN      RTS

```

```

*****
* SUBROUTINA PARA DESPLEGAR 3      *
* NUMEROS EN ASCII EN EL DISPLAY  *
*****

```

```

DESPLIEG   LDAA      RESULT1,X*3
            JSR      DATOS
            LDAA      RESULT1+1,X*3
            JSR      DATOS
            LDAA      #$2E
            JSR      DATOS
            LDAA      RESULT1+2,X*3
            JSR      DATOS
            RTS

```

b) Gráficas de comportamiento real de la planta.

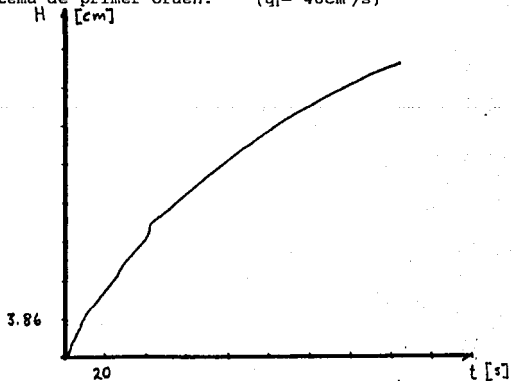
En este apéndice, presento las gráficas del comportamiento real de la planta hidráulica.

Para obtener estas gráficas, se conectó un graficador del laboratorio de control a la salida del amplificador de la señal del sensor de presión hidrostática del fondo del tanque de salida de la planta hidráulica.

Se obtuvieron cinco gráficas, una para el sistema de primer orden y dos para cada sistema de segundo orden (con interacción entre los tanques y sin interacción entre ellos).

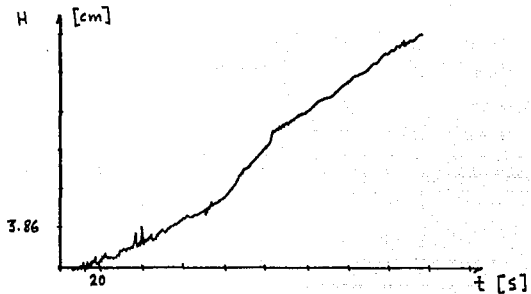
Gráficas de nivel de agua contra tiempo.

Sistema de primer orden. ( $q_1 = 40 \text{ cm}^3/\text{s}$ )

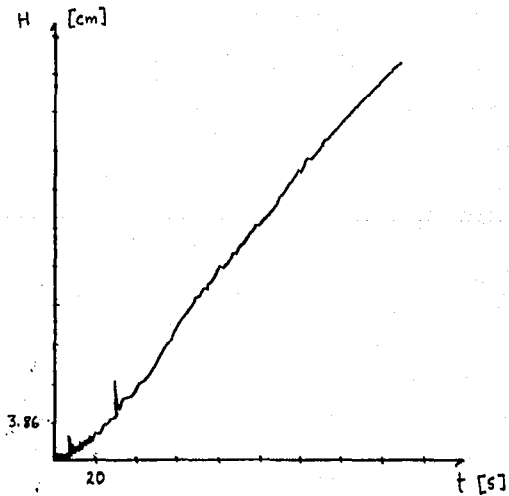




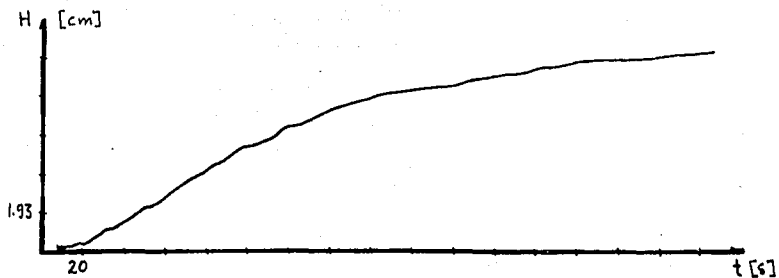
Sistema de segundo orden ( $q_1=20\text{cm}^3/\text{s}$ )



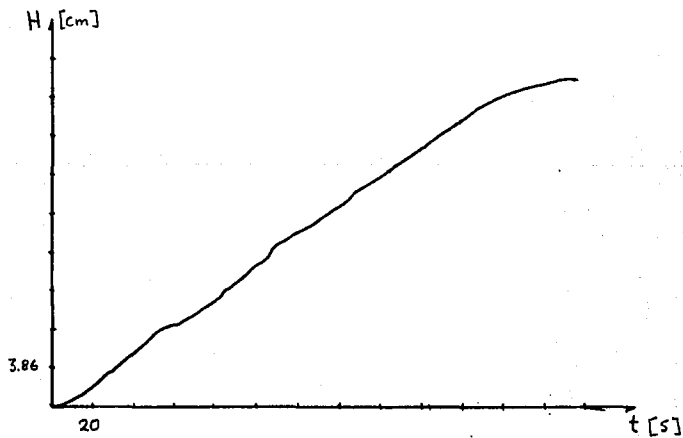
Sistema de segundo orden ( $q_1=40\text{cm}^3/\text{s}$ )



Sistema de segundo orden con interacción entre tanques ( $q_1=20\text{cm}^3$ )



Sistema de segundo orden con interacción entre tanques ( $q_1=20\text{cm}^3$ )



## BIBLIOGRAFIA

- Horowitz and Hill. The art of electronics. Cambridge University Press. Nueva York. 1990
- Schilling D., Belove Ch. Electronic Circuits. McGraw-Hill international. EEUU. 1989
- Texas Instruments. The TTL Data Book. EEUU. 1976
- SensSym. Solid-State sensor Handbook. Hawker-Siddeley. EEUU. 1991
- MOTOROLA. M68HC11 Reference Manual.(M68HC11RM/AD) EEUU. 1992
- MOTOROLA. MC68HC11E9 HCMOS Single Chip Microcontroller. (MC68HC11E9/D) EEUU. 1988
- MOTOROLA. MC68HC11 Universal Evaluation Board User's Manual. EEUU. 1988
- Hicks T. Bombas, su selección y aplicación. CECSA. México. Jun 1980.
- Miller R.W. Flow measurement Engineering handbook. Mc Graw-Hill. EEUU. 1983
- Ogata. K. Ingeniería de Control Moderna. Prentice Hall. México. 1980
- Ogata. K. System Dynamics. Prentice Hall. NJ, EEUU. 1978
- Greene R.W. Válvulas; Selección, Uso y mantenimiento. Mc Graw-Hill. México. 1987.
- Ginesi D. Choices Flow. Revista Chemical Engineering/Abril 1991.