

308917



UNIVERSIDAD PANAMERICANA

ESCUELA DE INGENIERIA

CON ESTUDIOS INCORPORADOS A LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

28

2ej.

DISEÑO E IMPLEMENTACION
DE UN DISPOSITIVO DIGITAL
CONTROLADOR DE NIVEL.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
AREA INGENIERIA MECANICA

P R E S E N T A
GERARDO / LEON DE ALBA

DIRECTOR
DR. STANISLAW RACZYNSKI GAWIN
MEXICO D.F.

1998

265345

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 esta 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.

DEDICATORIAS.

Dedico este trabajo de tesis a mis padres Dora y Felix por todo el buen ejemplo, amor y ayuda que me dan. Sin el cual dificilmente podría seguir adelante.

DEDICATORIA

Al Doctor Piotr Rusek Piela a quien muy difícilmente olvidaré, por el ejemplo que me dio a lo largo de esta etapa tan importante en mi vida.

INDICE

Capítulo 1 .INTRODUCCIÓN TEÓRICA.....	1
1.1 Introducción teórica al control digital	1
1.2 Modelado de sistemas físicos	13
1.3 Transformada z	20
1.4 Transformada de Fourier	31
Capítulo 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	38
2.1 Introducción Ingeniería de Procesos.....	38
2.2 Problema real y practico.....	40
Capítulo 3. IMPLEMENTACIÓN	43
3.1 Información general de la implementación práctica	43
3.2 Sistema de medición	47
3.3 Sistema de Bombeo	49
3.4 Amplificadores	52
3.5 Modelado y solución.....	72
3.6 Implementación del controlador	87
CONCLUSIONES	98
BIBILOGRAFIA.....	101

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN TEÓRICA

1.1. Introducción teórica al control digital

Hace algunos años las publicaciones acerca de control digital se referían a éste como una disciplina dentro del control que cada vez cobraba más importancia pero aún se profundizaba más en la teoría de control clásico, es decir control analógico.

En los días en los que el presente trabajo fue redactado, y cabe decir que no pasó mucho tiempo desde la aparición de las antes mencionadas publicaciones, el control digital era ya el más utilizado, teniendo muchas más aplicaciones que el control analógico.

Lo anterior se explica por el hecho de que las computadoras digitales cada vez se perfeccionan, permitiendo a los ingenieros utilizar herramientas matemáticas desarrolladas hace mucho

tiempo pero que necesitan una gran cantidad de operaciones aritméticas antes de dar un resultado útil.

Y no sólo las herramientas matemáticas se han beneficiado de este avance tan rápido en las computadoras digitales, la información se transmite, se recibe y se almacena mucho más eficientemente cuando se emplea un medio digital que cuando se emplea un medio analógico.

Antes de exponer las ideas o las bases teóricas que sustentan este trabajo de tesis, nos detendremos a revisar algunos conceptos que son importantes aclarar para poder lograr una mejor comprensión de la exposición.

El primer concepto y tal vez el más utilizado a lo largo de la exposición es el de variable, y para efectos de ingeniería de control es una cantidad o condición que se mide y que es susceptible a cambios en los parámetros que la definen. Casi siempre es un concepto físico, como velocidad que está definida por los parámetros rapidez y dirección, o temperatura que se mide con una escala establecida.

Otro concepto importante es el de control, que podríamos definir como la capacidad de verificar, regular y gobernar un sistema físico determinado (que llamaremos planta).

Con lo anterior tenemos suficientes elementos para distinguir entre dos tipos de variables :

■ Variable controlada. Es la que se mide y se controla.

- **Variable manipulada** . Es la que se modifica por el controlador a fin de afectar la variable controlada. Siempre la variable manipulada debe guardar alguna relación con la variable controlada, de modo que alguna modificación de la variable manipulada ocasione una modificación en la variable controlada.

Otras definiciones de conceptos útiles se añaden.

- **Proceso**. Operación o desarrollo natural caracterizado por una serie de cambios graduales, progresivamente continuos, se suceden uno a otro de un modo relativamente fijo y que tienden a un determinado resultado o final ; o a una operación voluntaria o artificial progresivamente continua que consiste en una serie de acciones controladas o movimientos dirigidos sistemáticamente hacia determinado resultado o fin.
- **Perturbación**. Una p. es una señal que tiende a afectar adversamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se le denomina interna, mientras que una perturbación externa se genera fuera del sistema y constituye una entrada.
- **Control Retroalimentado**. Se le llama c. r. a aquellos sistemas o plantas que miden constantemente la variable controlada y comparan esta medición con el valor deseado de la misma variable. Dependiendo del resultado de esta medición el controlador realiza automáticamente las acciones pertinentes para que el valor medido de la variable controlada sea igual al valor deseado.

Vistas ya las principales definiciones de ingeniería de control se dará ahora un repaso de los conceptos que se usan concretamente en control digital. Se empezará por ver a lo que se refiere cuando se habla de control digital.

El control digital es una rama de la ingeniería de control que emplea las mediciones físicas tomadas a intervalos, es decir, la información que se utiliza y se procesa son las condiciones de la planta medidas en un instante determinado. No se tienen mediciones del estado de las variables continuamente, como metáfora podríamos decir que la información que se tiene del estado y comportamiento de la planta es una serie de "fotografías" tomadas a diferentes instantes, y es esta secuencia fotográfica la que es procesada para determinar las acciones que en un instante dado debe hacer el controlador. Nótese que los intervalos que separan una medición y otra no forzosamente tienen que ser de tiempo, pueden ser distancia o cualquier otra variable. Sin embargo en el texto los intervalos de los que se hablan serán siempre de tiempo.

Al conjunto de mediciones tomadas a intervalos de tiempo las llamaremos señales discretas, estas señales pueden ser de dos tipos : señales discretas, que son mediciones puntuales en un rango continuo y señales discretas digitales que son mediciones puntuales en un rango discreto. Las señales almacenadas y procesadas en computadora son de este tipo, porque cada valor medido se representa por un código binario de cifras determinadas. Sin embargo en la práctica no se hace notar la diferencia entre uno y otro tipo de señal y se usan sus nombres indistintamente.

como primera etapa un filtro analógico, para limitar el rango de frecuencias antes del muestreo, la explicación de esto aparece en líneas posteriores de este trabajo.

Después la señal es muestreada (medida a intervalos de tiempo) y convertida a un código binario por un convertidor analógico digital (ADC, por las siglas en inglés de Analog to Digital Converter). Después se procesa en el controlador digital y se manda la señal hacia el actuador, pasándola antes por un convertidos digital analógico (DAC por las siglas en inglés de Digital to Analog Converter).

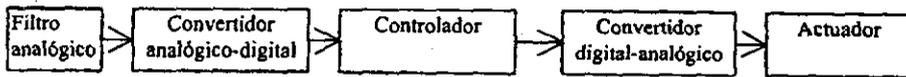


Figura 1.2. Esquema básico de las etapas de potencia en control digital

Aunque el esquema que se acaba de explicar podría parecer una forma complicada de proceder porque existen técnicas basadas en modelos analógicos, aparentemente no se explica el convertir las señales a una forma digital para después volverlas a convertir en señales analógicas.

Algunas razones se exponen a continuación :

- Usando señales digitales se puede almacenar y transmitir la información con mucho mayor facilidad que cuando se emplean señales analógicas.

- El procesamiento de señales digitales es estable y confiable, también ofrece ciertas posibilidades técnicas que no están disponibles con los métodos analógicos.
- Los avances rápidos en el diseño de circuitos integrados y en su manufactura permiten producir dispositivos cada vez más poderosos a un costo cada vez más bajo.

A lo largo de los siguientes temas se profundizará en diversas herramientas útiles en el análisis y diseño dentro del control digital, dichas herramientas pueden emplearse confiadamente si tenemos las siguientes características en nuestro sistema.

Principio de superposición.

“Si se aplica una entrada $X_1[n]$ aplicada a un sistema digital produce la salida $Y_1[n]$, y que una entrada $X_2[n]$ produce una salida $Y_2[n]$. Entonces el sistema es lineal si su respuesta a $(X_1[n]+X_2[n])$ es $(Y_1[n] + Y_2[n])$.

Y más aún, la linealidad implica que la respuesta a una entrada $aX_1[n]$ es $aY_1[n]$, donde a es un coeficiente constante (también llamado factor de peso). Para generalizar, la entrada :

$$aX_1[n]+bX_2[n]+cX_3[n]+...$$

debe producir la salida :

$$aY_1[n]+bY_2[n]+cY_3[n]+...$$

Aparentemente esta propiedad es obvia o trivial, pero hay que notar que muchos procesos sencillos no cuentan con ella. Por ejemplo, supongamos que tenemos un sistema le saca la raíz cuadrada a cada valor aplicado a su entrada. Esto para dos entradas aplicadas separadamente es así :

$$Y_1[n]=(X_1[n])^2 \text{ y } Y_2[n]=(X_2[n])^2$$

Cuando las dos entradas son sumadas y aplicadas simultáneamente, la salida es

$$Y_3[n]=(X_1[n]+X_2[n])^2=(X_1[n])^2+(X_2[n])^2+2X_1[n]X_2[n]$$

Claramente, esto no es la suma de las respuestas a $X_1[n]$ y $X_2[n]$ aplicadas por separado.

La propiedad más importante de los sistemas lineales, y que está íntimamente relacionada con el principio de superposición, es la de la preservación de la frecuencia. Significa que si nosotros aplicamos al sistema alguna señal de entrada que contenga ciertas frecuencias, la salida puede contener solamente las mismas frecuencias y no otras. La propiedad se basa en el hecho de que una señal senoidal aplicada a cualquier sistema lineal siempre produce una forma similar a la salida a la misma frecuencia de la entrada. Si aplicamos una señal que contenga muchas frecuencias el principio de superposición nos dice que la salida total debe ser la suma de las salidas a cada frecuencia individual de entrada, consideradas por separado.

La salida deberá contener sólo aquellas frecuencias presentes en la entrada.

La siguiente propiedad es la de invariancia con el tiempo. Se dice que un sistema tiene esta propiedad si sus demás propiedades no cambian con el tiempo. El único efecto de un cambio en el tiempo en una señal de entrada es el correspondiente cambio en el tiempo de salida.

Para ilustrar mejor, considérese la siguiente función :

$$Y[n]=X[n]+X[n-1]+X[n-2]+\dots$$

que podríamos decir es un integrador digital

la ecuación recursiva de la pasada serie :

$$Y[n]=Y[n-1]+X[n].$$

La linealidad se deduce como sigue. Supongamos que tenemos la salida $Y_1[n]$ como respuesta a la entrada $X_1[n]$ y $Y_2[n]$ como respuesta a $X_2[n]$. Ahora si sumamos las entradas la salida será $(Y_1[n]+Y_2[n])$ que es la superposición de las dos salidas.

El integrador es invariante con el tiempo porque siempre que se aplique una señal dada, la salida será la misma independientemente del momento en el que se aplique. En general una función lineal involucra los siguientes tipos de operaciones en sus entradas y sus salidas :

- Almacenamiento/retraso
- suma/resta
- multiplicación por constantes

Otro ejemplo de funciones lineales sería el siguiente :

$$y[n]=1.8523y[n-1]-0.9483y[n-2]+x[n]-1.9021x[n-1]+x[n-2]$$

Podemos ver que solamente involucra los tipos de operaciones de arriba, es por tanto lineal.

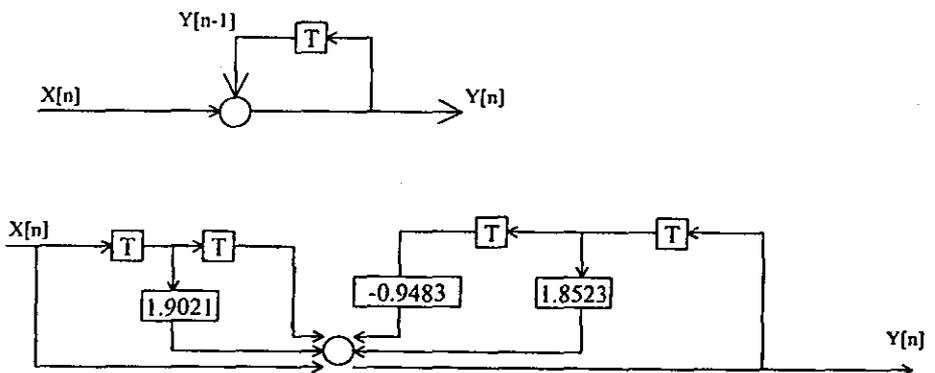


Figura 1.3. Diagramas de bloques de las funciones anteriores.

Otras propiedades.

Hemos mencionado que un sistema lineal tiene las siguientes propiedades ; obediencia al principio de superposición, preservación de la frecuencia, invariancia con el tiempo, etc.

Existen otras propiedades :

Propiedad asociativa : Significa que podemos analizar un sistema complicado, separándolo en subsistemas más sencillos.

Propiedad conmutativa : Significa que los subsistemas pueden ordenarse de cualquier forma sin afectar el desempeño del sistema.

Casualidad : Dice que la salida depende de las entradas actuales o previas. Podemos decir que todos los sistemas de la realidad son casuales ya que ninguno anticipa el futuro.

Estabilidad. Un sistema tiene esta propiedad cuando se obtiene una salida limitada en respuesta a una entrada limitada. Significa que si excitamos un sistema con una señal de entrada que no crece sin límite, entonces la salida no crecerá sin límite tampoco.

Inversibilidad. Si tenemos un sistema que responde con $Y[n]$ al excitarlo con $X[n]$, entonces su inverso producirá $X[n]$ como respuesta a $Y[n]$. La mayoría de los sistemas no son inversibles.

Posesión de memoria : Esta propiedad está presente cuando la salida actual depende de una o más entradas previas $X[n-1]$, $X[n-2]$, en otras palabras debe contener elementos de almacenamiento y/o retraso.

1.2. Modelado De Sistemas Fisicos

Una de las características del control moderno es que se tienen que determinar modelos matemáticos de los sistemas que se controlen, y es precisamente esta característica la razón por la que ya hayan sido desplazados por otras filosofías. Estas nuevas tendencias de control buscan depender cada vez menos del modelo matemático de las plantas. Una buena analogía de lo que pretenden las nuevas corrientes es la del operario de una máquina (controlador), no conoce su método de funcionamiento, y no le es necesario, puesto que la opera adecuadamente.

Esta tesis presenta teoría que pertenece al control clásico, por tanto se da una breve síntesis del modelado de sistemas físicos.

Es importante notar que los modelos que resulten de este análisis deben ser lineales, de lo contrario no aplican y sólo obtendríamos problemas al tratar de estudiarlos.

Básicamente un modelo matemático se desarrolla al aplicarle las leyes físicas a un sistema determinado. A partir de este modelo se sabe qué parámetros son dependientes de otros y se decide cuáles medir y cuáles controlar. Sin embargo, en muchos casos, no se tiene el conocimiento de las leyes físicas que gobiernan el comportamiento de un sistema, y por tanto desarrollar un modelo matemático podría parecer imposible. Cuando esto sucede es necesario

recurrir a las experimentaciones, sometiendo al sistema a un conjunto de entradas conocidas y midiendo sus salidas. Al analizar estos datos podemos encontrar un modelo.

Es importante decir que en la mayoría de los casos se tienen que hacer idealizaciones para obtener un modelo más sencillo que el modelo resultaría sin hacerlas. Estas idealizaciones restan precisión al modelo pero simplifican operaciones como diseño y modelado y agilizan los cálculos en el procesamiento de los datos. Es muy importante encontrar el justo medio entre simplicidad y exactitud. Esto se determina al decidir cuáles son los parámetros despreciables y cuáles son importantes en la exactitud del modelo.

Para efectos de esta tesis se dará una breve revisión a los modelos de los sistemas hidráulicos.

Existen diferentes elementos en la mayoría de los sistemas, a continuación se listan y explican :

- Variables de potencial
- Variables de carga
- Elementos de inercia para la variable de potencial
- Elementos de inercia para la variable de carga
- Elementos de pérdida de energía por transporte.

Potencial es aquel fenómeno físico que hace mover a la carga. En el caso de los sistemas hidráulicos la variable de potencial es la presión, mientras que la variable de carga es el gasto. La diferencia de presiones en un sistema mueve al líquido haciendo que se genere un flujo.

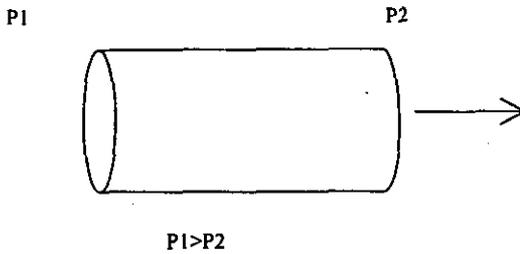


Figura 1.4. El flujo se genera por una diferencia de presiones

Mientras más grande sea la variable de potencial, tenderá a ocasionar una rapidez de movimiento mayor en la variable de carga. Si tenemos un fluido recorriendo un tubo es debido a una diferencia de presiones entre los extremos del tubo, y mientras más grande sea esta diferencia mayor será la cantidad de fluido que se mueve.

Los elementos de inercia para la variable de potencial son aquéllos que oponen alguna resistencia al cambio de dichas variables. En sistemas hidráulicos los tanques de almacenamiento son elementos de este tipo.



Figura 1.5 Un tanque se opone a variaciones en la presión.

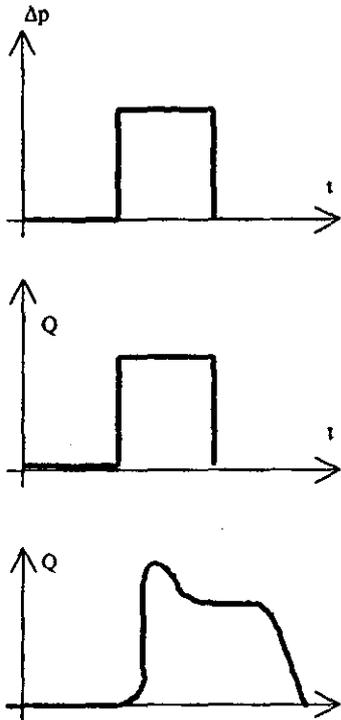
En el dibujo anterior una variación de Q_1 no se reflejará de igual forma en Q_2 , debido a que la presión generada por el tanque de almacenamiento lo impide.

La presión es igual a una constante, llamada capacitancia hidráulica, multiplicada por la integral del flujo con respecto al tiempo.

Los elementos de inercia de la variable de carga son similares a los de la variable de potencial, pero actúan sobre la variable de carga.

Para sistemas hidráulicos los elementos de inercia en la carga son los tubos mismos estando fluyendo un fluido a través de ellos y al presentarse una variación en la presión en alguno de los extremos del tubo no se verá afectado el flujo de salida debido a la inercia del fluido que tenderá a seguir el curso que lleva.

La idea anterior se puede entender mejor al ver las siguientes gráficas.



Esta figura muestra el comportamiento de un fluido en un tubo al ser sometido a un cambio súbito de presiones en los extremos del tubo. El gráfico de arriba muestra la diferencia de presiones variando con el tiempo. El gráfico que le sigue muestra el comportamiento de un fluido sin inercia, y el último muestra uno con inercia (real)

Figura 1.6 Inercia.

La medida de que tanta tendencia a seguir fluyendo se tiene en un flujo se calcula multiplicando la derivada con respecto al tiempo del flujo y una constante llamada inercancia. Ésta está en función de la geometría del tubo y de las propiedades del fluido.

Los elementos de pérdida de energía por transporte, son los que disipan energía del sistema, la velocidad de disipación es igual a la cantidad de carga que se está moviendo multiplicada por una constante relacionada a la geometría del tubo y a las propiedades del fluido.

Los tubos y accesorios son elementos de pérdida en hidráulica, al haber contacto entre el fluido moviéndose y las paredes del tubo se genera fricción y por tanto pérdida de energía, que se refleja como una caída de presión.

El análisis riguroso de las pérdidas en tuberías dice que éstas son proporcionales al cuadrado de la cantidad de carga, pero idealizando y tomando un rango de operación relativamente reducido puede considerarse esta relación como lineal.

Transformada de Laplace

La transformada de Laplace es la herramienta más útil en el análisis de sistemas. Básicamente consiste en una transformación que simplifica los cálculos al resolver sistemas de ecuaciones diferenciales lineales.

La manera de como se da esta simplificación es el hecho de que la diferenciación en función del tiempo se convierte en una multiplicación por una variable compleja s , las ecuaciones diferenciales en el dominio del tiempo se convierten en ecuaciones algebraicas en s .

Debido a que este es un trabajo más bien práctico no se hará una profundización en este tema, se recomienda a los interesados revisar la bibliografía al final de esta tesis.

Para concluir podemos decir que la transformada de arroja información muy útil en cuanto a ganancia, estabilidad y otros parámetros importantes en el diseño de sistemas de control.

1.3. Transformada Z

Una herramienta que se ha desarrollado para analizar y diseñar sistemas digitales es la transformada z. El papel de la transformada z en los sistemas digitales es análogo al de la transformada de Laplace en los sistemas continuos. Aunque esta herramienta ya ha sido desplazada por otras más poderosas como la lógica difusa o el método espacio-estado, para efectos de esta tesis, puede ser utilizada con confianza. La transformada z funciona sólo cuando se tiene un sistema SISO (*single input single output*) y velocidad de muestreo uniforme.

Para sistemas multivariados, con diferentes velocidades de muestreo, no lineales o variantes con el tiempo, la transformada z pierde alcance y capacidad de análisis.

El porqué hace falta otra transformada, además de la de Laplace, se explica al ver la expresión de una señal digital.

Ecuación 1
$$L\{f^*(t)\} = F^*(s) = \sum_{k=0}^{\infty} f(kT) e^{-kTs}$$

Que es la transformada de Laplace de un tren de impulsos $f^*(t)$.

Generalmente esta expresión contiene como factor e^{-Ts} , que es una función irracional de s . Es fácil ver que si tenemos una expresión que incluya este término, pueden aparecer serias dificultades al sacar su inversa. Por esto es necesario convertir la función irracional a un racional, concretamente hacerla una función de z , donde z tenga un compromiso con s . Como puede verse la transformada z es una reacción obvia por parte de los matemáticos al diseñar herramientas útiles al control digital, y queda definida al establecer la relación entre s y z como sigue :

$$z = e^{Ts}$$

y despejando tenemos :

$$s = \frac{1}{T} \ln(z)$$

que llamaremos ecuación 2

En las ecuaciones anteriores T es el periodo de muestreo y z es una variable compleja.

Sustituyendo 2 en 1 tenemos.

$$F^*(s = \frac{1}{T} \ln(z)) = F(z) = \sum_{k=0}^{\infty} f(kT) z^{-k}$$

Que es un función racional de z , por lo tanto podemos definir $F(z)$ como la transformada z de $f(t)$.

$$F(z) = \text{transformada } z \text{ de } f(t) = z \{f(t)\}$$

Obsérvese que el símbolo quiere decir "la transformada z de..."

$$\text{También : } F(z) = \text{transformada de Laplace de } f^*(t) \Big|_{s=\frac{1}{T} \ln(z)}$$

$$= F^*(s) \Big|_{s=\frac{1}{T} \ln(z)}$$

En términos generales, para encontrar la transformada z de una función se procede así :

1. $f(t)$ se muestrea y se tiene como resultado del muestreo $f^*(t)$
2. Se toma la transformada de Laplace de $f^*(t)$ y

$$F^*(s) = \mathcal{L}\{f^*(t)\} = \sum_{k=0}^{\infty} f(kT) e^{-kTs}$$

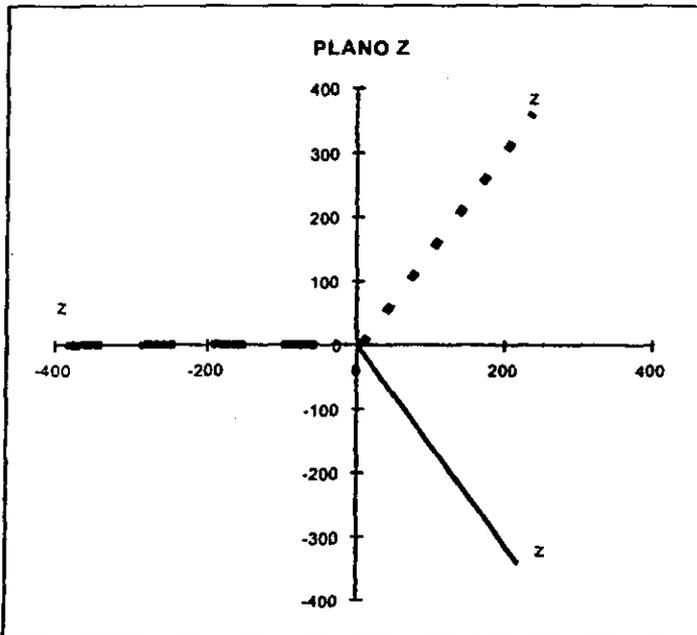
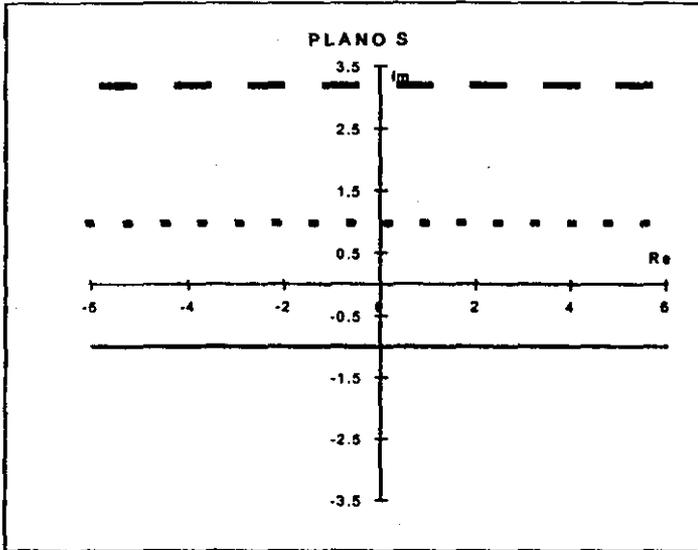
3. Se reemplaza e^{Ts} por z en $F^*(s)$ para obtener $F(z)$ y

$$F(z) = \sum_{k=0}^{\infty} f(kT) z^{-k}$$

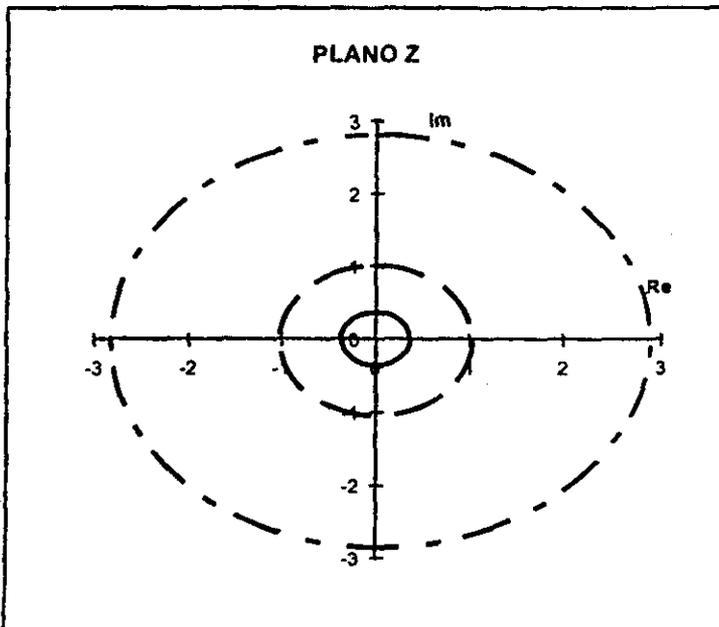
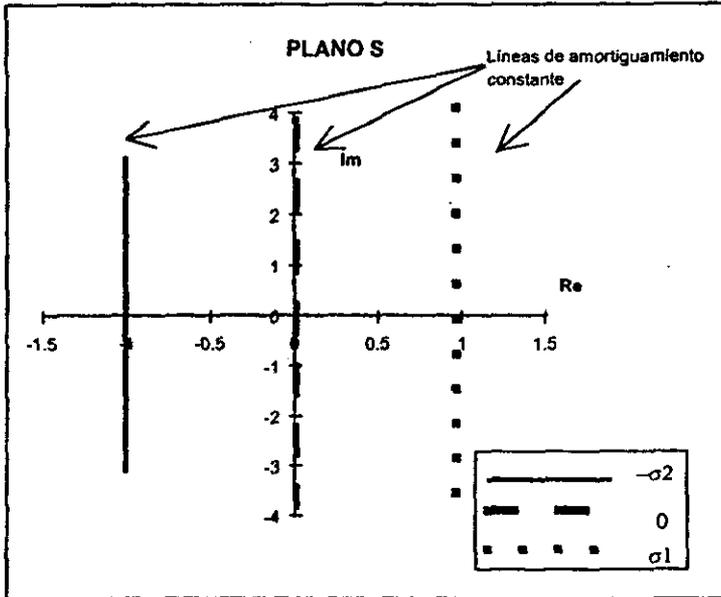
Mapeos entre los planos S y Z.

Analizar mapeos entre el plano s y el plano z por la transformación $z=e^{Ts}$ es muy importante e ilustrativo. El diseño y análisis de sistemas de control analógico se basa en la configuración de

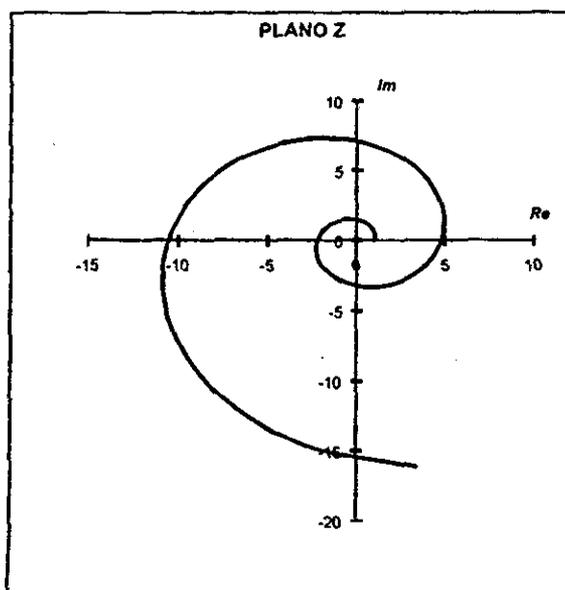
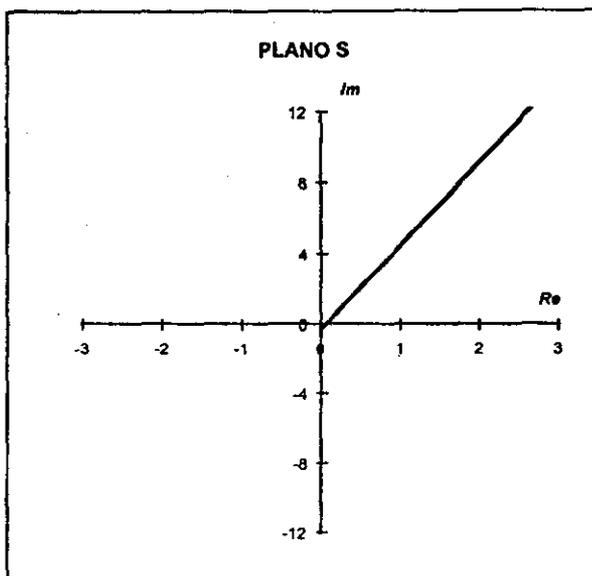
Mapeo de Amortiguamiento Constante



Mapeo de Frecuencia Constante



Mapeo de Razón de Amortiguamiento Frecuencia Constante



Transformada Inversa.

A pesar de que la transformada z no es biyectiva. (cuando aplicamos la transformada z a una función $f^*(t)$, no forzosamente tendremos a $f^*(t)$ si aplicamos la inversa a $F(z)$.), podemos decir que la transformada inversa de z es inyectiva.

Los métodos para encontrar la transformada inversa se mencionan y se deja para los estudiosos la profundización en este tema.

- Método de expansión de fracciones parciales.
- Método de series de potencias.
- Método de la inversión de la fórmula.

Teoremas de la transformada z .

La aplicación de la transformada z puede ser simplificada cuando se aplican sus teoremas, a continuación se presentan.

- Suma y resta.

Si $f_1(t)$ y $f_2(t)$ tienen transformada z :

$$F_1(z) = z [f_1(t)] = \sum_{k=0}^{\infty} f_1(kT) z^{-k}$$

y

$$F_2(z) = z [f_2(t)] = \sum_{k=0}^{\infty} f_2(kT) z^{-k}$$

-Multiplicación por una constante.

Si $F(z)$ es la transformada z de $f(t)$, entonces

$$Z[af(t)] = aZ[f(t)] = aF(z)$$

donde a es una constante.

-Traslación real

Si $f(t)$ tiene transformada z $F(z)$, entonces :

$$Z[f(t - nT)] = z^{-n} F(z)$$

y

$$Z[f(t + nT)] = z^n \left[F(z) - \sum_{k=0}^{n-1} f(kT) z^{-k} \right]$$

donde n es un entero positivo

- Traslación compleja

Si $f(t)$ tiene transformada z $F(z)$, entonces

$$Z[e^{\pm at} f(t)] = F(z \pm a) \Big|_{z=ze^{\pm aT}} = F z e^{\pm at}$$

donde a es una constante.

- Teorema del valor inicial.

Si la función $f(t)$ tiene transformada $z F(z)$, y si el límite

$$\lim_{z \rightarrow \infty} F(z)$$

existe, entonces

$$\lim_{k \rightarrow 0} f(kT) = \lim_{z \rightarrow \infty} F(z)$$

El teorema simplemente establece que el comportamiento de la señal discreta $f^*(t)$ en la vecindad de $t=0$ es determinado por el comportamiento de $F(z)$ a $z=\infty$.

- Teorema del valor final.

Si la función $f(t)$ tiene transformada $z F(z)$ y si la función $(1-z^{-1})F(z)$ no tiene polos dentro o fuera del círculo unitario en el plano z , entonces.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} f(kT) = \lim_{z \rightarrow 1} (1 - z^{-1}) F(z)$$

- Teorema de diferenciación parcial.

$$Z \left\{ \frac{\partial}{\partial a} [f(t, a)] \right\} = \frac{\partial}{\partial a} F(z, a)$$

Supongamos que la transformada z de la función $f(t, a)$ se representa por $F(z, a)$, donde a es una variable independiente o una constante. La transformada z de la derivada de $f(t, a)$ con respecto a " a " está dada por :

- Convolución real.

Si las funciones $f_1(t)$ y $f_2(t)$ tienen transformada $F_1(z)$ y $F_2(z)$, respectivamente y

$f_1(t)=f_2(t)=0$ para $t<0$ entonces.

$$F_1(z)F_2(z) = Z \left[\sum_{n=0}^k f_1(nT) f_2(kT - nT) \right]$$

- Convolución compleja.

Si las transformadas z de $f_1(t)$ y $f_2(t)$ son $F_1(z)$ y $F_2(z)$, respectivamente, entonces la transformada z del producto de las dos funciones es

$$Z[f_1(t)f_2(t)] = \frac{1}{2\pi j} \oint_{\Gamma} \frac{F_1(\xi)F_2(\xi z^{-1})}{\xi} d\xi$$

donde Γ es un círculo que está en la región descrita por

$$\sigma_1 < |\xi| \frac{|z|}{\sigma_2}$$

$$y |z| > \max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4)$$

σ_1 = radio de convergencia de $F_1(\xi)$

σ_2 = radio de convergencia de $F_2(\xi)$

Limitaciones del transformada z .

Se ha mostrado a la transformada z como la herramienta idónea en la representación de los sistemas lineales digitales. Sin embargo la transformada z tiene limitaciones y en ciertos casos se debe tener cuidado en la aplicación e interpretación de los resultados obtenidos.

Se deben considerar los siguientes aspectos cuando se use la transformada z .

- La transformada z se basa en la idealización de la señal muestreada como un tren de impulsos cuyas áreas son iguales a la magnitud de la señal de entrada al muestreador en los instantes de muestreo. Esta consideración es válida sólo si el tiempo de muestreo es pequeño comparado con la constante de tiempo significativa del sistema.
- La transformada z de la salida de un sistema lineal $c(z)$, especifica sólo los valores de la función del tiempo $c(t)$ en los momentos de muestreo, $c(z)$ no contiene información del valor de $c(t)$ entre los instantes de muestreo.
- Al analizar un sistema lineal con el método de la transformada z , la función de transferencia del sistema $G(s)$ debe tener un polo más que ceros, o bien, la respuesta a un impulso de $G(s)$ no debe tener alguna discontinuidad a $t=0$, de otra forma, la respuesta del sistema obtenida por la transformada z es engañosa y a veces incluso incorrecta.

1.4. Transformada De Fourier

La transformada de Fourier es otra poderosa herramienta en el análisis de sistemas de control.

En un libro publicado en Francia en 1822, Fourier mostró que las señales periódicas pueden ser representadas como sumas de señales senoidales. También mostró que las señales aperiódicas pueden ser consideradas como la integral de senoidales desfasadas una con respecto de otra. Estas dos ideas forman la base de las series de Fourier y de la transformada de Fourier, y han tenido una profunda influencia en muchos campos de la ingeniería y la ciencia aplicada como la electrónica y el procesamiento de señales.

El análisis de Fourier se ha aplicado a fenómenos de tiempo continuo a lo largo de doscientos años. El desarrollo tan dramático en la electrónica digital y la computación han despertado gran interés en las técnicas digitales. Las computadoras se usan más ampliamente para analizar los componentes de frecuencia de las señales y la respuesta en frecuencia de diversos sistemas. Por esta razón se usará la transformada de Fourier para señales digitales.

Antes de explicar los principios del análisis de Fourier y su papel en la ingeniería de control, es importante considerar por qué es tan usado. Hay tres razones principales.

Las señales senoidales y exponenciales ocurren en el mundo real y en el mundo de la tecnología. Aun cuando una señal no es de este tipo, puede ser analizada con sus componentes de frecuencia. La respuesta de cualquier sistema lineal para cada componente es sencilla;

puede cambiar la amplitud y la fase, no la frecuencia. La respuesta total se encuentra por superposición.

Si una señal de entrada se describe por su espectro de frecuencias, y un sistema lineal por su respuesta en frecuencia, entonces la señal de salida se encuentra por multiplicación. Esto es más fácil de llevar a cabo y de ver que la convolución en el dominio del tiempo equivalente.

Por si el lector no está familiarizado con el análisis de Fourier, se da una breve explicación de sus alcances y sus principios.

Una señal siempre se puede analizar como un conjunto de senoidales con apropiadas amplitudes y frecuencias.

Si la señal es simétrica con respecto al origen, contiene sólo cosenos, si es asimétrica con respecto al origen contiene sólo senos.

La aproximación a la señal original viene dada por el número de componentes que se tomen, mientras sea mayor se obtiene una mejor aproximación.

Si la señal es periódica sus componentes de frecuencia están desfasados siempre igual. El espectro de frecuencias es discreto y se le conoce como espectro de línea. Se le describe matemáticamente por series de Fourier.

La forma trigonométrica de la serie de Fourier puede ser representada en su forma exponencial, expresando cada seno y coseno como un par de exponenciales imaginarios.

Cuando una señal no es repetitiva (aperiódica), puede ser expresada como una suma infinita (integral) de senoidales o exponenciales no relacionadas entre sí. El espectro de frecuencia correspondiente es continuo y descrito matemáticamente por la transformada de Fourier. La transformada de Fourier de una señal da un espectro. El proceso complementario, la transformada inversa de Fourier nos permite regenerar la señal.

Sólo las señales pueden describirse en el dominio de la frecuencia por su espectro, un sistema puede describirse por su respuesta en frecuencia. Esto indica cómo cada componente senoidal (o exponencial) de una señal se modifica en amplitud y fase cuando pasa a través del sistema.

El producto de la respuesta en frecuencia y la señal de entrada da el espectro de la señal de salida.

Teorema del muestreo.

En el capítulo uno se dijo que se acostumbraba usar un filtro analógico para limitar el rango de frecuencias antes del muestreo, y se coloca para reducir el ruido (generalmente de alta frecuencia) de los componentes de la señal analógica para evitar que el ruido cambie a una frecuencia menor debido al proceso de muestreo (denominado traslape).

En la figura se muestra un ejemplo de traslape, donde una señal oscilatoria de 60 Hz representada por la línea continua se está haciendo un muestreo a 50 Hz (cada flecha indica un

muestreo), como resultado tenemos una señal de 10 Hz representada por la línea punteada. El traslapo ocurrirá en cualquier momento en el que la velocidad de muestreo no sea al menos dos veces más rápida que cualquiera de las frecuencias de la señal que se está haciendo un muestreo.

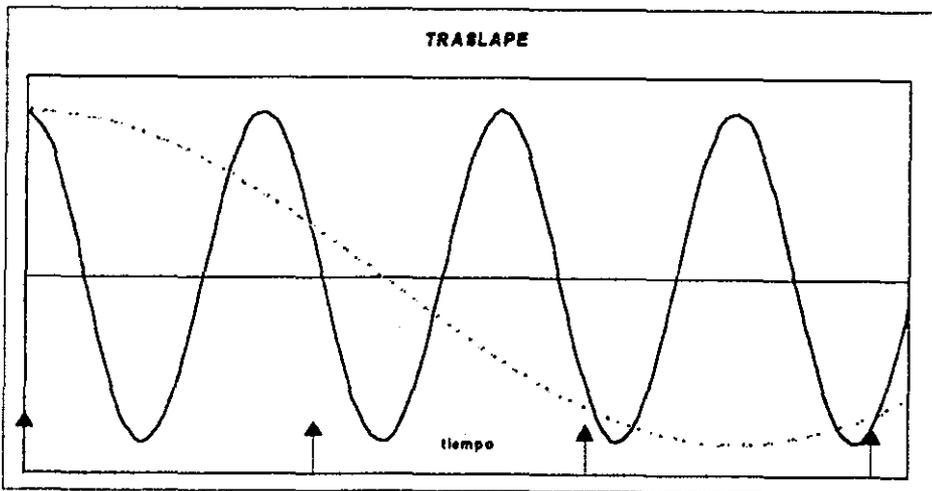
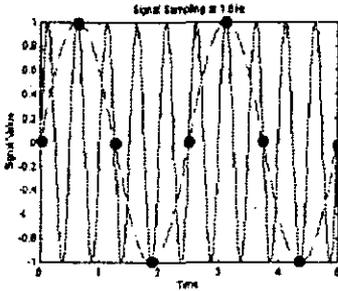


Figura 1.6 Cuando se muestrea a una razón inadecuada se tiene como resultado señales diferentes a las esperadas

La observación pasada acerca de la mínima frecuencia de muestreo necesaria para reconocer una señal continua plantea ahora una nueva interrogante acerca de la velocidad de muestreo adecuada cuando se está digitalizando una señal: ¿Cuáles son los límites tanto superiores como inferiores en la velocidad de muestreo para un sistema determinado?. Teóricamente no hay límite superior en la frecuencia de muestreo, sin embargo cualquier muestreador físico tiene una máxima velocidad. Cuando la frecuencia de muestreo tiende a infinito se tiene una aproximación

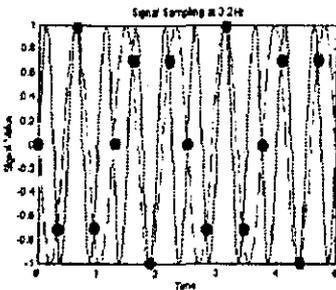
La figura de arriba muestra la transformada de Fourier de la señal de entrada, puede verse el traslape de las frecuencias.

Muestreo a 1.6 Hz



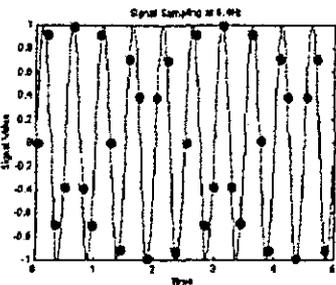
Aquí el muestreo da una señal de 0.4 Hz y no la señal de 2 Hz que realmente queremos. El número de muestreos es muy pequeño para recuperar exactamente la señal de 2 Hz. También puede verse que no se muestrearon todos los ciclos de la señal causando pérdidas de información de la señal. Los puntos negros son el instante de muestreo, la línea continua es la señal original y la punteada es la resultante de hacer el muestreo

Muestreo a 3.2 Hz



Aquí se produce una señal de 1.2 Hz. A pesar de que el número de muestreos es mayor que el del caso anterior, todavía estamos por debajo de la frecuencia mínima de muestreo. Hay alguna pérdida de información pero no es tan severa como en el caso del muestreo a 1.6 Hz.

Muestreo a 6.4 Hz



Aquí se han hecho algunas modificaciones para reproducir la curva exacta. Nótese que la señal original y la muestreada coinciden. También se puede ver que hay más de dos muestreos por ciclo de la señal. Al incrementar la frecuencia de muestreo, incrementamos el número de muestreos, lo cual da una señal reproducida con más exactitud.

Figura 1.9 Traslape o *Aliasing*

Las figuras anteriores muestran físicamente las ideas anteriormente expuestas.

Como conclusión puede decir que la mínima frecuencia de muestreo es $2\omega_c$,

donde ω_c es la componente de más alta frecuencia

CAPITULO 2

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Introducción Ingeniería de Procesos

En los últimos años la ciencia aplicada, concretamente la petroquímica ha desarrollado productos más eficientes, baratos, ecológicos y con propiedades mecánicas que aventajan a los anteriores.

Este desarrollo se explica por dos razones fundamentales; el crecimiento de la demanda en un mundo competido obliga a tratar de sacar más provecho de los recursos que se tienen o bien se trata de conseguir el mismo beneficio con menos recursos que con los que se cuentan.

En el caso de la industria manufacturera, de productos primarios o industriales, este fenómeno se hace cada vez más patente, la materia prima se encarece mientras que la demanda y la competencia aumentan. Es por esta razón que se exige el desarrollo.

La otra razón fundamental es el desarrollo en otras disciplinas que dan acceso a productos, tecnología y recursos más poderosos, en este sentido se propicia, no se obliga.

Los adelantos en otras ramas de la ingeniería, como son la mecánica, eléctrica, electrónica, le dan acceso a la ingeniería de procesos a diseños cada vez más ambiciosos, siendo éstos mucho más rentables, eficientes y controlables. Todo esto se logra con condiciones de proceso y de control que sólo algunos años atrás pertenecían a la ciencia-ficción. Los límites en las condiciones de proceso se han modificado, haciendo el rango de proceso muy grande, tanto en los umbrales superiores como inferiores. Se alcanzan temperaturas y presiones cada vez más altas y bajas, todo esto sin mencionar que la controlabilidad de estos rangos agrandados cada vez es mayor.

Hablando más concretamente de ingeniería de procesos, podemos decir que existen dos tipos de producción, por lote o continua.

La producción por lotes se ocupa cuando se necesita poca cantidad de producto, o las condiciones de operación se alcanzan y se mantienen fácilmente, pudiendo apagarse o encenderse los equipos sin que los costos originados signifiquen mucho dentro del total de costos operativos.

Por otro lado la producción continua se emplea donde es necesaria gran cantidad de producto y las condiciones de operación son difíciles de alcanzar, haciéndose necesario mantener los equipos operando constantemente para abatir costos de puesta en marcha, desperdicios en

materia prima por inicio o fin de proceso, etc.

En este tipo de proceso es donde se requiere un control más estricto de todas las variables que influyen en su desempeño.

Lo anterior se explica al ver el número de variables que afectan a un proceso de este tipo:

- Tiempo de permanencia.
- Velocidad de reacción.
- Tipo de reacción.
- Cantidad de reactivos de entrada.
- Condiciones de operación del equipo (Presión y Temperatura).

De aquí se deduce que los procesos continuos son los que más beneficios han obtenido con la implementación de dispositivos controladores de reciente aparición.

2.2. Problema real y práctico

El objetivo de esta tesis es el diseño e implementación de un dispositivo controlador de nivel de líquido en un tanque de un proceso industrial continuo.

La justificación viene de la existencia de procesos industriales que requieren ser eficientados,

debido a la difícil situación por la que la industria de la transformación de nuestro país está pasando.

La manera de eficientarlos es el emplear controladores que permitan mantener un control más riguroso del proceso en vistas a obtener el mayor provecho del proceso en general, además de que al implementar este tipo de tecnología se abaten costos de mano de obra.

Entre estos controladores podemos citar varios, tantos como variables en un sistema: de presión, temperatura, flujo másico, flujo de calor, etc.

En este trabajo se ataca el problema de controlar el nivel de fluido líquido en un tanque que forma parte de un proceso industrial continuo. Controlar el nivel tiene mucha importancia en operaciones como almacenamiento, precipitación, neutralización, control de proporciones en proceso, etc.

El control sobre el nivel debe tener la máxima precisión posible, ya que se supondrá que variaciones pequeñas en el nivel deseado acarrearán disminuciones considerables en el rendimiento general del proceso.

Cuando se habla de control sobre un sistema, además de definir cuáles son las variables a controlar, hay que precisar cuál será el criterio de control, es decir hay que determinar también

que es lo que más nos importa del sistema. Puede ser la velocidad con la que la variable controlada alcance un valor cercano al deseado o puede ser que nos interese que la variable alcance un valor igual al deseado sin importar el tiempo que le tome, etc.

Entre los criterios de control más utilizados podemos mencionar:

- ITAE (Integral del Tiempo por el valor absoluto del error). Da un mayor peso a los errores

estacionarios mientras más crece el tiempo $ERROR = \int_0^T |\epsilon| t dt$

- Integral del error al cuadrado. Da más peso al error mientras más alejado esté del valor

deseado. $ERROR = \int_0^T \epsilon^2 dt$

Donde ϵ es el error instantáneo = set point - lectura instantánea de la variable controlada.

CAPITULO 3

IMPLEMENTACION PRACTICA.

1. Información general de la implementación práctica

El controlador se implementó en un tanque de agua de 800 cm^2 de área de base (20cm por 40 cm), con una altura de 25 cm. Este tanque está unido a una mesa, y es en esta donde se ubicaron los otros dispositivos orientados al control del nivel, como son actuadores, sensores, fuentes de poder, etc.

Para facilitar la descripción del sistema se dividirá en secciones tomando en cuenta la función de cada una de ellas. En páginas posteriores se expone a detalle cada una de estas secciones.

Sistema de bombeo.

Es el encargado de mover el nivel de fluido en el tanque, quitando o agregando agua al mismo.

Sistema de medición

Se encarga de medir el nivel de agua en el tanque.

Control

Se encarga de determinar la acción a tomar, ponderando el estado en el que se encuentre el sistema y el estado en que se quiere esté el sistema.

Planta

Es el tanque de agua.

Se muestra un dibujo de imitación para aclarar las ideas anteriores.

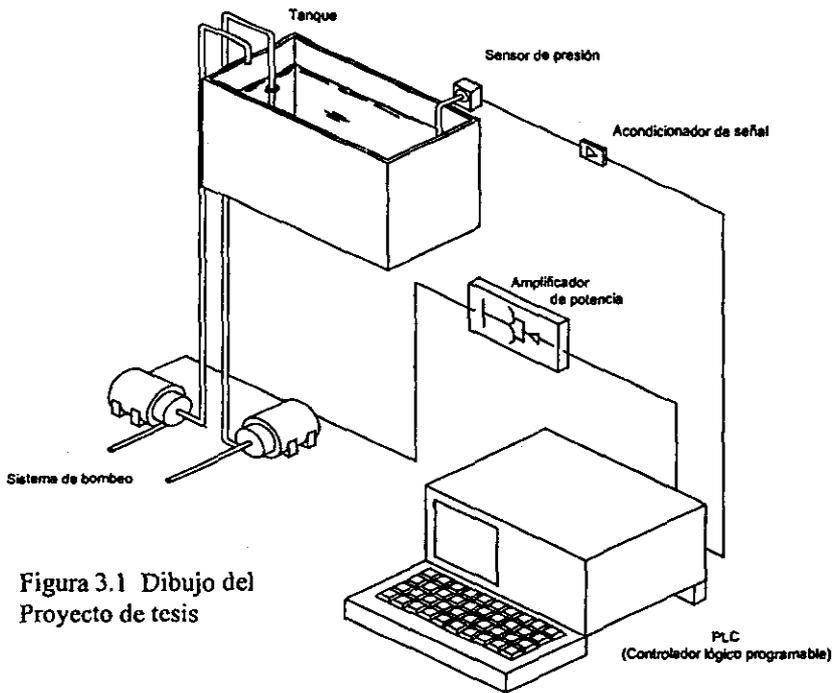


Figura 3.1 Dibujo del Proyecto de tesis

La información se mueve entre secciones como a continuación se explica:

La señal del sistema de medición pasa al control, después de ser amplificada y acondicionada por un dispositivo cuya descripción aparece en la sección de amplificadores con el nombre de acondicionador de señal.

El control recibe información del sistema de medición y del usuario. Después de procesar los datos de entrada emite una señal dirigida al sistema de bombeo la cual es amplificada por el amplificador de potencia. Este amplificador se describe en la sección de amplificadores.

El sistema de bombeo recibe la información proveniente del controlador previamente potenciada por el amplificador de potencia.

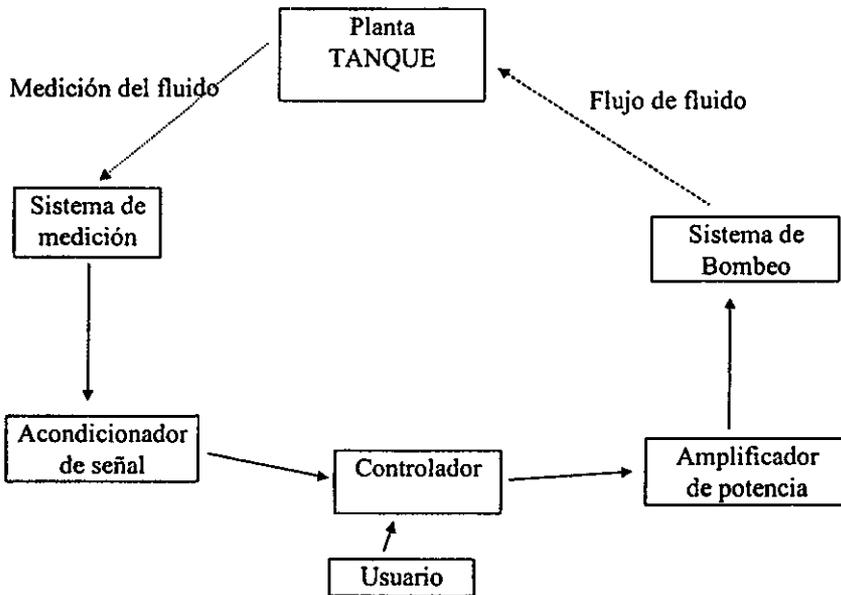


Figura 3.2 Diagrama de flujo de información en el sistema (las flechas indican la dirección del flujo)

La exposición se hará de la siguiente forma: Primero se expondrán los sistemas de bombeo y medición. Esto se debe a que presentan características propias que deben ser consideradas también como parte de la planta. Es decir, además de modelar y considerar el comportamiento dinámico del tanque solo, hace falta prever el comportamiento dinámico de los actuadores, ya que en muchas ocasiones los únicos dispositivos disponibles presentan no-linealidades, inercia o algún tipo de comportamiento que de no ser considerado acarrea un control muy alejado al que se esperaba.

Después se hace un apartado para los amplificadores incluyendo una pequeña introducción teórica. En este apartado se muestran los diagramas de conexión de los dos amplificadores. A continuación se muestra la solución teórica al problema y se llega al diseño del controlador teórico óptimo para este problema.

Luego se presenta la implementación real en el PLC del controlador diseñado. También se incluye el listado de los programas para el PLC.

3.2. Sistema De Medición

El sistema de medición se encarga de comparar y verificar el estado del sistema, concretamente el nivel de líquido presente en el tanque. Para esto se utilizó un sensor de presión pues conociendo este parámetro podemos calcular la longitud de la columna de fluido que tiene encima el punto en el que estamos midiendo la presión.

Se tiene la siguiente relación

$$P=gh\rho$$

Donde

P = Diferencia de presiones entre la superficie libre del recipiente y el punto cuya presión es conocida

g =Gravedad de la tierra

h =longitud de la columna de fluido que tiene encima el punto en el que estamos midiendo la presión.

ρ =Densidad del fluido

Para saber el nivel real del tanque utilizando este principio basta con medir la presión en el fondo del tanque.

Los sensores usados son de la marca OMEGA y el número de modelo es PX26-005GV y su rango de operación es de 0 a 5 PSIG.(0 a 3.51 metros de columna de agua). Su funcionamiento consiste en una resistencia variable que forma parte de un puente de Wein, excitado con un voltaje constante de 8 volts.

La excitación la suministra una fuente de voltaje diseñada para este propósito. El fabricante de esta fuente es OMEGA y su número de serie es PSX25.

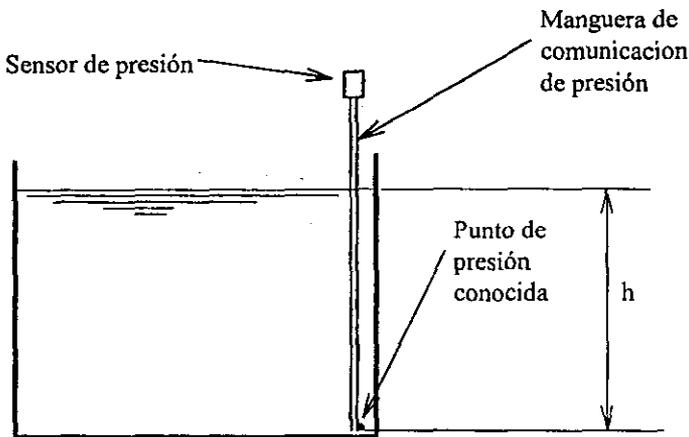


Figura 3.3 Diagrama del sistema de medición

Las especificaciones técnicas de los sensores se detallan a continuación

Excitación	10 VCD, 16 VCD máx. 2mA
Voltaje de salida	50mV 5mV/V
Temperatura de operación	-40 a 85 grados centígrados
Resistencia de entrada	7.5 KW
Resistencia de salida	2.5 KW
Tiempo de respuesta	1 ms
Peso	2 gramos

Para la aplicación concreta que se les dio a los sensores la señal de salida es de 5 milivolts pues sólo operan en el 10% del rango para el cual están diseñados.

3.3. Sistema de Bombeo

La etapa de potencia encargada de realizar el cambio en el nivel es el sistema de bombeo.

Se compone de dos bombas centrífugas anteriormente utilizadas para impulsar agua jabonosa al limpia parabrisas de un automóvil. Se consiguieron en un almacén de vehículos chocados a un costo muy bajo. Desgraciadamente no fue posible conseguir dos bombas exactamente iguales, por esta razón puede esperarse falta de linealidad en el comportamiento general del sistema de bombeo.

La razón por la cual hicieron falta dos bombas viene de que una bomba sólo puede impulsar agua hacia un sentido. Siendo que se esperan disturbios de excedente o faltante hace falta una bomba que retire fluido y otra que lo agregue.

Las bombas están diseñadas para trabajar a un nivel de voltaje constante que es de 12 voltios, desplazando 2 litros por segundo a una altura de 30 cm aproximadamente.

Debido a su principio de funcionamiento presentan una característica indeseable muy común, la zona muerta. Esto es que en un rango de entrada no se verá reflejada ninguna salida, es decir, existe un rango de voltajes positivos que al ser aplicados a las terminales de la banda no la harán funcionar.

El siguiente gráfico muestra el flujo de salida para distintos niveles de voltaje aplicados en las terminales de la bomba.

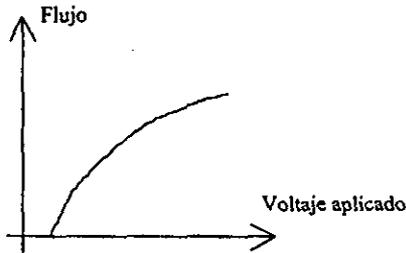


FIGURA 3.4 No linealidad presente en las bombas.

Puede verse que existe un rango en el que no hay flujo a pesar de que se está aplicando un voltaje en la entrada. Esto complica el análisis teórico teniendo que incluir un elemento no lineal en el análisis el cual se expuso en el capítulo anterior.

Por otro lado la razón flujo instantáneo entre voltaje aplicado no es constante en todo el rango de operación, afectando la exactitud de la información que arrojó el análisis. Sin embargo ésta sigue siendo útil debido a que el flujo siempre aumenta cuando aumenta el voltaje aplicado, es decir la función que los relaciona es siempre creciente.

El sistema de bombeo será accionado por el amplificador encargado de convertir en una señal de potencia el voltaje que salga del controlador.

Se presenta un gráfico detallado del comportamiento de todo el sistema.

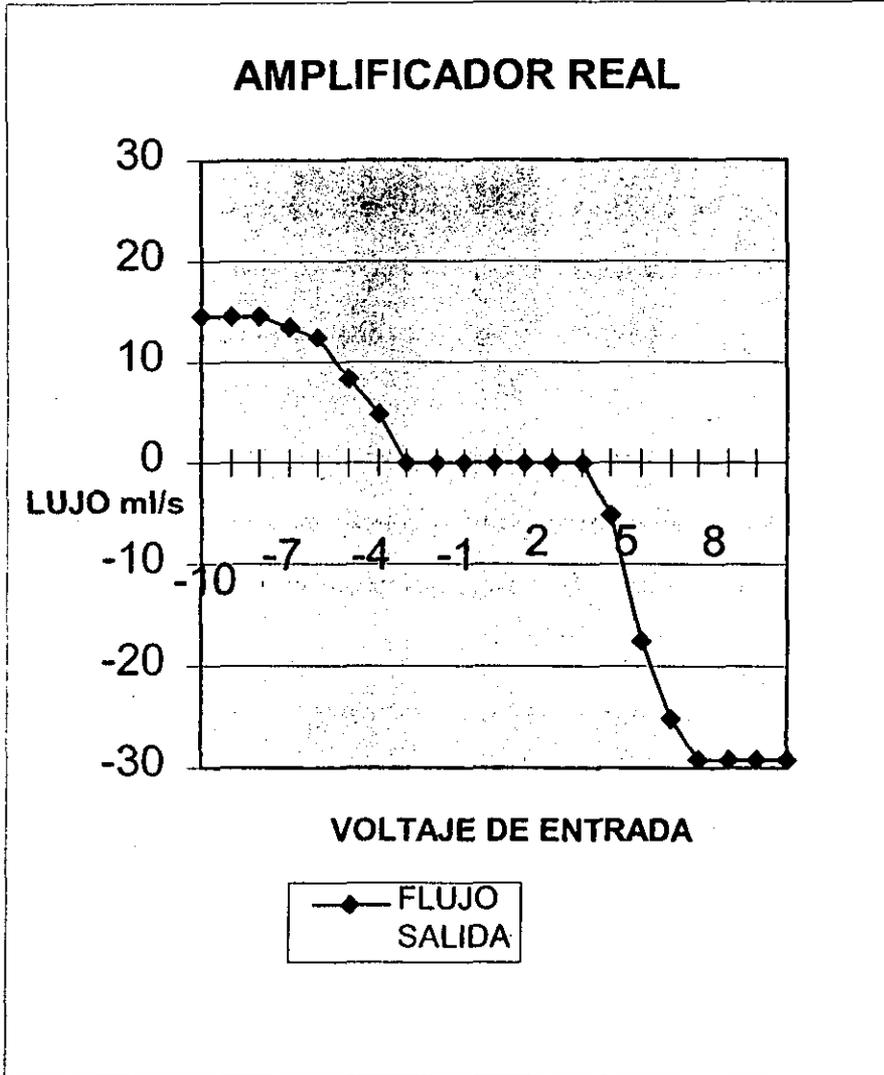


Figura 3.5. Comportamiento del sistema de bombeo.

3.4. Amplificadores

Un problema muy frecuente relacionado con los sistemas de control es el diseño de amplificadores que acoplen las etapas de potencia que forman parte de estos sistemas.

Estos dispositivos amplificadores deben ofrecer una respuesta lineal de la señal de salida con respecto a la señal de entrada. La diferencia entre estas señales consiste en que las señales de entrada generalmente son de baja potencia y provienen de un dispositivo de medición (puede ser un termopar, una celda fotosensible, un dispositivo piezoeléctrico, etc.); la señal de salida tiene alta potencia y va conectada a los dispositivos actuadores que tienen capacidad para modificar la situación dinámica o termodinámica de la planta. Estos actuadores pueden ser : calentadores, bombas, válvulas, pistones, motores, etc.

En la mayoría de los casos en que se necesita amplificar o acoplar alguna señal eléctrica se utilizan Amplificadores Operacionales (Op-amps). Los Op-Amps se pueden encontrar como circuitos integrados fabricados en serie con un costo relativamente bajo. Ofrecen una relación entrada-salida perfectamente lineal. A continuación describiré grosso modo sus principios de funcionamiento.

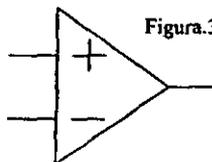


Figura.3.6 Representación de un Opam

Un amplificador operacional es un circuito compuesto por cuatro fases o etapas. La primera es una amplificación diferencial, que aumenta varias veces la diferencia de potencial que hay entre los dos puertos de entrada. Posteriormente esta señal pasa a un amplificador lineal de alta ganancia, luego se emplea un circuito variador de nivel que garantiza que la tensión de salida se cero cuando la tensión de entrada es cero. La última etapa es un amplificador de salida, generalmente uno de simetría complementaria o configuración *Push-Pull*.

Como el amplificador se comporta linealmente, está regido por la siguiente relación :

$$V = A_d(V_1 - V_2) + A_a(V_1 + V_2)$$

donde :

A_d = Amplificación diferencial en voltaje.

A_a = Amplificación de alta ganancia en voltaje.

V_1 = Voltaje de entrada en la terminal positiva.

V_2 = Voltaje de entrada en la terminal negativa.

V = Voltaje en la salida

Un valor típico de A_d es 10^5 (100 dB) mientras que un valor típico de A_a es 1.

De la relación anterior se ve que si $V_2 = 0$ la tensión de salida V_0 está desfasada 180 con respecto a la tensión de entrada V_1 , por otro lado también puede verse que si $V_1 = 0$ la tensión

de salida V_0 estará en fase con V_2 . Por lo anterior se refiere a V_2 como entrada no inversora y a V_1 como entrada inversora.

Otro elemento amplificador muy usado en ingeniería electrónica es el transistor. Su gran difusión se debe a que son de bajo costo (aproximadamente 50 centavos de dólar) y su amplio rango lineal. Esto los convierte en un elemento ideal para el diseño de amplificadores de alta potencia.

Su principio de operación no es materia de este trabajo y me limitaré a exponer con la profundidad que unas cuantas líneas permiten su comportamiento operativo, que en realidad es el único estudio necesario para poder utilizar óptimamente dicho elemento.

El esquema con el que se representa un transistor es el siguiente :

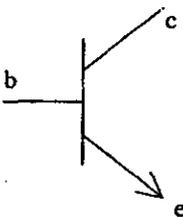


Figura 3.7 Representación de un transistor

TRANSISTOR NPN

Se pueden distinguir claramente sus tres terminales :

La base, representada por una letra b ,

El colector con la letra c

El emisor con la letra e.

Cuando existe voltaje en la base circula desde el colector una corriente proporcional a la corriente que está circulando por la base. Ambas corrientes fluyen hacia afuera del transistor a través del emisor.

Entre las características no lineales de los transistores se podría citar como la más significativa una caída de voltaje entre la base y el emisor de aproximadamente 0.7 volts.

Un esquema explica mejor esta idea

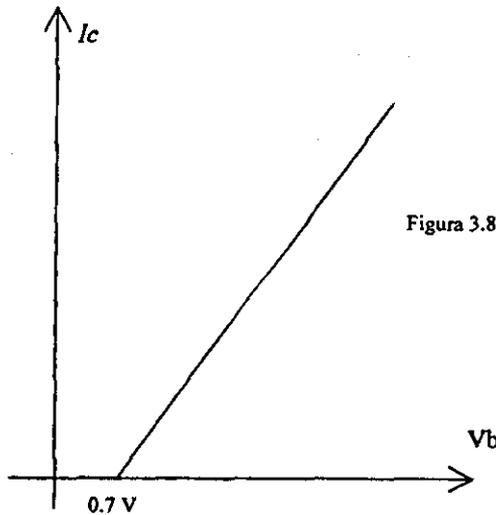


Figura 3.8 Comportamiento del transistor

Se muestra un gráfico del voltaje en la base contra la corriente en el emisor y como puede verse existe una zona muerta en la que cuando el voltaje en la base es mayor que cero y la corriente en el emisor es nula.

Para agregar relaciones matemáticas podemos decir que :

$$i_b = \beta(i_c)$$

donde :

β = ganancia en corriente del amplificador

i_b = corriente en la base

i_c = corriente en el colector

Para terminar con esta breve explicación del transistor hay que decir que existen otro tipo de transistor, llamado PNP. Éste se comporta igual que el transistor NPN sólo que las corrientes que se manejan son negativas.

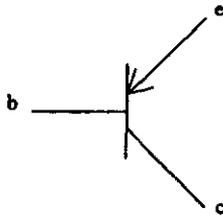


Figura 3.9 Transistor PNP

Por último se dirán algunas palabras acerca de los diodos, que también se usaron en la implementación del amplificador.

Los diodos son elementos electrónicos de una entrada y una salida que se representan como sigue

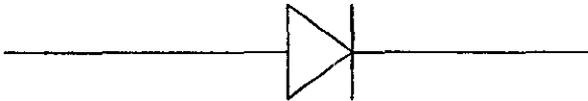


Figura 3.10 Diodo

Debido a que éste es un trabajo de carácter más bien práctico no se explicarán los principios de operación del diodo. Será mejor hacer algunos comentarios acerca de su funcionamiento real.

Los diodos permiten el paso de corriente hacia un solo sentido, es decir, la corriente puede fluir solamente desde una terminal hacia otra, y no puede haber circulación en sentido contrario. No son elementos lineales debido a que se presenta una caída de voltaje de 0.7 voltios aproximadamente, cuando está fluyendo la corriente.

Generalmente las señales que se necesitan amplificar tienen una parte positiva y una negativa con respecto a una referencia que es el punto de operación deseado en la planta. Este punto de

operación deseado puede ser una corriente de entrada a un calentador para que mantenga una temperatura dada, o una posición concreta en un mecanismo. Siempre el punto de operación es una variable física, escalar y medible. Cuando la variable real no es igual a la variable de operación deseada se dice que hay una desviación. El valor numérico de esta desviación se puede obtener restando el valor de la variable deseado al valor de la variable real. El valor obtenido se llama error y se representa por ϵ . No hace falta tener una inteligencia muy aguda para darse cuenta de que este valor puede ser positivo o negativo.

Debido a que los transistores sólo trabajan con corrientes de un solo signo (positivas o negativas) cuando se habla de amplificadores electrónicos basados en transistores hay que distinguir entre dos tipos :

amplificadores tipo a. Este tipo funciona con sólo un transistor (PNP) y para que la parte negativa de la señal sea contemplada en el rango de operación del dispositivo se le agrega un *offset* que sube el nivel de voltaje de toda la señal. Este tipo es muy preciso pero presenta el inconveniente de tener muy poca eficiencia. Las pérdidas son ocasionadas por el offset que consume potencia constantemente aunque no exista señal para amplificar.

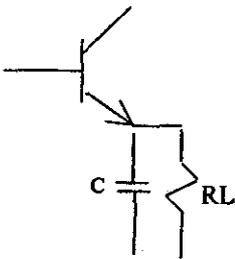


Figura 3.11 Amplificador tipo a

Amplificadores tipo b. Utilizan dos transistores un NPN y un PNP, el NPN se encarga de amplificar la parte positiva de la señal, y el PNP la negativa. Esta configuración es muy eficiente debido a que el consumo de potencia es muy bajo cuando no hay señal para amplificar. Cabe decir que este tipo de amplificadores son utilizados para acoplar etapas de alta potencia. La desventaja es que no son perfectamente lineales.

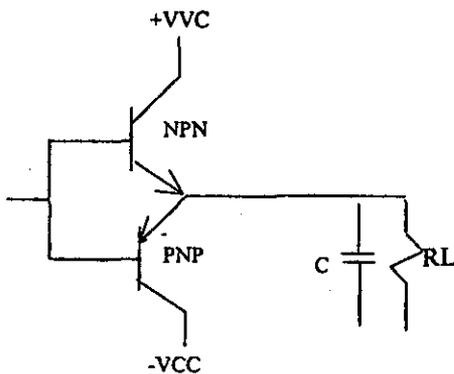


Figura 3.12 Amplificador tipo b

Amplificador Diseñado

Para este trabajo se necesita un amplificador que entregue la potencia necesaria para accionar los actuadores, que son bombas centrífugas. Una de ellas será empleada para sacar el líquido del recipiente, la otra se encargará de aumentar el nivel de líquido en el mismo, según sea el caso.

La potencia de la señal de entrada al amplificador es de aproximadamente 5 mW y la potencia promedio de operación de las bombas es de unos 20 Watts.

El amplificador que se diseñó es de tipo b con dos transistores de potencia y diversos elementos electrónicos como son op-amps, diodos, resistencias, etc.

El diagrama se muestra a continuación.

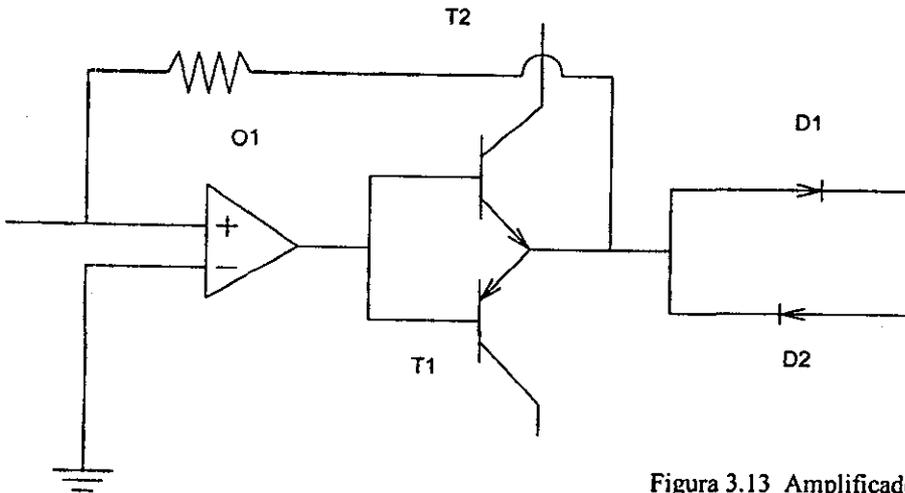


Figura 3.13 Amplificador

AMPLIFICADOR

A continuación se listan los componentes del amplificador y se da una breve explicación de la función que desempeñan dentro del sistema.

O1. Op.AMP Es un amplificador operacional cuya retroalimentación se ubica después de los emisores de los transistores ; se encarga de mantener la tensión de la señal de entrada igual a la tensión de salida de los transistores.

T 1. Transistor NPN. Es uno de los dos transistores encargados de proporcionar la potencia requerida, concretamente este transistor se encarga de suministrar la corriente positiva en el amplificador.

T 2. Transistor PNP. Es uno de los dos transistores encargados de proporcionar la potencia requerida, concretamente este transistor se encarga de suministrar la corriente negativa en el amplificador.

D1 y D2 Diodos. Cada diodo sirve para dirigir la señal de salida a una bomba u otra.

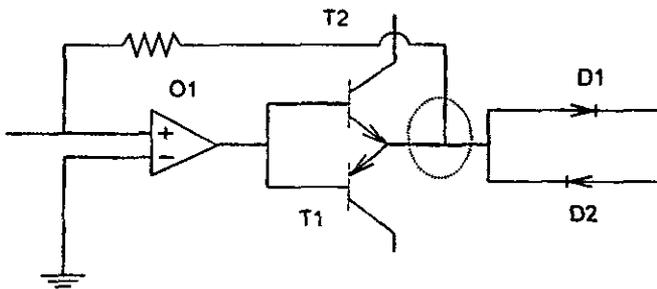


Figura 3.14 Amplificador mostrando el lugar de la retroalimentación

Como puede verse la retroalimentación en el Op-Amp compensa la caída de voltaje producida por la no linealidad de los transistores de potencia. Desgraciadamente esta retroalimentación no es la óptima debido a que se ubica entre la salida común de los emisores de los transistores

y la entrada negativa del opamp. Este valor retroalimentado no es el que realmente llega a los motores de las bombas hidráulicas porque los diodos presentan una caída de voltaje (ver en el comentario de diodos de este capítulo) La retroalimentacion ideal se muestra en la siguiente figura.

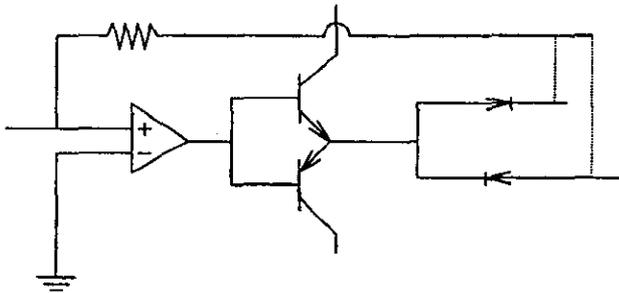


Figura 3.15 Amplificador mostrando el lugar óptimo de la retroalimentacion

Como puede verse esta retroalimentación óptima no es posible.

El resultado de esta falla obligada es que se espera una zona muerta en el amplificador, que en páginas posteriores se verá trazada en un gráfico relacionando las variables pertinentes. Junto con éste se muestran otros gráficos relacionando otras variables.

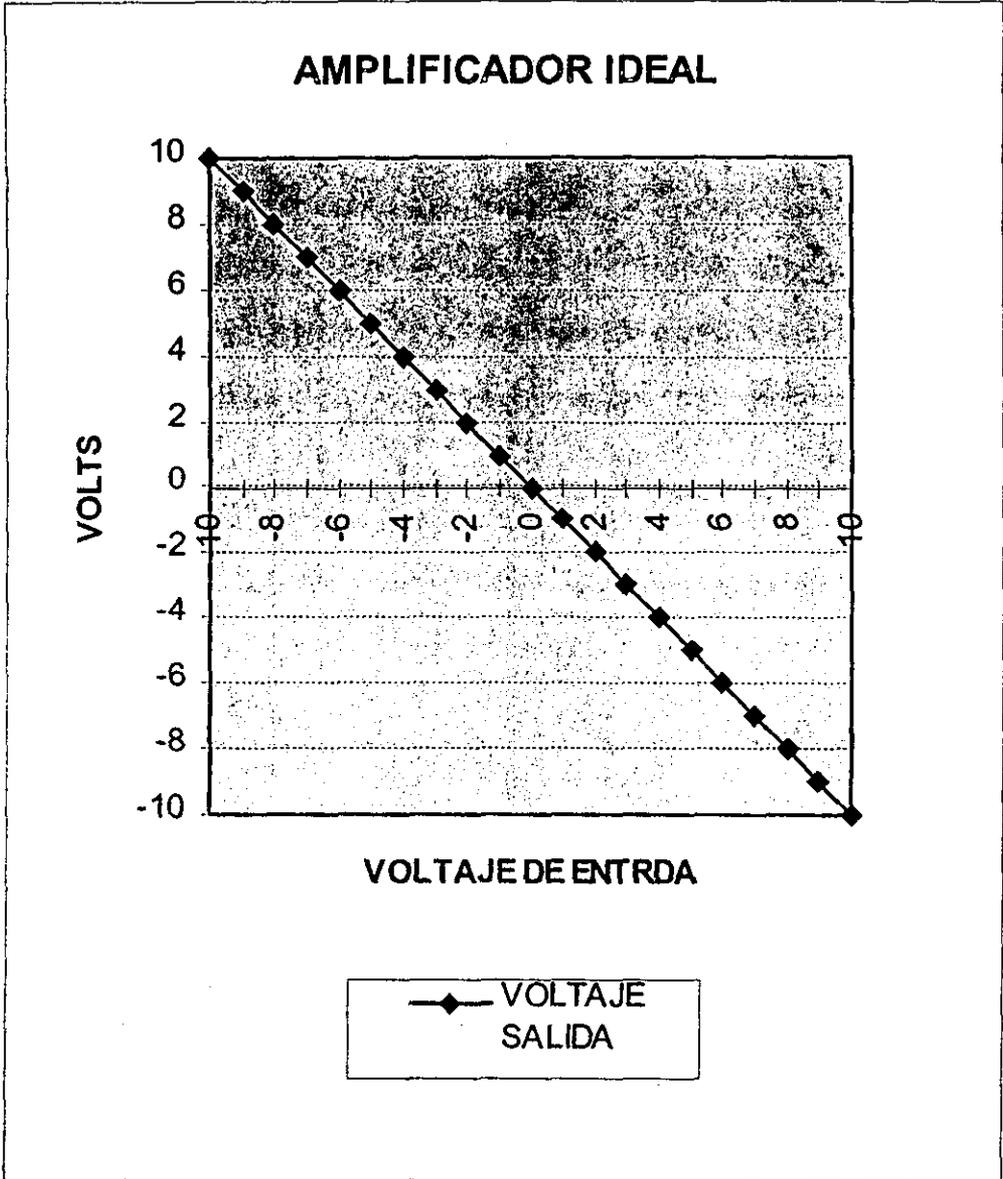


Figura 3.16

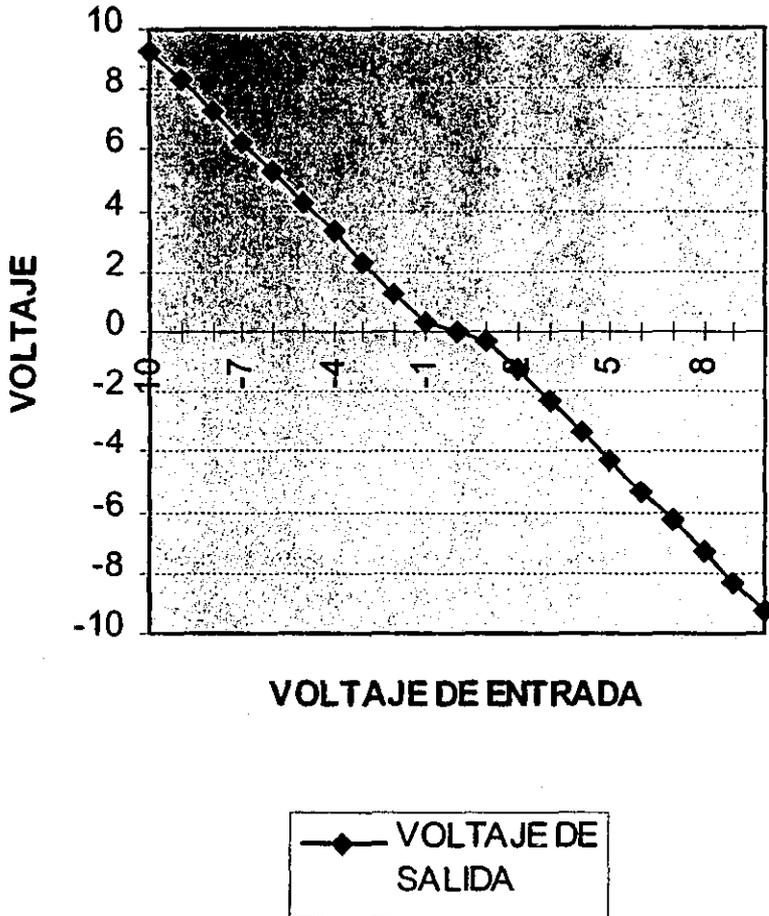
AMPLIFICADOR TEORICO

Figura 3.17

AMPLIFICADOR REAL SIN CARGA

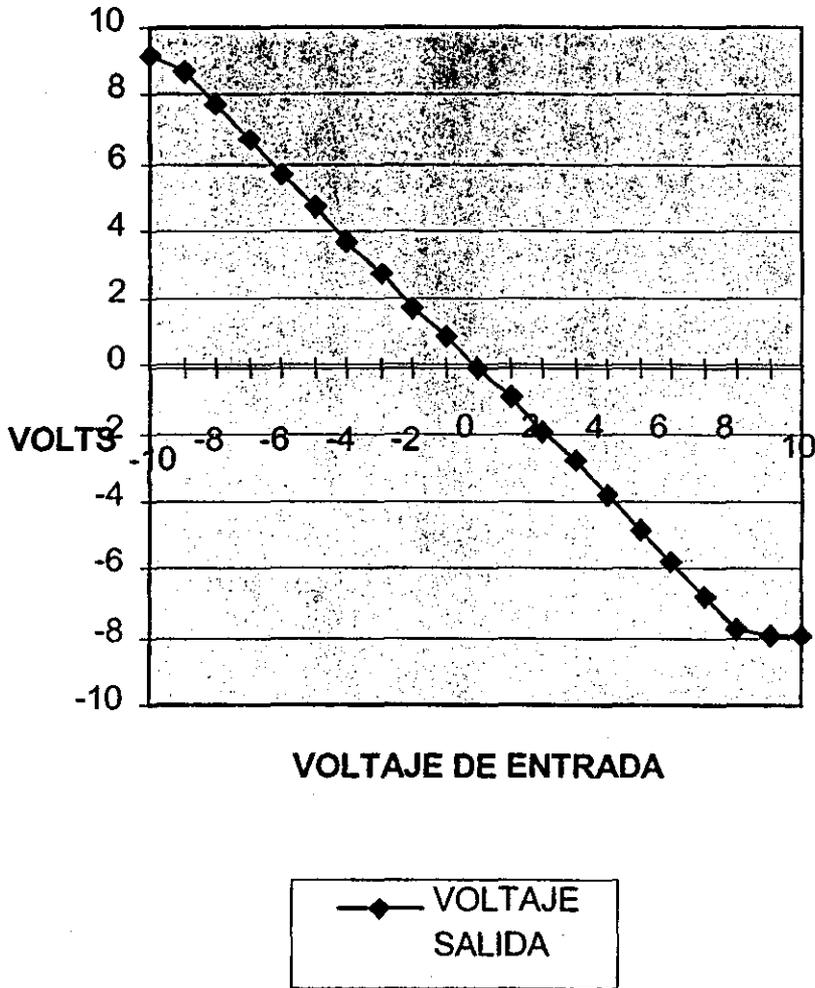


Figura 3.18

AMPLIFICADOR REAL CONECTADO A LAS BOMBAS SIN CARGA

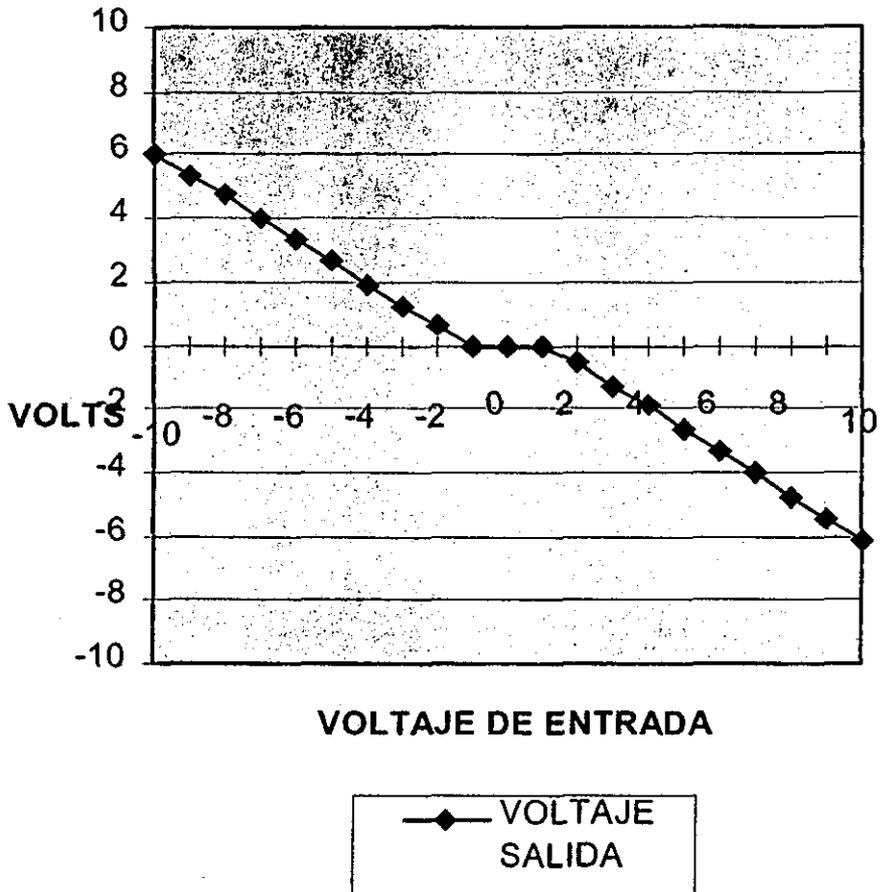


Figura 3.19

AMPLIFICADOR REAL CONECTADO A LAS BOMBAS CON CARGA

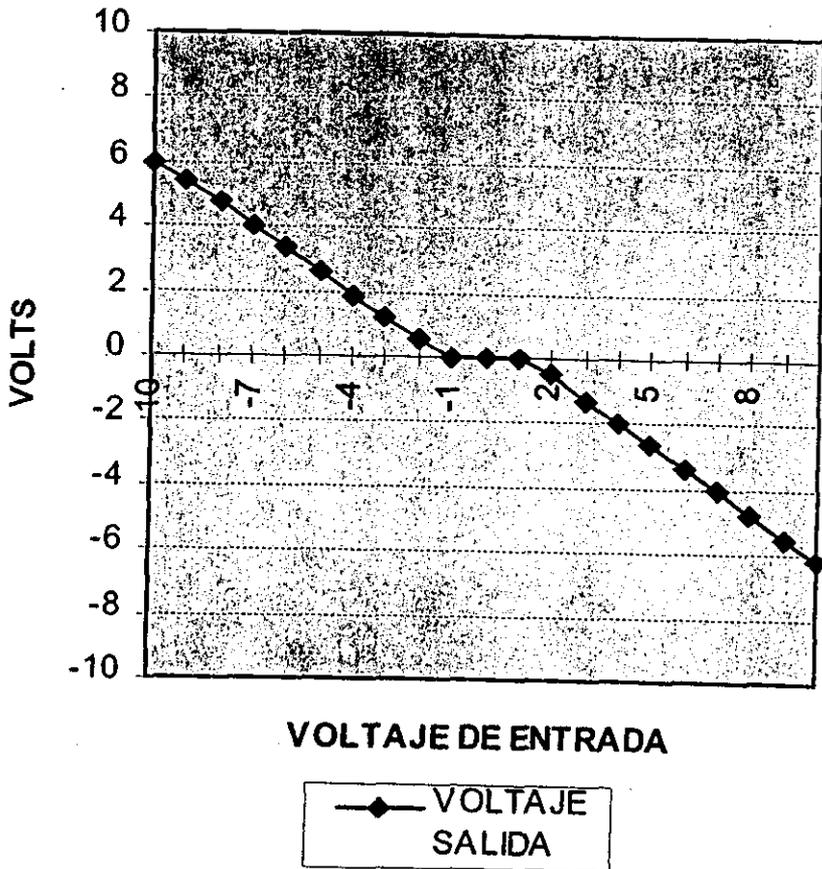


Figura 3.20

Quando se estudia ingeniería es común ver que los resultados de los proyectos reales se alejan de los resultados teóricos, y más todavía de los resultados ideales. Desgraciadamente este

amplificador no fue la excepción. Como puede verse en las gráficas antes mostradas el comportamiento del amplificador dista mucho de ser el ideal (ver gráficas 1 y 5). Es importante no perder de vista que se necesita un amplificador que comprometa linealmente al voltaje de entrada con la cantidad de flujo desalojada o suministrada dependiendo del caso.

Por principio en la gráfica número 3 se puede notar que el efecto de algún tipo de saturación se hizo presente y limitó el voltaje de salida negativo a 7.95 volts.

Seguido de esto se puede ver en la gráfica 4 el efecto de no linealidad en los diodos que ya se tenía contemplado. Esto ocasiona una zona muerta que va desde -1 hasta 1 volt. Además el voltaje de entrada a las bombas se vio notablemente reducido, alcanzando un máximo de 6 para positivos y un mínimo de 6.13 para negativos.

La gráfica 5 no varía notablemente con respecto a la gráfica 4, sólo en el estado transitorio pudo verse una muy pequeña zona de histéresis. La cual desaparece una vez arrancadas las bombas.

Por lo anterior el criterio de control tendrá que considerar todas las no linealidades que trajo consigo el amplificador.

El controlador tendrá que eliminar la zona muerta y dar un comportamiento lineal entre la entrada y la salida en todo el rango de operación.

Cabe decir que el procesamiento de señales de error y de entrada de datos se realizará a través de una computadora digital debido a que es mucho más fácil usar software para dichos propósitos. Es por esto que se puede ser optimista y ambicioso con los resultados del controlador.

INFORMACIÓN NUMÉRICA DE LOS DATOS GRAFICADOS

**CONCENTRADO
DE DATOS**

Voltaje de entrada	Voltaje de salida ideal	Voltaje de salida teórico	Voltaje de salida	Voltaje en bombas sin carga	Voltaje en bombas con carga	Flujo de salida ml/s
-10	10	9.3	9.18	6	6	14.58
-9	9	8.3	8.71	5.4	5.4	14.58
-8	8	7.3	7.77	4.74	4.74	14.58
-7	7	6.3	6.75	4	4	13.46
-6	6	5.3	5.69	3.37	3.37	12.5
-5	5	4.3	4.71	2.63	2.63	8.34
-4	4	3.3	3.73	1.9	1.9	4.73
-3	3	2.3	2.75	1.2	1.2	0
-2	2	1.3	1.76	0.59	0.59	0
-1	1	0.3	0.87	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
1	-1	-0.3	-0.93	0	0	0
2	-2	-1.3	-1.88	-0.5	-0.5	0
3	-3	-2.3	-2.79	-1.29	-1.29	0
4	-4	-3.3	-3.78	-1.92	-1.92	-5
5	-5	-4.3	-4.8	-2.66	-2.66	-17.5
6	-6	-5.3	-5.77	-3.32	-3.32	-25
7	-7	-6.3	-6.78	-4.04	-4.04	-29.17
8	-8	-7.3	-7.75	-4.75	-4.75	-29.17
9	-9	-8.3	-7.95	-5.47	-5.47	-29.17
10	-10	-9.3	-7.95	-6.13	-6.13	-29.17

Acondicionador de señal

Además del amplificador que se describió en páginas anteriores, hizo falta hacer un amplificador para la señal de salida de los transductores de presión. Estos transductores entregan una señal muy precisa de la medición pero de muy baja potencia. (Para más información véase el capítulo que habla específicamente de ellos). La necesidad de este amplificador se vio en el momento de la implementación ya que se pretendía utilizar el módulo de obtención de datos del PLC donde se programó el controlador pero éste no aceptaba la señal. Además de que el ruido presente causaba muchos problemas.

Sin este amplificador la señal a procesar sería de 1.5 milivolts y con mucho ruido. Por esto se diseñó un dispositivo de amplificación y filtrador, basado en un Op-amp.

El esquema es como sigue:

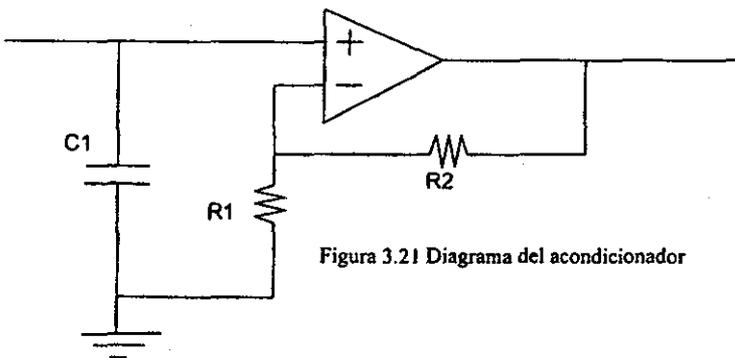


Figura 3.21 Diagrama del acondicionador

Funciones de cada elemento del dispositivo.

C1 Sirve para dar una inercia de primer orden a la entrada del filtro y así evitar el ruido en la entrada

R1 Sirve limitar la retroalimentacion, para determinar la ganancia del dispositivo junto con R2

R2 Determina la ganancia (de 10 en voltaje) junto con R1.

Para evitar al máximo el ruido se colocó el dispositivo lo más cerca posible al transductor. Por esta razón se encuentra ubicado en la parte trasera de la pantalla que sostiene al tanque. Como no estaba contemplado implementar este amplificador en el proyecto original se cuidó al detalle su perfecto funcionamiento mas no su apariencia estética. Debido a esto no se expone con fines didácticos, a diferencia del amplificador de potencia.

3.5. Modelado y Solución Del Problema

Para poder dar una solución óptima al problema tiene que plantearse un modelo matemático que permita solucionarlo de manera analítica. A primera vista el modelado matemático de la planta no representa un trabajo muy complicado:

Usando la ecuación general del volumen de control para el análisis de fluidos tenemos

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} \rho dV + \int_{S_c} \rho v \cdot dA$$

Que iguala las entradas a la acumulación en el volumen de control. Para efectos de esta tesis tenemos:

$$\int \text{flujo } dt = \text{acumulacion de liquido en el tanque} = h(t) A$$

donde h = Nivel de fluido presente en el tanque en función del tiempo

A = Área de la base del tanque

El siguiente paso sería modelar el sistema de bombeo. Esto es una tarea muy engorrosa debido a que presenta dos tipos de no linealidades. (Ver figura del comportamiento real en el tema del sistema de bombeo)

Una de ellas es la zona muerta, es decir existe una región dentro del rango de operación del sistema en la que no hay respuesta por parte de las bombas al aplicar una entrada, que es un voltaje en este caso. Esta situación se explica por la caída de voltaje

en el amplificador la cual ya fue discutida anteriormente (véase el capítulo III en el tema de Amplificadores). Otra causa es la poca velocidad que desarrolla el eje de la bomba cuando a ésta se le excita con una corriente relativamente baja. Los álabes del mecanismo hidráulico se mueven en el fluido sin comunicarles ninguna cantidad de movimiento.

La otra no-linealidad es una saturación o una cantidad máxima de flujo desplazado, es decir existe una región dentro del rango de operación en la que un aumento en el voltaje de entrada no traerá un aumento en el flujo desplazado. Aunque se tendría que hacer un análisis hidráulico riguroso para explicar el por qué de éste fenómeno podría decirse que el diseño físico de la máquina hidráulica, la viscosidad del fluido y algunas otras variables son las responsables de esto.

El modelado matemático de sistemas que contienen no linealidades es una tarea muy difícil, una solución alterna que nos libera del esto es la simulación.

Con una computadora pueden simularse sistemas físicos incluyendo sus no-linealidades.

Una ventaja más de las simulaciones es que pueden simularse también controladores no lineales, y el diseño de éstos puede ser probado incluso antes de ser implementado.

Por todas estas ventajas se decidió que el diseño del controlador estaría basado en la información que pudiera arrojar la simulación.

La simulación se hizo en SIMULINK un módulo para simular dentro de un paquete muy conocido entre estudiantes de ingeniería llamado MATLAB. SIMULINK cuenta con bloque predefinidos con los cuales se pueden simular una cantidad muy grande de sistemas y fenómenos lineales y no-lineales. Se dará una breve explicación de los tipos de bloques que se usaron para hacer esta simulación:

A square icon representing a transfer function block. Inside the square, the numerator is '1' and the denominator is 's+1', separated by a horizontal line.

Función de
transferencia

Acepta un numerador y un denominador en orden descendente de potencias en la variable s (de Laplace). Se puede usar para simular sistemas modelados matemáticamente.



Saturación

Pone un límite superior e inferior a los valores que una señal pueden tomar. Las señales que están dentro de los límites especificados pasan sin ningún cambio. Las señales que están fuera del rango se igualan al límite más cercano.

Las variables de definición son

- límite inferior
- límite superior



Entrega a la salida la integral respecto al tiempo de la entrada.

Se define con:

- valor inicial



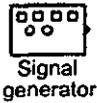
Este bloque entrega como salida la suma de las entradas.



Este bloque es un controlador PID previamente implementado

Las variables de definición son

- ganancia proporcional
- ganancia derivativa
- ganancia integral



Este bloque genera diferentes señales útiles para excitar el sistema que estamos simulando.



La zona muerta tiene una región donde la salida es cero. Fuera de esta región la entrada pasa con la longitud de la zona muerta restada de su rango original. (Ver icono).

Las variables de definición son

- inicio de la zona muerta
- fin de la zona muerta



Mantiene un valor constante en un punto especificado. Se define con el valor de la constante



Multiplica la entrada por un escalar. Se define con el valor del escalar.

La simulación se llevó a cabo de la siguiente manera

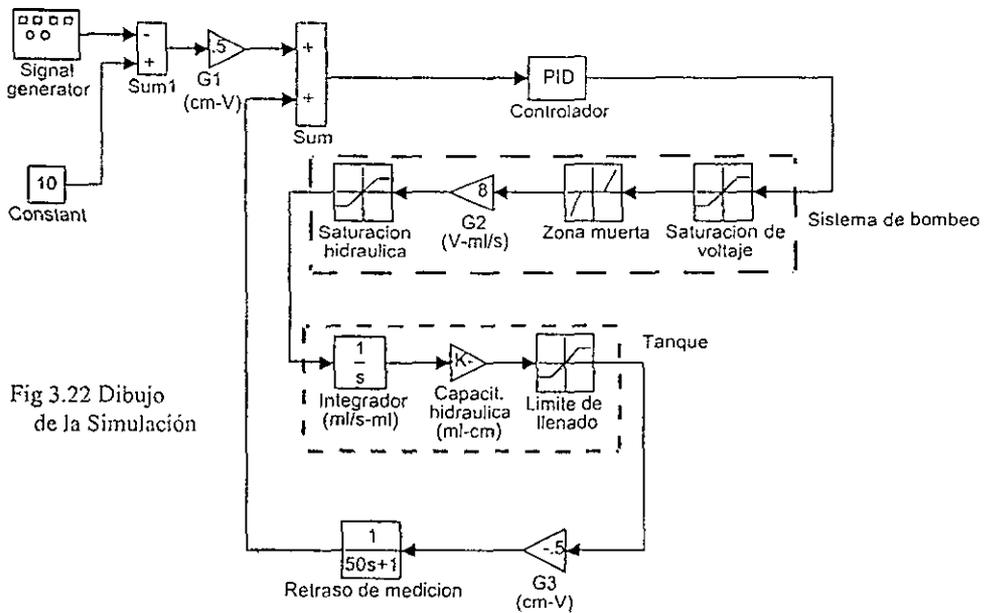


Fig 3.22 Dibujo de la Simulación

A continuación se explica cada bloque que forma el sistema simulado:

Podemos dividir a todo el sistema en 5 partes principales:

1. Elementos de excitación: Compuesto por los bloques de nombre:

- *Signal generator*: Es un generador de señales, sirve para dar diversas excitaciones al sistema como senoidales, ondas de dientes de sierra, ruido, etc.
- *Constant*: Es para sumar una constante a todas las excitaciones evitando así que estén en algún momento en la región negativa, la cual no existe físicamente en nuestro sistema. Un tanque no puede tener una cantidad negativa de fluido, lo mínimo que podría contener es nada.
- *Sum 1*: Suma los valores que entran

2. Controlador, compuesto por:

- *Controlador*: Es un controlador tipo PID incluido en la librería de bloques. Las variables que lo definen son las ganancias proporcional, integral y derivativa. Nótese que debido al tipo de sistema y control que buscamos la parte derivativa del controlador será siempre cero.

3. Sistema de bombeo formado por:

- Saturación de voltaje. Esta saturación es ocasionada por los niveles de voltaje a los cuales opera el amplificador ya que no puede entregar más de 10 volts ni menos de -10 volts.
- Zona muerta. Se debe a la caída de voltaje que presentan los diodos ubicados en el amplificador de potencia, aunado a algún tipo de resistencia hidráulica en las bombas. Se ubica entre -3 y 3 volts
- G_2 es una constante que refleja los volts de entrada en un gasto hidráulico ocasionado por el accionamiento de las bombas. Por cada volt incrementado el gasto que la bomba entrega incrementará en 8 ml/s
- Saturación hidráulica. Se presenta en las bombas, a cierta velocidad se alcanza el máximo gasto, siendo este de 32 ml/s aproximadamente para cada bomba.

4. Tanque., compuesto por:

- Integrador. Calcula la cantidad total de fluido en el tanque. Convierte ml/s a ml. El valor inicial es de cero.
- Capacitancia hidráulica. Nos permite saber el nivel de fluido en el tanque al dividir el volumen entre el área de la base del recipiente que contiene al fluido.
- Límite de llenado. Para considerar las condiciones con el recipiente totalmente lleno. Cuando el tanque está en este estado un incremento en el flujo de entrada no ocasionará ningún cambio en el nivel del tanque. El nivel del tanque puede estar entre 0 y 20 centímetros.

5. Medición, formado por:

- G_3 para convertir de cm a volts

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

- Retraso de medición. Debido a que nuestro sensor no reacciona inmediatamente ante un cambio ya que tiene una inercia de primer orden con constante de tiempo de 50 segundos.

RESULTADOS DE LA SIMULACION

Controlador P con ganancia

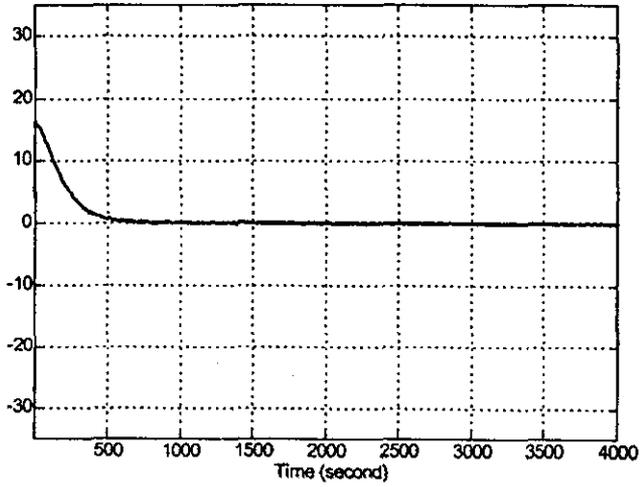


Figura 3.23 Trabajo de las bombas
(las unidades del eje vertical son ml/s)

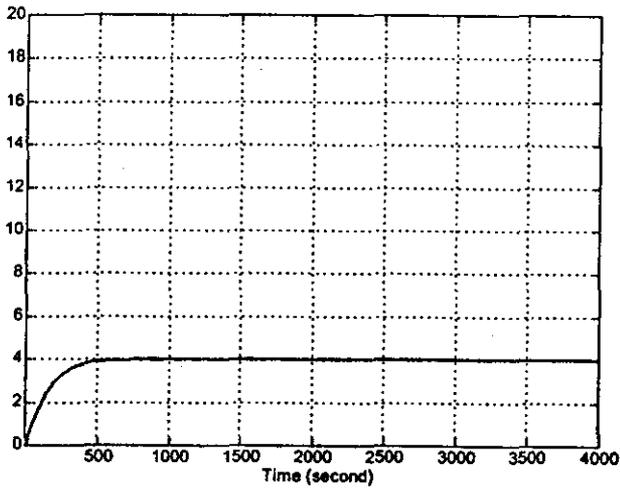


Figura 3.24 Nivel del Tanque
(las unidades del eje vertical son cm)

Controlador P con ganancia 10

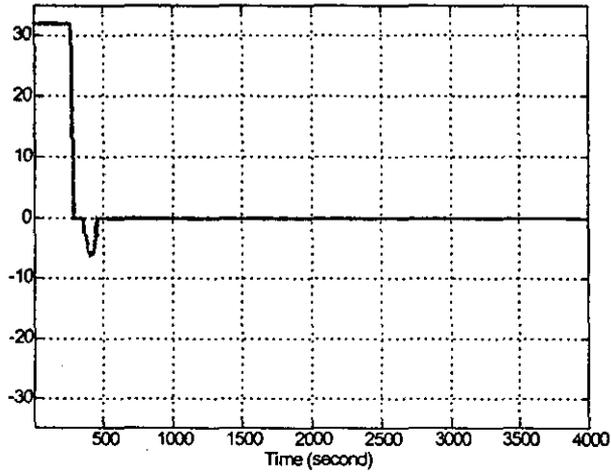


Figura 3.25 Trabajo de las bombas
(las unidades del eje vertical son ml/s)

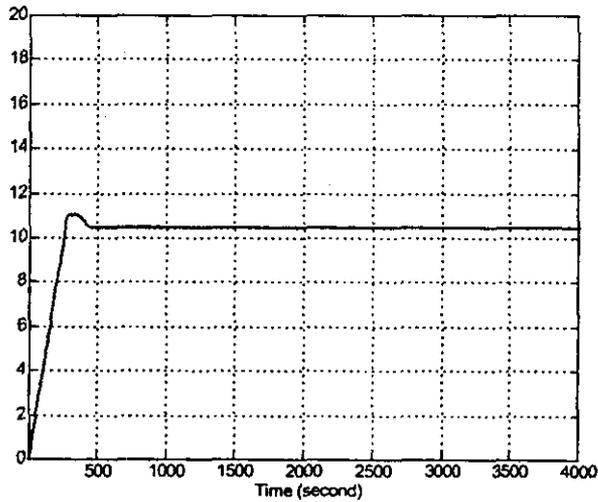


Figura 3.26 Nivel del Tanque
(las unidades del eje vertical son cm)

Controlador P con ganancia 100

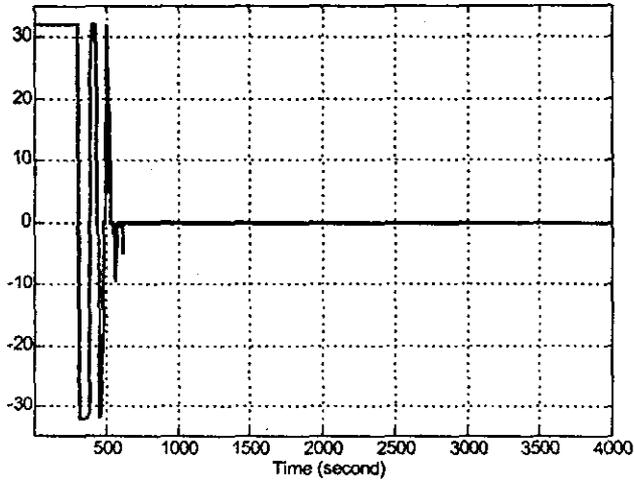


Figura 3.27 Trabajo de las bombas
(las unidades del eje vertical son ml/s)

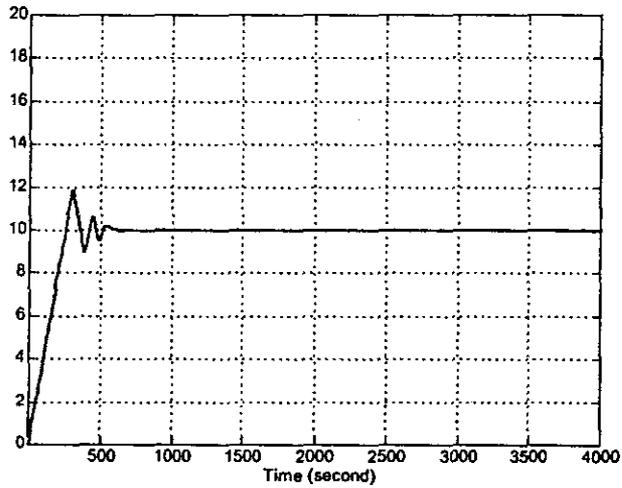


Figura 3.28 Nivel del Tanque
(las unidades del eje vertical son cm)

Controlador PI $P=1$ $I=1$

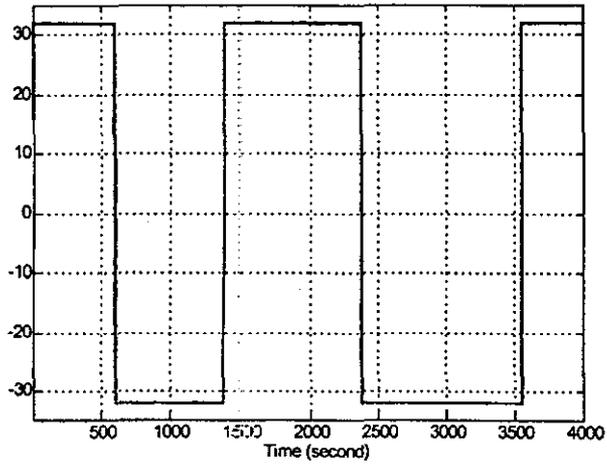


Figura 3.29 Trabajo de las bombas
(las unidades del eje vertical son ml/s)

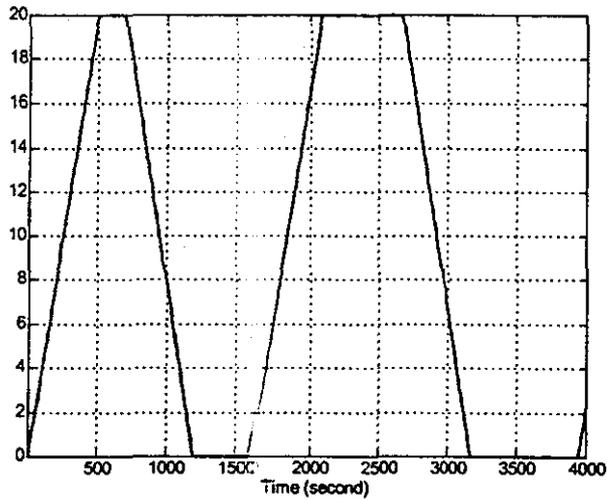


Figura 3.30 Nivel del Tanque
(las unidades del eje vertical son cm)

Controlador PI $P=10$ $I=.1$

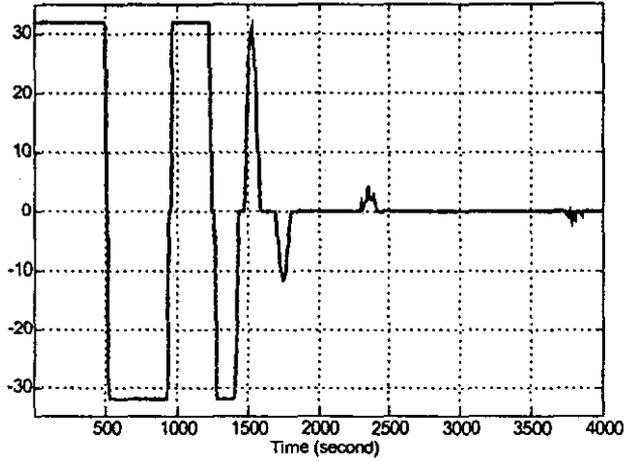


Figura 3.31 Trabajo de las bombas
(las unidades del eje vertical son ml/s)

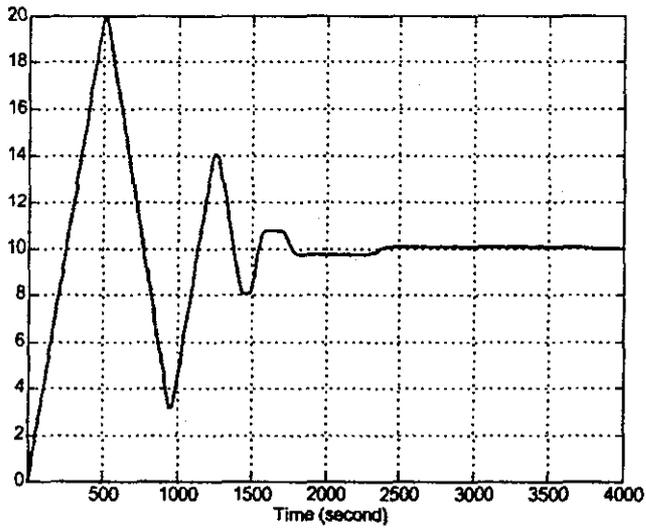


Figura 3.32 Nivel del Tanque
(las unidades del eje vertical son cm)

Controlador PI, $P=20$ $I=0.5$

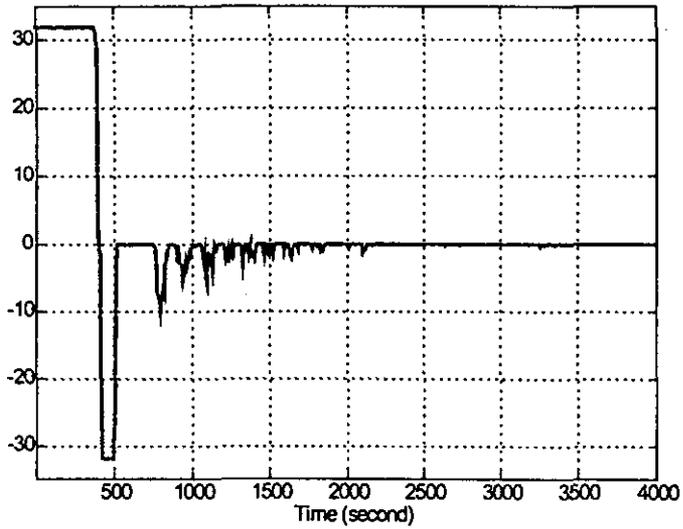


Figura 3.33. Trabajo de las bombas
(las unidades del eje vertical son ml/s)

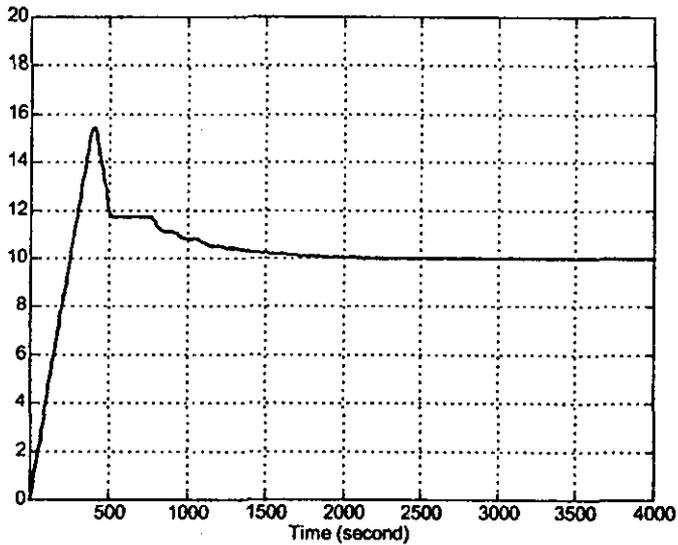


Figura 3.34 Nivel del Tanque
(las unidades del eje vertical son cm)

3.6. Implementación del controlador

El controlador se implementó en un PLC U100 SIMATIC, utilizando el módulo de obtención de datos para termopares con un rango de -50 milivolts a 50 milivolts.

La salida del controlador estará en un rango de -10 a 10 volts.

La máxima exactitud de medición que se puede tener en un rango de 30 centímetros es de 0.025 centímetros, con una precisión dependiente de la temperatura. (Es bueno calibrar el dispositivo si hay algún cambio significativo en la temperatura.)

A partir de los datos obtenidos de la simulación se concluyó que el mejor controlador sería un PID (con la parte derivativa muy pequeña)

Las constantes del controlador, es decir las constantes de proporcionalidad, integración y derivación se ajustaron en el momento de operar el controlador haciendo diversas pruebas similares a las de la simulación hasta que se llegó a unos valores óptimos.

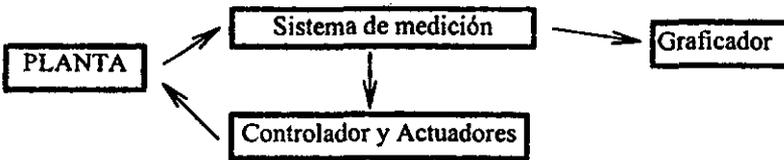
El paso siguiente fue probar todo el sistema,

La prueba óptima a una solución propuesta es enfrentarla a la realidad, en este apartado se presentan datos significativos que describen el desempeño real del sistema.

El procedimiento para medir el desempeño fue el siguiente.

-Se considerará que el nivel real y actual del tanque es el valor medido. Esta consideración puede ser hecha a partir de que la medición es muy exacta y el retraso es de aproximadamente 0.5 segundos (considerando 1 milisegundo de retraso del sensor y 0.5 segundos de estabilización del acondicionador de señal). Hay que decir también, para soportar la

consideración anterior, que la capacidad de cambio sobre la variable a controlar que tienen los actuadores es muy limitada en cuanto su rapidez. Es decir el máximo flujo que puede desarrollar la bomba es 32 ml/s (dato que puede verse en el tema de sistema de bombeo, en la gráfica final) que de ser enviado al tanque le ocasionaría una velocidad de llenado de 0.04 cm/s. (el tanque tiene un área de 800 cm^2). Es obvio que el retraso de la medición no afecta significativamente el valor graficado pues la máxima desviación que puede presentar es de 0.02 cm.



Grafica 3.35 Flujo de Información

Los gráficos mostrados corresponden al nivel del tanque y la señal de entrada a las bombas. Es importante decir que la señal de entrada a las bombas es resultado del procesamiento de la señal de error del controlador. Es el error más la integral del error.

Para graficar estas variables se utilizó un graficador especial.

Este es un desplegado de todo el comportamiento graficado.



Figura 3.36
Desplegado del
grafico

La curva de arriba muestra el nivel de agua del tanque en el tiempo

La curva de abajo muestra la señal de salida del controlador en el tiempo

Hay que decir que los valores de la escala en los ejes no son datos significativos pues la respuesta tenderá a ser proporcional al tamaño de la excitación. Sería siempre proporcional si no hubiera no-linealidades.

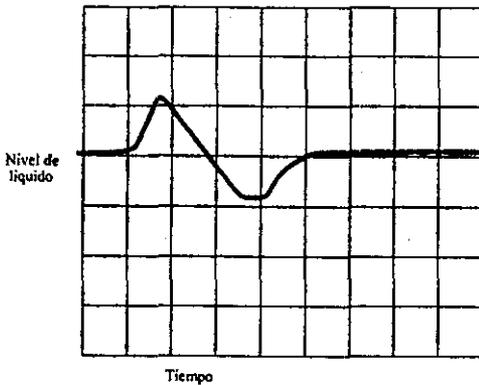


Figura 3.37. Sección I del desplegado

1. Este es un disturbio, la bomba extrae más fluido del necesario y compensa este error en un tiempo relativamente corto

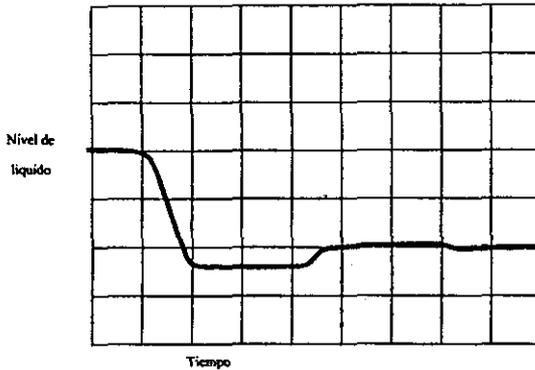


Figura 3.38. Sección 2 del despliegado

2. Cuando se somete al controlador a un escalón negativo (se cambia el valor deseado a uno más bajo), retira más fluido del necesario, posteriormente integra el error y compensa la desviación.

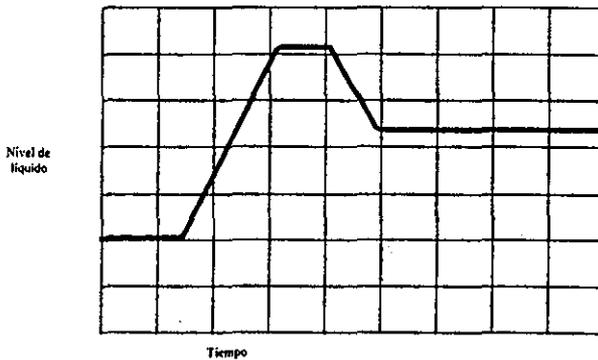


Figura 3.39. Sección 3 del despliegado

3. Este es otro ejemplo de un escalón con la diferencia de que este es positivo, se nota claramente que la desviación es mayor que la del ejemplo anterior, esto es porque el flujo que desarrolla una bomba es diferente (el de la bomba que agrega líquido es mayor). Esto puede verse en tema de sistema de bombeo en el gráfico que aparece en el final de este.

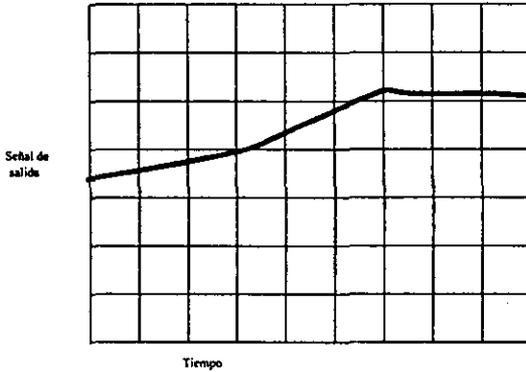


Figura 3.40. Sección 4 del despliegado

4..Para probar si funcionaba la parte integradora del controlador se cambió la constante de integración, puede verse que la línea que resultaba de integrar un error estacionario cambió de pendiente al momento de modificar la constante.

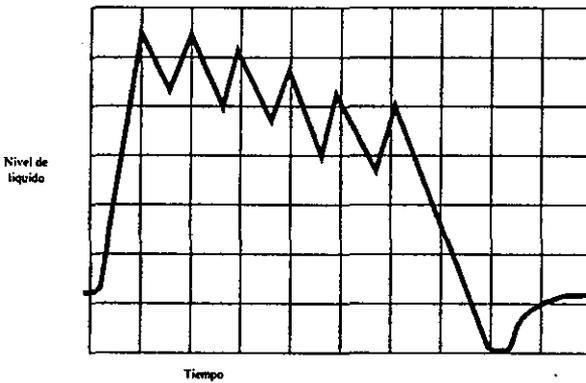


Figura 3.41. Sección 5 del despliegado

5.Este cambio trajo algo de inestabilidad al sistema pues un disturbio lo hizo oscilar unos momentos antes de estabilizarse.

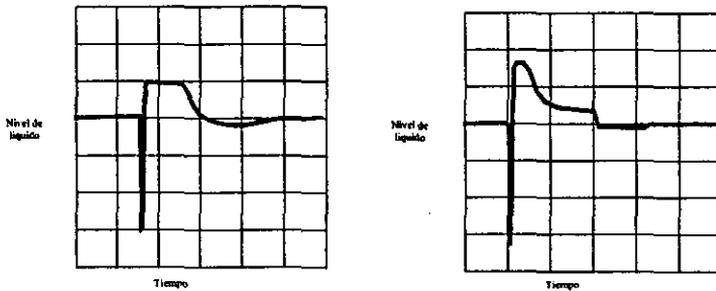


Figura 3.42. Secciones 6 y 7 del desplegado

6 y 7. Como prueba final se le hicieron disturbios impulsivos hacia abajo, los cuales fueron compensados de manera óptima por el controlador

La información que aparece en páginas posteriores es acerca del programa en el PLC el cual no fue desarrollado en este trabajo de tesis, por no ser necesario puesto que en el laboratorio de control ya existía.

Se incluye como experiencia histórica y el autor no se hace responsable por la información contenida, puesto que sólo la copió.

DATOS TECNICOS DEL CONTROLADOR

Precisión en la Medición	$\pm 1\%$	Exactitud de la medición	± 0.25 mm
Rango de control	0-.030 m	Retraso de la medición	0.5 s
Rapidez de cambio de nivel (max.)	0.04 cm/s	Tipo de control	PID
Precisión real de nivel	1 mm	Tipo de proceso de señal	Digital
Potencia de las bombas (maxima)	30 watts	Voltaje de operacion	120 V

El bloque OB1 (programa principal) solamente llama al segmento FB26. El FB26 abre un bloque de datos (DB2) y determina los parámetros del controlador $K_r T/T_i$, $K_r T_d$ y K_r . FB26 también maneja el tiempo de muestreo a través de los temporizadores T10 y T11, y utiliza los procedimientos de sistema FB250 y FB251 para leer y mandar las señales analógicas de entrada y salida del PID. El tiempo de muestreo T se determina por los comandos L KT en el FB26. Observemos que el formato con punto fijo en la mitad de la palabra de 16 bits implica que a un número entero le corresponde un valor con punto fijo multiplicado por 1/256. Así, por ejemplo, si transferimos el valor entero a una palabra de en la memoria, el PID lo interpreta como 1.0. El número 128 es 0.5, y al número 640 (=512+128) le corresponde 2.5.

El bloque FB24 es un multiplicador con punto fijo que multiplica dos números grabados en las palabras FW41 y FW42 y le pone el resultado como un número de 16 bits en el acumulador 1 de la CPU, suponiendo que el byte alto es la parte entera y el byte bajo es la parte fraccional.

El bloque FB25 es la parte principal del PID y realiza la fórmula (3). Observe que el error de control está ubicado en la palabra de datos DW4, el "set point" está en DW14, el valor real (que viene de la entrada analógica) se graba en DW15 y el resultado final (la salida del controlador) aparece en DW13.

Hay que observar que todos los parámetros del sistema y las variables de entrada-salida están guardadas en un bloque de datos. Recordemos que los bloques de datos pueden ser múltiples y el programa puede brincar fácilmente de un bloque de datos a otro (instrucción C Dbn abre el bloque número n.). De esta manera el mismo PID puede aplicarse a múltiples mallas controlando distintos procesos. Esta propiedad es la que hace al PID digital más flexible y útil. si en la planta tenemos que controlar muchas variables simultáneamente, el PID digital puede resultar más económico que la aplicación múltiples controladores separados.

EL PROGRAMA

Bloque FB26 (manejo de entrada-salida analógica, tiempo de muestreo)

FB26

C'TR

L KF 100

G DB2

C DB2

L KF 100

T DW1 ganancia K_r

L KF 5

T DW2 parámetro $T K_r/T_i$

L KF 200

T DW3 parámetro $K_r T_d$

JU FB250 entrada analógica de x

BG:3

KNKT:0,6
 OGR:20000
 UGR:-20000
 XA:DW15
 FB:Q1.0
 BU:Q1.1 fin entrada analógica

L KF 0
 T DW14 set point
 AN T11
 L KT 1.1
 SE T10
 A T10
 =Q 1.5
 AN T10
 AN T11
 A 10.0 al prender IO.0 llama
 JC FB25 a PID
 AN T10
 L KT 1.1
 SE T11
 JU FB251 salida analógica del PID

XE:DW13

BG:4

KNKT:0.1

OGR:20000

UGR:-20000

FEH:Q1.2

BU: Q 1.3 fin salida analógica

BE fin del segmento

BLOQUE FB25 (EL PID)

FB25

PID

L DW4 error
 T DW5 error anterior
 L DW14 set point
 L DW15 salida x
 -F
 T DW4
 L DW7
 T DW6

L DW4
 L DW5
 -F
 T DW7
 L DW7
 L DW6
 -F
 T DW8
 L DW1
 T FW41
 L DW7
 T FW43
 JU FB24
 T DW9
 L DW3
 T FW41
 L DW8
 T FW43
 JU FB24
 T DW10
 L DW2
 T FW41
 L DW4
 T FW43
 JU FB24
 T DW11
 L DW9
 L DW10
 +F
 L DW11
 +F
 T DW12
 L DW13
 L DW12
 +F
 T DW13 salida PID
 AN IO.1 si no oprime IO-1 sigue
 BEC fin condicional
 L KF0 reset cuando
 T DW13 se oprime IO.1
 T DW6
 T DW15
 BE

CONCLUSIONES

Hay que decir que no hubiera hecho falta terminar el trabajo de tesis para escribir las conclusiones. Los resultados finales fueron los esperados, y obedecieron la siguiente premisa: La realidad es mucho más compleja y difícil que lo que se puede predecir.

A lo largo de los estudios profesionales la afirmación anterior va aprendiéndose cada vez mejor en cada proyecto práctico que se desarrolla. Por esta razón se hizo el primer comentario.

Como todo proyecto de ingeniería el problema que planteó esta tesis no escapó a las predicciones mencionadas. Cada sistema que se implementó presentó dificultades inesperadas, entre las cuales pueden citarse: no linealidades, (saturaciones, zonas muertas, etc.), problemas de espacio, problemas con ruido, vibraciones mecánicas etc. Debido a que este es un trabajo de carácter más bien práctico los problemas no considerados se resolvieron al paso, pues no requirieron de un análisis muy profundo y se superaron con ingenio y creatividad.

Se hicieron comentarios sólo de los problemas que forzaron un cambio en plan original de trabajo. Tal es el caso del acondicionador de señal, el cual es explicado en el tema de amplificadores.

No tiene sentido hablar de los problemas que fueron resueltos al momento, pues no aportan ningún conocimiento enriquecedor a la ingeniería, además de que su número hace imposible mencionar cada uno de ellos.

Hay que decir también que es muy difícil obtener un modelo matemático que describa la realidad tal cual es, pues ya se vio que los principales resultados anteriores a la implantación fueron producto de una simulación más que de un análisis matemático del problema.

La lista de lecciones prácticas aprendidas es como sigue:

- La realidad generalmente es más difícil de lo que se puede pensar.
- No siempre es necesario tener un modelo matemático del problema para resolverlo, es recomendable y factible utilizar soluciones alternas como la simulación la experimentación, etc.
- Es importante considerar (desde el punto de vista económico y de tiempo) problemas no considerados, es decir, se sano pensar que lo que puede salir mal saldrá mal.
- Por los puntos anteriores, es prudente esperar rendimientos más bajos y comportamientos menos óptimos a los planeados inicialmente.

A pesar de las dificultades el problema logró resolverse, se diseñó e implementó un control digital de nivel.

Como se dijo en su momento la justificación de esta tesis era la necesidad de hacer llegar tecnología de control a algún tipo de proceso industrial. La implementación exitosa del controlador da una prueba de que esto es posible. Es labor de ingenieros tratar de mejorar cada proceso existente en la industria de nuestro país.

Para finalizar es importante decir que la solución a los problemas económicos de nuestro país no radica solamente en tomar decisiones desde un escritorio, sino que también debe sustentarse en trabajo arduo de científicos, empresarios e ingenieros.

Hasta que la tecnología sea vista como el único medio para vencer los problemas que aparentemente nos superan podremos dar el paso hacia un México mejor.

BIBLIOGRAFIA

GENE, Franklin

Control de Sistemas Dinámicos con Retroalimentación

Cuarta edición Addison-Wesley Iberoamericana, México 1991

OGATA, Katsuhiko

Ingeniería de Control Moderno

Segunda edición, Prentice Hall Hispanoamericana 1980

KUO, B.C.

Discrete Data Control Systems.

Segunda edición, New Jersey Prentice Hall 1970

LYNN, Paul

Digital Signal Processing with Computer Applications

John Wiley and Sons.