



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO PARA LA
ENSEÑANZA DE LA DINÁMICA Y CONTROL
DE PROCESOS A NIVEL LABORATORIO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A:

RODRIGO GARCÍA ROBLEDO

ASESOR: I. Q. EDUARDO VAZQUEZ ZAMORA



México D. F. Mayo de 2007.



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.

AGRADECIMIENTOS.

Agradeciéndote a ti primero Dios mío por permitirme lograr una meta más en mi vida, y el saber que siempre caminas conmigo en cada etapa de mi vida y no permitas que me olvide de ti en ningún momento.

Un agradecimiento muy especial para mis padres, por brindarme su cariño y apoyo no solamente en esta etapa, por toda mi vida, por prestarme tanta atención y brindarme los mejores consejos que un hijo puede recibir.

Agradeciendo de manera general a la Universidad Nacional Autónoma de México, por pertenecer a esta gran institución, a la DGAPA (proyecto PAPIME No. EN – 108603), por el apoyo económico para la realización de este trabajo.

A mi asesor y amigo Eduardo Vázquez Zamora por recibirme y apoyarme dentro de este proyecto y gracias por aguantarme mis alegrías y tristezas y por brindarme tantos grandes consejos y conocimientos, así como llevarme una grata impresión en esta parte final de la carrera y el haber formado parte de un gran equipo de trabajo.

A los profesores Eduardo Loyo Arnaud, a José Benjamín Granados Rangel, a Raúl Ramón Mora Hernández, por ser pilares dentro de la formación que tuve de la carrera de Ingeniería Química, por brindarme sus conocimientos y consejos, así como el brindarme su amistad.

A mi hermana Ana Cecilia, porque yo se que esta meta te alegrara y porque se que tu también lo lograras.

A mi amigo Alejandro Aguirre Martínez, por brindarme su invaluable amistad, por su apoyo, por escuchar mis alegrías, al igual que tristezas y por dejarme conocerte como eres un gran amigo.

A mi abuelito José Robledo Sánchez, por dirigirme y brindarme tantos consejos, aún cuando ya no estas con nosotros, muchas gracias abuelito, siempre te llevare en mi corazón.



Índice.

INDICE.

Índice de figuras.

Nomenclatura.

Resumen.

Introducción

I.	Proceso capacitivo puro.	7
1.	Sistemas capacitivos puros.	8
1.1	Respuesta de un sistema capacitivo a varias entradas.	10
1.2	Sistemas no autorregulados.	14
1.3	Sistemas autorregulados.	18
1.4	Sistemas con dos capacitancias.	22
1.5	Procesos con combinación de tiempo muerto y capacitancia.	26
1.6	Procesos multicapacitivos.	28
1.7	Banda proporcional.	39
1.8	Aproximaciones de padé.	42
1.9	Simulación en matlab de sistemas tipo capacitivo puro.	48
II.	Proceso de retraso lineal.	53
2.	Sistema estático.	54
2.1	Retraso de primer orden.	55
2.2	Sistema de serie de dos primeros ordenes.	57
2.3	Dos sistemas no interactuantes en serie.	60
2.4	Modelo de función de transferencia.	62
2.5	Paso de unidad de respuesta de los sistemas en serie no interactuantes.	64
2.6	Los sistemas interactuantes.	67
2.7	Sistemas de segundo orden.	68
2.8	Respuesta de segundo orden para varias entradas.	70
2.9	Sistemas N de primer orden en serie.	74
2.9.1	Sistema general de orden N.	79
2.9.2	Simulación de los sistemas de retraso lineal en matlab.	80
2.9.3	Simulación de un sistema de retraso de primer orden.	81
2.9.4	Simulación de un sistema de retraso de segundo orden.	83



Índice.

III. Proceso de diseño y montaje de equipo.	84
3. Proceso de diseño y montaje de equipo y accesorios para Prototipo de dinámica y control de procesos.	85
3.1 Isométrico de tubería.	92
3.2 Instrumentación.	97
3.2.1 Controlador.	97
3.2.2 Sensores de nivel.	98
3.2.3 Válvulas solenoides.	98
3.2.4 Bombas.	99
3.3 Diagrama de flujo de proceso.	100
3.4 Diagrama de tubería e instrumentación.	101
3.5 Diagrama unifilar.	102
3.6 Diseño de tablero de control.	103
IV. Análisis del prototipo a nivel laboratorio.	106
4. Exploración dinámica de los tanques drenados por gravedad.	107
4.1 Controlador proporcional (P), solamente para control de nivel del tanque.	121
4.2 El riesgo de utilizar sintonización en controladores proporcional derivativo (PI) por ensayo y error.	125
4.3 PID con filtro y el control de procesos de los multitanques.	129
4.4 Control adoptivo PI de procesos no lineales.	132
Conclusiones.	136
Bibliografía.	138
Anexo de planos de prototipo de dinámica y control de procesos.	140



Figura	Contenido	Pagina
1	Diagrama de bloques del elemento de capacitancia de un liquido.	8
2	Gráfica que muestra un paso de respuesta en un proceso capacitivo puro en base a su función de transferencia.	11
3	Gráfica que muestra el comportamiento de una respuesta pulso rectangular en un proceso capacitivo puro.	11
4	Gráfica que muestra el comportamiento de una respuesta tipo impulso de varias entradas.	12
5	Gráfica que muestra el comportamiento de una respuesta tipo rampa en un proceso capacitivo puro.	12
6	Gráfica que muestra una respuesta tipo senoidal de un proceso capacitivo puro de varias entradas.	13
7	Sistema no autorregulado.	14
8	Sistema de respuesta del tanque a una entrada escalón.	16
9	Tanque con sistema autorregulado.	18
10	Sistema de medición de nivel con capacitancia principal.	22
11	Ganancia del proceso y banda proporcional.	28
12	Capacitancia aislada, interacción entre tanques.	29
13	Respuesta de procesos multicapacitivos interactuantes.	32
14	Respuesta en un proceso bajo la acción de un controlador proporcional.	37
15	Amortiguamiento de $\frac{1}{4}$ de amplitud.	38
16	Unidad de paso de respuesta de un retraso de tiempo puro, usando primero, segundo y tercer orden de aproximaciones de Pade.	44
17	Respuesta de frecuencia de un retraso de tiempo puro.	45
18	Unidad de paso de respuesta de un tiempo de retraso usando el sistema de N primer orden de aproximación.	46
19	Curva de respuesta escalón unitario.	49
20	Curva de respuesta impulso unitario.	51
21	Curva de respuesta tipo rampa.	52
22	Retraso de primer orden, elemento de flujo líquido.	55
23	Respuesta de un sistema de primer orden.	56
24	Dos tanques no interactuantes conectados en serie.	58
25	Interacción de dos tanques en serie.	59
26	Representación de un diagrama de bloques de dos sistemas de primer orden conectados en serie.	63
27	Unidad de paso de respuesta del nivel del líquido en los dos tanques de proceso.	65
28	Paso de respuesta de sistemas de segundo orden.	73
29	Diagrama de bloques de N no interacciones.	75
30	Paso de unidad de respuesta de varias no interacciones de sistemas de primer orden en serie.	78
31	Simulación de un sistema de primer orden.	82
32	Simulación de un sistema de segundo orden.	83
33	Montaje de equipo principal y tubería.	86
34	Mesa de ubicación de equipo principal.	87
35	Vista aérea de equipo principal.	88
36	Bombas fijas en base.	89
37	Placas de Bombas.	89
38	Prototipo con tubería instalada.	91
39	Bombas con tubería instalada.	99
40	Placa principal de tablero de control.	104
41	Placa de tablero de control.	105
42	Placa de tablero de control.	105



Índice de Figuras.

Figura	Contenido	Pagina
43	Comportamiento de un sistema drenado por gravedad	109
44	Función de impulso de unidad de respuesta	113
45	Tanque drenado por gravedad	116
46	Flujo de salida constante	117
47	Paso de unidad de respuesta	117
48	Función de transferencia para sistemas drenados por gravedad	117
49	Grafica de sistemas de respuesta	118
50	Gráfica de un sistema de unidad de paso de respuesta	118
51	Esquema representativo del sistema	120
52	Sistema de control de un proceso integrador	123
53	Sistema de control de un proceso de primer orden	123
54	Diagrama de bloques de un proceso de segundo orden	126
55	Diagrama de bloques de un controlador PID con filtro de acción derivada	130
56	Respuesta de un retraso inicial	130



Nomenclatura

Nomenclatura.

AR = radio de amplitud.

b = polarización.

$e(t)$ = error.

h = nivel en tanque.

K_c = ganancia del proceso.

K_p = ganancia del proceso.

$\emptyset$ = ángulo de fase.

τ_0 = periodo natural de lazo de control.

$m(t)$ = variable manipulada.

P = periodo de oscilación

Q_s = caudal de salida.

A = amplitud.

$c(t)$ = variable controlada.

$G(s)$ = función de transferencia.

K = ganancia.

ζ = coeficiente de humedad.

LC = controlador de nivel.

τ = constante de tiempo.

τ_1 = constante de tiempo efectivo.

t_d = tiempo muerto.

Q_e = caudal de entrada.

R = tiempo integral.



Resumen.

En el presente trabajo se desarrollo un prototipo para la dinámica y control de procesos, que esta implementado principalmente para el manejo de sistemas SISO (una simple entrada – una simple salida) y sistemas MIMO (múltiples entradas – múltiples salidas) operando el prototipo, en proceso de retraso lineal y en proceso capacitivo puro, empleando especialmente tres tipos de combinaciones de los procesos: retraso lineal – retraso lineal, retraso lineal – capacitivo puro, capacitivo puro – retraso lineal. El prototipo esta a escala, cuenta con cinco tanques de acrílico transparente, un tablero de control del mismo material, sensores de nivel, válvulas solenoides, bombas, controlador, tubería y accesorios de $\frac{1}{4}$ in de PVC. El diseño del prototipo fue en base a principios y conceptos teóricos que se manejan en la dinámica y control de procesos, adecuando principalmente para el tipo de sistemas requeridos. La operación del prototipo puede ser tanto manual como automática involucrando tanto el modelado físico y matemático, que esta ampliamente dirigido para tener un enfoque más detallado acerca de los fenómenos dinámicos y la operación de sistemas de control, permitiendo percibir al estudiante de ingeniería química la gran importancia del desarrollo de un modelo matemático como única vía para poder diseñar sistemas de control, determinando que información es relevante para que el prototipo para la dinámica y control de procesos sea analizando a nivel laboratorio. Un punto muy importante es que el trabajo en el laboratorio apoyado por la computadora, los sensores, los microcontroladores, las interfases; permite al alumno detenerse más en la estrategia de solución de los problemas, en comparar soluciones y enfocar su atención al diseño de resolución de los mismos, seguir la secuencia de los fenómenos o de los problemas, comparar soluciones con mayor precisión y rapidez, permitiendo al estudiante de ingeniería química darse cuenta, de manera inmediata, de la calidad de los resultados y ensayar diversos caminos para llegar a la solución de sus problemas, todo lo anterior le permitirá una mayor reflexión con los aspectos teóricos y con ello se contribuye a hacerlos más críticos.



INTRODUCCIÓN



INTRODUCCION.

En la actualidad, la enseñanza de la Ingeniería química viene marcada por el incremento de su carácter científico y por la expansión de su aplicación a otros campos no tradicionales de esta disciplina, adquiriendo un carácter marcadamente multidisciplinar. La evolución de la Ingeniería Química puede analizarse a través de los cambios sufridos en los modelos educacionales, que han variado a lo largo de los distintos periodos. Debiendo resaltarse la necesidad de mantener la enseñanza de los conceptos básicos y de las herramientas clásicas de la Ingeniería Química. Al mismo tiempo debe potenciarse la incorporación de nuevas materias que permitan la resolución de problemas industriales planteados por las tecnologías emergentes. Por otra parte, también es importante el papel que juegan los ordenadores en la enseñanza actual de la Ingeniería Química y la necesidad de contemplarlos en el diseño de los planes de estudios así como el de fomentar el uso crítico de programas comerciales de software.

La dinámica y control de procesos es un aspecto de Ingeniería Química, concertado con el análisis, diseño e implementación de sistemas de control que facilitan objetivos de procesos de seguridad, datos de producción y calidad en los productos. Los procesos de control es una subdisciplina de la automatización de control que involucran la selección y el manejo de métodos para una eficiente operación de los procesos químicos. La dinámica y el control de procesos permite desarrollar en un futuro una serie de actividades profesionales que son de vital importancia dentro de la formación del Ingeniero Químico. El planear, diseñar y especificar estrategias sencillas de control, el diagnosticar y resolver problemas sencillos del sistema de control de una planta en operación y participar en la gestión de la adquisición de un sistema de control para una planta, consolidan una formación básica para esa serie de actividades profesionales que día con día son demandadas en la Industria Química.



Dentro del estudio de la dinámica y control de procesos, se pueden encontrar muchos de los aspectos de la Ingeniería Química que son relevantes y que se involucran dentro de la dinámica y control de procesos, como lo son: Flujo de Fluidos, Diseño de Equipo, Ingeniería de servicios, Ingeniería de Procesos, todo ello conformando un núcleo importante para el buen desarrollo y control de procesos y que son de vital importancia para el alumno, el poderse capacitar para desarrollar en un futuro las actividades profesionales en el campo de la dinámica y control de procesos, así como el poder analizar y entender estrategias más complejas, el poder diagnosticar y resolver problemas de sistemas de control y el poder participar en la gestión de la adquisición de equipos e instrumentos de un proceso.

El mundo de la computadora no solamente está limitado a las computadoras personales, también se puede encontrar adelantos en el mundo de los microcontroladores, dada la evolución de las computadoras durante los últimos años, se han hecho muy populares las computadores personales (PC), así como los microcontroladores creando plataformas de computación en costo relativamente muy bajo, muchos de estos dispositivos están siendo empleados en Laboratorios, Fábricas, en la adquisición de datos y aplicaciones de control. Con la apertura de un mercado a nivel internacional, el costo de producción tendrá que abatirse para hacer frente a los altos niveles de competencia que se tienen en los países que tendrán acceso a nuestros consumidores, la modernización de los sistemas de control industrial juega un papel importante en este contexto, así como también el desarrollo de recursos humanos necesarios para que este se lleve al cabo, con el empleo de microcontroladores más económicos para el control de procesos.



Si la única razón para establecer sistemas de control fuera para eliminar los costos excesivos, muchos negocios afrontarían esta desventaja cuando los márgenes de utilidad lo permitieran, sin embargo, hay una razón de mucho mayor peso para adoptar sistemas de control altamente eficientes, esta razón es la seguridad laboral.

La ingeniería está experimentando un periodo de cambio y crecimiento dramáticos en varias áreas. Esto ha provocado que en el mercado laboral exija profesionales calificados para satisfacer estos cambios tecnológicos tanto a nivel nacional como internacional.



Objetivos:

- Enseñanza y aplicación de los conceptos involucrados en la Dinámica y Control de Procesos empleando para ello un prototipo a nivel Laboratorio.
- Identificar los principios y conceptos teóricos que son relevantes para el desarrollo de este trabajo a nivel laboratorio.
- Analizar los pasos de progresión en el diseño de este prototipo.
- Determinar que información es relevante en el proceso experimental para que lo manejen los alumnos y las opciones para el modelado matemático del mismo.
- Analizar si existen prototipos alternos y desarrollar los detalles para alinearla a esta opción.
- Que el prototipo sea analizado a nivel laboratorio.



I. PROCESO CAPACITIVO PURO.

1. Sistemas capacitivos puros.

Los procesos en su mayoría disponen de varios elementos dinámicos por lo general capacitivos y rara vez inductivos, que se combinan con elementos resistivos. A los elementos dinámicos, se suma otros elementos que no pueden ser considerados como tal, pero que influye notablemente en los lazos de control, este es el denominado tiempo muerto, cuya dimensión es simplemente el tiempo.

La capacitancia de un líquido es directamente análoga a la capacitancia eléctrica y se representa por medio de un tanque de compensación que se utiliza para almacenar líquido en forma temporal.

$$CL = (dh/dt) = f$$

En donde CL= capacitancia del líquido o área de la sección transversal.

En el dominio de Laplace, la ecuación anterior se simplifica:

$$CLsH(s) = F(s) \quad \text{ó} \quad H(s) = 1 / CL^s * F(s)$$

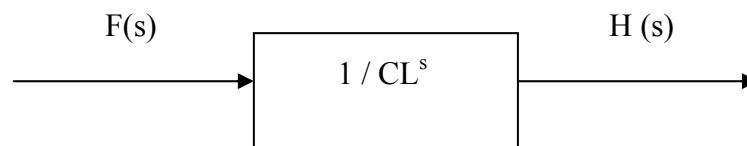


Figura.1

Diagrama de Bloques del elemento de capacitancia de un líquido.



Las ecuaciones diferenciales de primer orden son usadas para el modelado del comportamiento dinámico de sistemas de primer orden. La ecuación diferencial de primer orden que describe dicho comportamiento es la siguiente.

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = bu(t) \quad (1)$$

Los parámetros característicos de un sistema de primer orden son, la constante de tiempo y la constante de ganancia de estado. Tomando en cuenta que cuando el valor de $a_0 = 0$, se estructuran las siguientes ecuaciones.

$$a_1 \frac{dy}{dt} = bu(t) \quad \text{ó} \quad \frac{dy}{dt} = K^* u(t) \quad (2)$$

Donde

$$K^* = \frac{b}{a_1} \quad (3)$$

Un proceso modelado por la ecuación (2), se sabe que su comportamiento es el de un proceso capacitivo puro. Tomando en cuenta que la naturaleza específica de la función de entrada $u(t)$, para la solución de ecuación (2) es fácilmente obtenida por integración directa, asumiendo como condiciones iniciales cero, el resultado obtenido es:

$$y(t) = K^* \int_0^t u(\sigma) d\sigma \quad (4)$$

Porque la salida de este proceso involucra una integración de la función de entrada, el proceso capacitivo puro es a veces llamado también integrador puro.



Tomando la transformada de Laplace para la ecuación (2) da como resultado

$$y(s) = \frac{K^*}{s} u(s) \quad (5)$$

Desde la cual se obtiene la función de transferencia para el sistema capacitivo puro.

$$g(s) = \frac{K^*}{s} \quad (6)$$

El sistema capacitivo puro por lo tanto es caracterizado por la presencia del integrador (o capacitancia) elemento $\frac{1}{s}$, y el parámetro K^* . La función de transferencia de un sistema capacitivo puro, tiene un polo originado ($s=0$) y no hay ceros.

1.1 Respuesta de un sistema capacitivo puro a varias entradas.

Nuevamente para combinar la función de transferencia de un sistema capacitivo puro con la transformada de Laplace de la función de entrada, se puede utilizar la función de transferencia de la ecuación (5) para derivar la respuesta de estos sistemas de proceso a varias funciones de entrada.

Paso de Respuesta.

En este caso se tiene:
$$y(s) = \frac{K^*}{s} \frac{A}{s} = \frac{AK^*}{s^2} \quad (7)$$

El cual se invierte fácilmente para el tiempo, quedando:

$$y(t) = AK^*t \quad (8)$$

La ecuación de una función tipo rampa con cuesta AK^* .

Los siguientes casos demuestran el tipo de respuesta que tiene un proceso capacitivo puro, para otras funciones de entrada.

Paso de Respuesta.

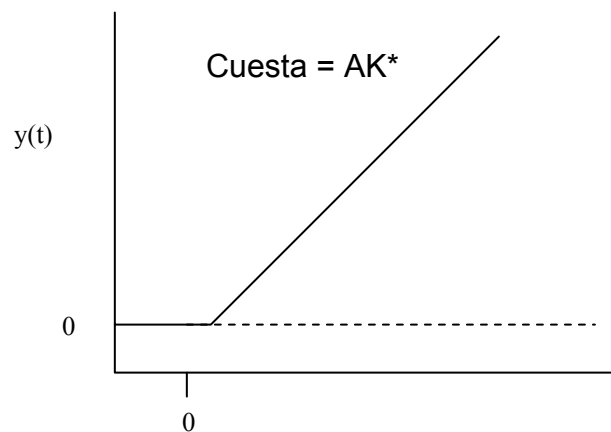


Figura. 2. Gráfica que muestra un paso de respuesta en un proceso capacitivo puro en base a su función de transferencia.

Respuesta de pulso rectangular.

$$y(t) = \begin{cases} 0; t < 0 \\ AK^*t; 0 < t < b \\ AK^*b; t > b \end{cases}$$

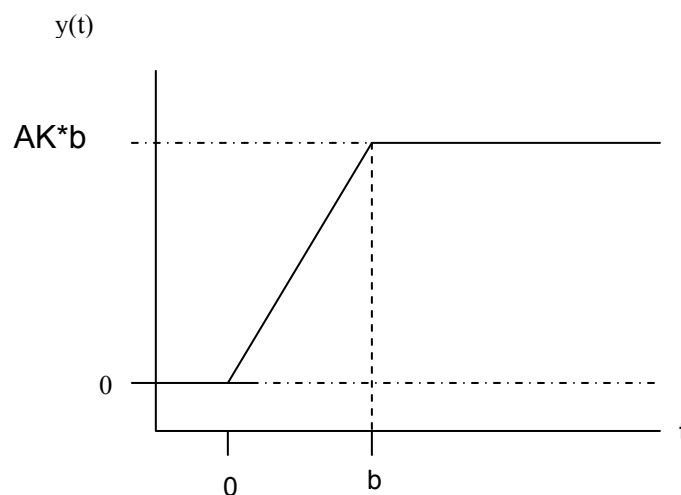


Figura. 3. Gráfica que muestra el comportamiento de una respuesta tipo pulso rectangular, en un proceso capacitivo puro.

Respuesta Impulso. $y(t) = AK^*$ (9)

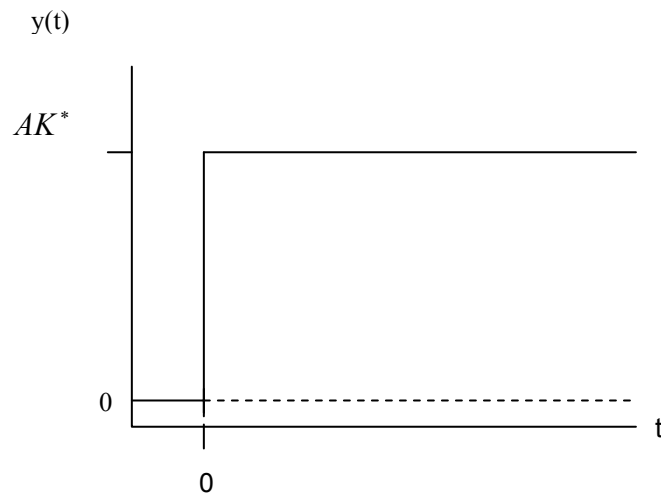


Figura.4. Gráfica que muestra el comportamiento de una respuesta tipo impulso en un proceso capacitivo puro de varias entradas.

Respuesta Rampa. $y(t) = \frac{AK^*t^2}{2}$ (10)

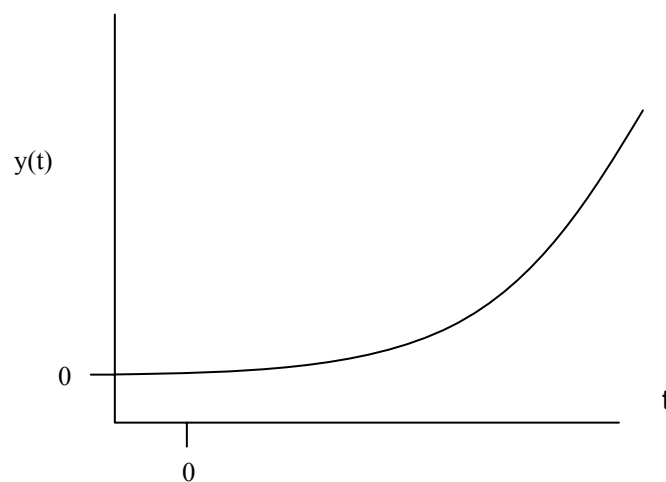


Figura. 5. Gráfica que muestra el comportamiento de una respuesta tipo rampa en un proceso capacitivo puro de varias entradas en base a su función de transferencia.

Respuesta Senosoidal. $y(t) = \frac{AK^*}{\omega} (1 - \cos \omega t)$ (11)

ó

$$y(t) = \frac{AK^*}{\omega} [1 + \sin(\omega t - 90^\circ)] \quad (12)$$

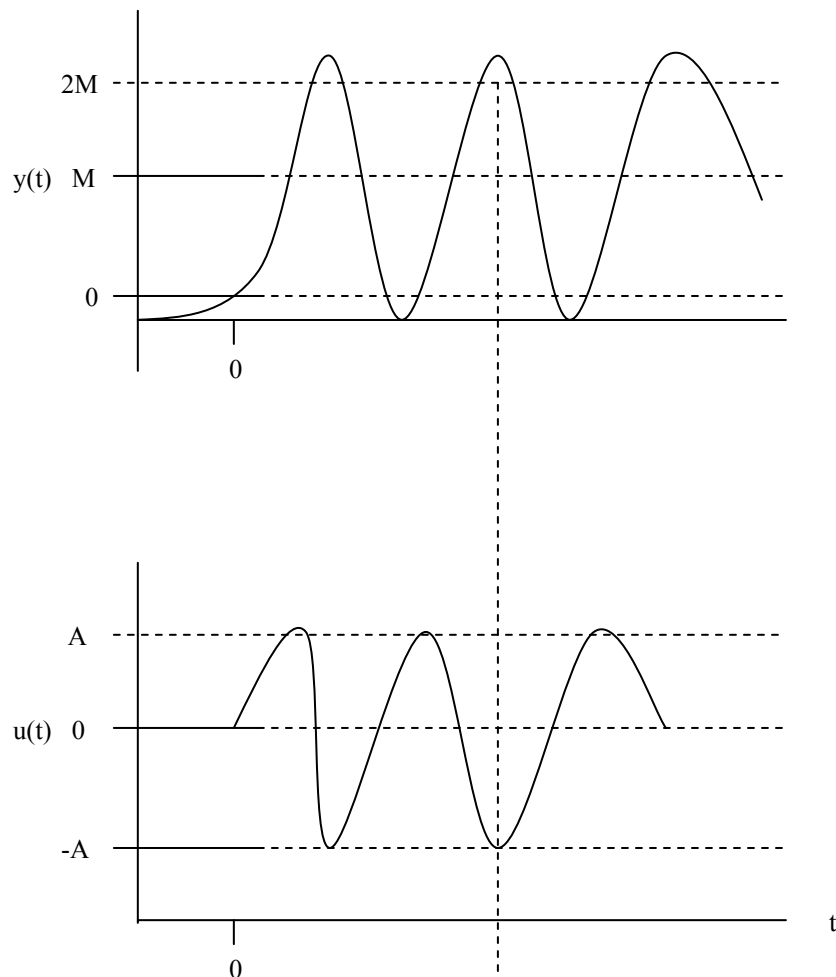


Figura. 6. Gráfica que muestra una respuesta tipo senosoidal, en un proceso capacitivo puro de varias entradas.

Esto implica que la frecuencia de respuesta de un proceso capacitivo puro tiene un radio de amplitud y ángulo de fase dado por:

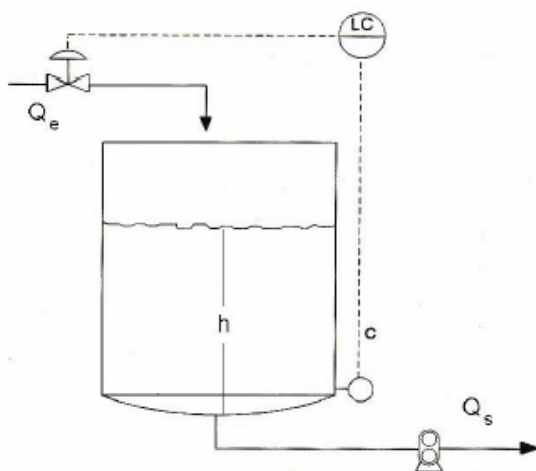
$$AR = \frac{K^*}{\omega} \quad \phi = -90^\circ \quad (13)$$

Las capacitancias son los elementos dinámicos más comunes en los sistemas físicos. Existen dos casos bien diferenciados de sistemas capacitivos. Los sistemas no autorregulados y los autorregulados.

1.2 Sistemas no autorregulados.

Son sistemas a los cuales una perturbación los saca de equilibrio y si esta se mantiene, no se alcanzara naturalmente un nuevo estado estacionario.

En la figura.7. Se muestra un tanque cuyo caudal de salida es producido por una bomba de caudal constante.



Donde:

Q_e = Caudal de entrada.

Q_s = Caudal de salida.

LC = Controlador de nivel.

h = Altura o nivel en el tanque.

Figura.7.
Sistema no autorregulado.



El contenido del tanque variara de acuerdo con

$$dv/dt = Qe - Qs \quad (14)$$

En donde

$$v(t) = \int_0^t (Qe - Qs) dt \quad (15)$$

Si el tanque es de paredes verticales y su área superficial es constante, el nivel instantáneo está dado por:

$$h(t) = 1/A \int_0^t (Qe - Qs) dt \quad (16)$$

Expresión que nos muestra que un proceso capacitivo puro es integrador y por lo tanto su comportamiento frente a una señal de entrada senosoidal no puede ser diferente para un controlador integral.

En la ecuación anterior se hace adimensional dividiendo ambos miembros por la altura H del tanque y a su vez se expresan los caudales de entrada y salida como fracciones de caudal máximo Q. Se tiene que el nivel es

$$x(t) = h(t)/H = Q/V \int_0^t (qe - qs) dt = 1/\tau \int_0^t (qe - qs) dt \quad (17)$$

Donde:

$$Q(qe - qs) = Qe - Qs \quad (18)$$

$V = A * H$ es la capacidad del tanque.

$V / Q = \tau$ es la constante de tiempo capacitiva.

La respuesta del tanque a una entrada escalón es la que se muestra en la figura.8.

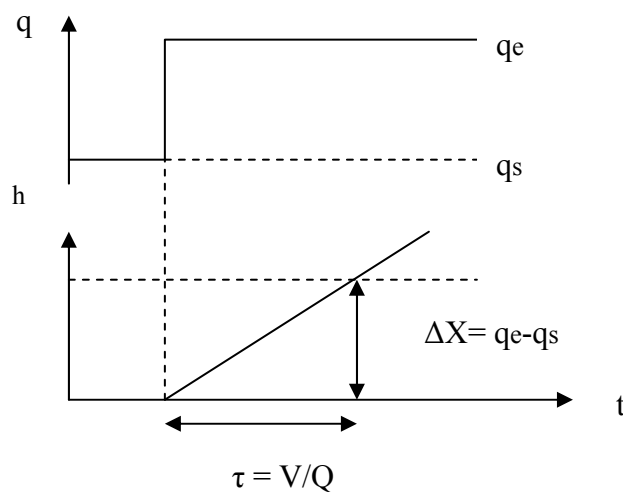


Figura.8

Sistema de respuesta del tanque a una entrada escalón.

En la que se observa que un determinado porcentaje de cambio en el nivel igualará al mismo porcentaje de cambio en la diferencia de caudales, cuando $t = \tau$

$$dx / dt = (qe - qs) / \tau \quad (19)$$

El nivel del tanque puede controlarse manualmente, mediante la posición de la válvula es decir ajustando el caudal de entrada. Pero si el caudal de entrada varia sobre o debajo del caudal de salida, como este ultimo es constante, el tanque puede vaciarse. Esta característica define a este tipo de procesos como no auto regulados, esto es debido a que no tienen equilibrio natural. Los procesos autorregulados generalmente no pueden funcionar satisfactoriamente sin control automático.

Debido a su comportamiento integrador, un proceso no auto regulado presenta un atraso de fase de 90° , por lo que si se controla con un controlador proporcional no se alcanzaran los -180° necesarios para la oscilación permanente, pudiendo reducirse la banda proporcional tanto como sea necesario, inclusive hasta llegar a cero.

Bajo la acción de un controlador integral, el lazo oscilara de manera permanente. La ganancia de un proceso capacitivo no auto regulado es igual a la de un controlador integral.

$$k_p = \tau_0 / 2\pi\tau \quad (20)$$

Para oscilación permanente la ganancia de lazo abierto debe ser igual a la unidad,

$$k_p k_c = \tau_0 / 2\pi\tau * \tau_0 / 2\pi R \quad (21)$$

De donde

$$\tau_0 = 2\pi\sqrt{R\tau} \quad (22)$$

Lo cual muestra que un cambio en R altera solamente al periodo natural pero no puede amortiguar la oscilación.

1.3 Sistemas autorregulados.

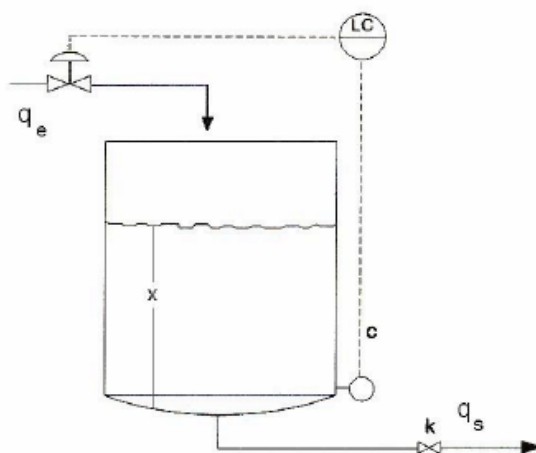
Los sistemas autorregulados son aquellos en los que un incremento o perturbación de la variable de entrada o forzada produce un incremento en la variable de respuesta o salida hasta que esta alcanza un nuevo estado estacionario. Si en lugar de la bomba de caudal constante, a la salida del tanque, se coloca una válvula de paso la cual equivale a una restricción (elemento resistivo) cualquier incremento en el nivel producirá un aumento en el caudal de salida. Esta acción se conoce como autorregulación que constituye principalmente a una retroalimentación negativa natural. Como se puede observar en la figura.9.

En este elemento resistivo la relación entre el caudal de salida y el nivel es cuadrática (no lineal)

$$q_s = k\sqrt{x} \quad (23)$$

Sin embargo para pequeños valores de x , es posible linealizar la respuesta, siendo

$$q_s = kx \quad (24)$$



Donde:

q_e = Caudal de entrada.

q_s = Caudal de salida.

k = Elemento resistivo.

LC = Controlador de nivel.

x = Nivel.

Figura.9.
Tanque con un sistema autorregulado.

El nivel $x(t)$ se mantendrá estable mientras $q_e = q_s$

Con un cambio instantáneo en el caudal de entrada (señal escalón) el nivel comenzará respondiendo del mismo modo que una capacitancia no autorregulada, debido a que el caudal de salida aun no ha comenzado a aumentar. El crecimiento del nivel disminuirá a medida que se incrementa el caudal de salida y se aproxima al caudal de entrada.

$$dx/dt = (q_e - kx)/\tau \quad (25)$$

Reordenando

$$kx + \tau(dx/dt) = q_e \quad (26)$$

Dividiendo ambos miembros por k y haciendo

$$\tau_1 = \tau/k \quad \text{y} \quad K = 1/k$$

Tendremos

$$x + \tau_1(dx/dt) = Kq_e \quad (27)$$

La transformada de Laplace de esta expresión es

$$\begin{aligned} x(s) + \tau_1 s x(s) - x(0) &= KQe(s) \\ x(s)[1 + \tau_1 s] &= KQe(s) + x(0) \end{aligned} \quad (28)$$

Con $x(0) = 0$ y dividiendo numerador y denominador por τ_1 tendremos

$$x(s) = (KQe(s)/\tau_1)/(1/\tau_1 + s) \quad (29)$$

Si la entrada es una señal escalón unitario, $Qe(s) = 1/s$, luego

$$x(s) = K \frac{1/\tau_1}{(1/\tau_1 + s)s} \quad (30)$$

Realizando la transformada inversa de esta última expresión resulta

$$x(t) = K(1 - e^{-t/\tau_1}) \quad (31)$$

La expresión muestra que la relación entre el caudal de entrada y el nivel, tiene dos componentes desfasadas entre si: una proporcional a x y otra proporcional a la derivada de x . Esto significa que la respuesta se inicia cambiando rápidamente, según su componente proporcional, comenzando luego a actuar la acción integral.

El desfase para una capacitancia autorregulada es

$$\phi_c = -\arctan\left(\frac{2\pi\tau_1}{\tau_0}\right) \quad (32)$$

Donde: ϕ_c = Desfase de capacitancia.

Es decir que para todo periodo natural mayor que cero, lo cual se da en la práctica, el desfase de un proceso capacitivo autorregulado nunca excede $-\pi/2$ por lo que en ningún caso puede alcanzarse oscilación permanente.



Un proceso de este tipo podrá ser controlado con un controlador proporcional con banda proporcional cero, sin peligro de oscilación permanente y sin error de estado estacionario (offset). Dado que un control proporcional, el controlador responde instantáneamente al cambio de valor de consigna, la válvula se abrirá totalmente y el nivel crecerá en función de k y de su valor presente. Si no tuviese control seguiría creciendo, pero la acción va corrigiendo a medida que el error va disminuyendo, ayudado por el caudal de salida que va aumentando con el nivel, cuando se alcanzara el nuevo set point, el caudal de salida se ha igualado con el de entrada, produciéndose amortiguamiento crítico.

En la práctica es muy raro encontrar procesos capacitivos puros o tiempo muerto puro en razón de que:

- Toda masa tiene capacidad de almacenamiento de energía
- No es posible transportar masa o energía en tiempo cero.

Entre el proceso mas sencillo de controlar (capacitancia autorregulada) y el mas complejo (tiempo muerto), existe una inmensa gama de combinaciones. Aun cuando casi todos los procesos son dinámicamente complejos en su gran mayoría su comportamiento puede ser modelado como combinación de solo dos elementos:

- Dos capacitancias o
- Tiempo muerto o capacitancia.

1.4 Sistemas con dos capacitancias.

Cuando el proceso a controlar posee dos capacitancias, cada una contribuye con un atraso de fase, de acuerdo con el tipo de capacitancia de que se trate. El ejemplo de la figura.10., muestra un proceso con una capacitancia no autorregulada (capacitancia principal) a la que se agrega una capacitancia autorregulada debida al sistema de medición de nivel.

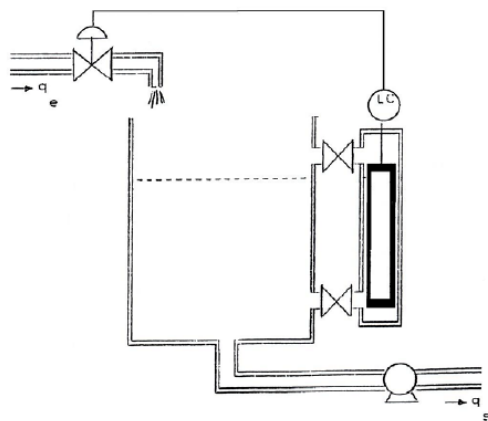


Figura.10.

Sistema de medición de nivel con capacitancia principal.

La constante de tiempo de la capacitancia secundaria es el volumen de la cámara dividido el máximo caudal entrante y se le denominara τ_2 . Para el comportamiento del sistema con un controlador proporcional con banda proporcional cero, cuando la variable controlada es menor que el set point, la válvula estará totalmente abierta y el caudal de entrada es Q . Si el caudal de salida se fija en el 50% de caudal de entrada el nivel crece según.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{Q}{V} (qe - qs) = \frac{1}{\tau_1} (100 - 50) = \frac{50\%}{\tau_1} \quad (33)$$

Y cuando la capacitancia secundaria es autorregulada responde de acuerdo a la expresión siguiente

$$x = c + \tau_2 \frac{dc}{dt} \quad (34)$$

estando ambas capacitancias conectadas entre si tenemos

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dc}{dt} \quad (35)$$

Por las ecuaciones anteriores, la diferencia entre el valor absoluto de x y c es

$$x - c = \tau_2 \frac{dx}{dt} = 50\% \frac{r_2}{r_1} \quad (36)$$

El retardo en tiempo entre el nivel del tanque x , respecto del nivel de la cámara de medición c , es

$$\tau_2 = \frac{x - c}{\frac{dx}{dt}} \quad (37)$$

El controlador no cierra la válvula hasta que la medición ha alcanzado el set point. En ese punto la variable x tendrá el valor $50\% \tau_2 / \tau_1$ por sobre el set point.

Cuando la válvula se cierra, el nivel comienza a descender al mismo régimen mientras la medición sigue aumentando hasta que iguala a x , que es el punto de inflexión de c puesto que en la ecuación $dc/dt = 0$ cuando $x = c$. El tiempo transcurrido entre la actuación del controlador y el pico de la medición representa $1/4$ de ciclo. Este tiempo está entre $0.5 \tau_2$ y se aproxima a $0.7 \tau_2$.

Esto implica que el periodo del primer ciclo estará en $2.5 \tau_1$ y su amplitud será proporcional a τ_2 / τ_1 . De acuerdo a las características de ganancia y fase del proceso el sistema no puede oscilar permanentemente. Debido a que la válvula de entrada está totalmente cerrada, en concordancia con una disminución en la amplitud debe producirse una disminución del periodo. Para un tiempo tendiendo a infinito el lazo oscila con amplitud y periodo cero característica que se presenta solamente en procesos de dos capacitancias.

Si al proceso con dos capacitancias lo controlamos con un controlador Proporcional Derivativo (PD), cuya expresión es:

$$m = k(e + D \frac{de}{dt}) \quad (38)$$

y siendo

$$x = c + \tau_2 \frac{dc}{dt} \quad (39)$$

como $e = r - c$ y $c = r - x$

$$r - e + \tau_2 \left(\frac{dr}{dt} - \frac{de}{dt} \right) = x \quad (40)$$

Como $r = \text{cte.}$

$$\frac{dr}{dt} = 0$$

$$e + \tau_2 \frac{de}{dt} = r - x \quad (41)$$

Si ajustamos el tiempo derivativo del controlador de modo que sea igual a τ_2 tendremos que

$$e + D \frac{de}{dt} = r - x \quad (42)$$

y reemplazándolo en la ecuación se tiene

$$m = k(r - x) \quad (43)$$

Lo cual significa que se ha conseguido eliminar el efecto de la segunda capacitancia. Sin embargo esto en la práctica no es posible completamente puesto que la ganancia del modo derivativo del controlador es $k_c = \frac{2\pi D}{\tau_0}$ que

tiende a infinito cuando τ_0 tiende a cero.

De allí que el modo derivativo sea muy afectado por el ruido que esta construido por una mezcla de señales periódicas aleatorias. Una pequeña cantidad de ruido de alta frecuencia produce efectos muy perniciosos en un controlador proporcional derivativo (PD) y ello impone un límite en el ajuste de D. Los controladores comerciales limitan este efecto mediante el agregado de un retardo en el modo derivativo con una constante de tiempo igual a D/10, de forma que cuando se ajusta a $D = \tau_2$ en realidad se logra solamente $\tau_2/10$.

1.5 Procesos con combinación de tiempo muerto y capacitancia.

La mayoría de los procesos a pesar de contar con varias capacitancias y tiempo muerto pueden modelarse en general como procesos monocapacitivo + tiempo muerto.

El análisis de un proceso de este tipo, bajo control proporcional, es similar al caso de un proceso de tiempo muerto puro bajo control integral dado que los elementos dinámicos en el lazo en ambos casos son los mismos.

Si la capacitancia del proceso es no autorregulada la equivalencia es exacta. En este caso no es posible el ajuste de R para lograr un amortiguamiento de $\frac{1}{4}$ de amplitud si no que se trata de τ_1 que pertenece al proceso y es fija.

Se debe de recurrir al ajuste de la banda proporcional para lograr el amortiguamiento deseado.

$$\frac{2t_d}{\pi\tau_1} * \frac{100}{p} = 0.5 \quad (44)$$

de donde

$$p = 400 \frac{t_d}{\pi\tau_1} \quad (45)$$

Cuanto más pequeña sea la capacitancia mayor deberá ser p pero muy rara vez se presenta en la práctica una capacitancia autorregulada en combinación con tiempo muerto predominante.

Para un proceso con capacitancia autorregulada, la banda proporcional puede ser aproximada por sus asíntotas, siendo una de ellas la obtenida para la capacitancia no autorregulada y la otra que se obtiene con ganancia unitaria (la cual es la máxima ganancia posible que puede alcanzar el proceso cuando este es tiempo muerto puro).

La figura.11., muestra la ganancia del proceso y la banda proporcional en función de t_d / τ_1

Ganancia del proceso y banda proporcional.

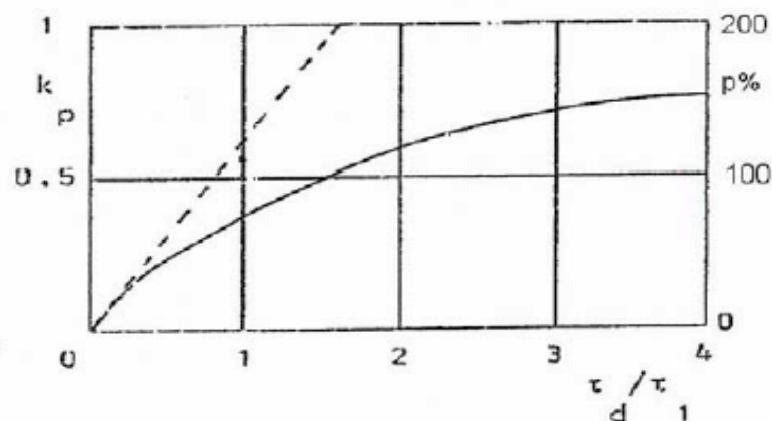


Figura.11.

FUENTE: [PDF.Instrumentación y control automatico. Universidad Nacional del Cuyo.]

El punto medio entre ambas asíntotas (la asíntota es la línea recta que, prolongada, se acerca indefinidamente a una curva, sin llegar a encontrarla), se produce cuando el proceso capacitivo contribuye con un desfase de 45° (esto ocurre cuando $\tau_0 = 2\pi\tau_1$) y el tiempo muerto absorbe un atraso de fase de 135° .

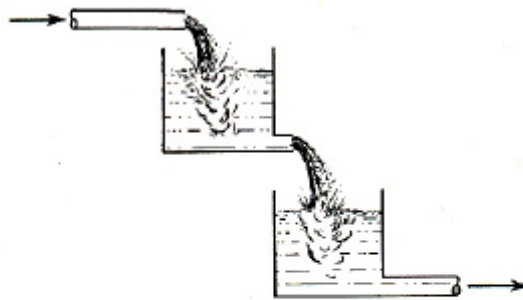
1.6 Procesos multicapacitivos

Los procesos que poseen varios elementos capacitivos pueden ser modelados en casi todos los casos por dos capacitancias

- Procesos con capacitancias aisladas o no interactuantes.
- Procesos con capacitancias que interactúan entre si.

La figura.12. muestra ambos casos, en el primero se observa que el nivel del tanque inferior no influye sobre el superior (capacitancias aisladas) en el segundo tanto el caudal de entrada como el de salida son función del nivel de ambos tanques.

Capacitancia Aislada.



Interacción entre tanques.



Figura.12.

El significado de la interacción es que actúa cambiando la constante de tiempo efectiva de las capacitancias individuales. La solución de la ecuación para determinar las constantes de tiempo es irracional, pero para el caso de dos capacitancias interactuantes iguales de constante de tiempo τ , la respuesta combinada es equivalente a dos capacitancias aisladas con el tiempo.

La interacción sigue las siguientes reglas:

1. El grado de interacción es directamente proporcional a la relación entre el valor capacitivo de la mayor capacitancia a la menor. Cuando la relación es menor que 0.1 puede considerarse que las capacitancias no interactúan.

2. La interacción entre los tanques, actúa en el sentido de la constante de tiempo mayor y disminuir la menor.
3. En el caso de capacitancias interactuantes iguales, de constantes de tiempo τ , se convierte en un sistema con una gran constante de tiempo y pequeñas constantes de tiempo cuya suma normalizada es:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\tau_i}{\tau} = \sum_{i=1}^n i = \frac{n^2 + n}{2} \quad (46)$$

En el cual el producto normalizado es:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\tau_i}{\tau} = 1 \quad (47)$$

Un punto destacable de la interacción es que se hace más sencillo el control. La banda proporcional para un proceso con dos capacitancias era función de τ_2/τ_1 , siendo el caso mas critico cuando $\tau_2 = \tau_1$.

Con capacitancias interactuantes esto es imposible dado que se mantiene una diferencia por el efecto. Cuando el proceso posee n capacitancias aisladas de constante de tiempo τ , el desfase total será

$$n\phi = -n \arctan 2\pi\tau/\tau_0 \quad (48)$$

Donde: n = numero de capacitancias. ϕ = desfase.

El máximo desfase posible es $-\pi$, en cuyo caso el desfase que aporta cada capacitancia es $-\pi/n$. Si n es grande el ángulo de desfase será pequeño.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n\phi = \lim_{n \rightarrow \infty} (n \arctan \frac{2\pi\tau}{\tau_0}) = - \frac{2\pi n \tau}{\tau_0} \quad (49)$$

En la ecuación (49) se está indicando que para una cantidad suficientemente grande de capacitancias aisladas con constante de tiempo τ , el proceso se comporta como si fuese de tiempo muerto $n\tau$. Esto no se presenta para procesos con capacitancias interactuantes, puesto que siempre se comportan como una gran capacitancia y varias pequeñas, en los que la capacitancia mayor domina la respuesta. Sin embargo las capacitancias pequeñas tienden a comportarse como tiempo muerto, es decir entonces que el proceso se comportaría en conjunto como capacitivo más tiempo muerto.

FUENTE: [PDF. Instrumentación y control automático. Universidad Nacional del Cuyo.]

La figura.13. muestra respectivamente la respuesta a una señal escalón de procesos con capacitancias aisladas y de procesos con capacitancias interactuantes.

En general los procesos contienen una interacción natural. La respuesta de los procesos multicapacitivos interactuantes difiere del proceso capacitivo más tiempo muerto en que la misma comienza con una curvatura suave, lo cual está indicando que la equivalencia entre las capacitancias menores con el tiempo muerto no es exacta. Sin embargo, la aproximación que se logra es bastante aceptable y el modelo permite ser ajustado variando la relación td / τ_i .

Respuesta de procesos multicapacitivos interactuantes

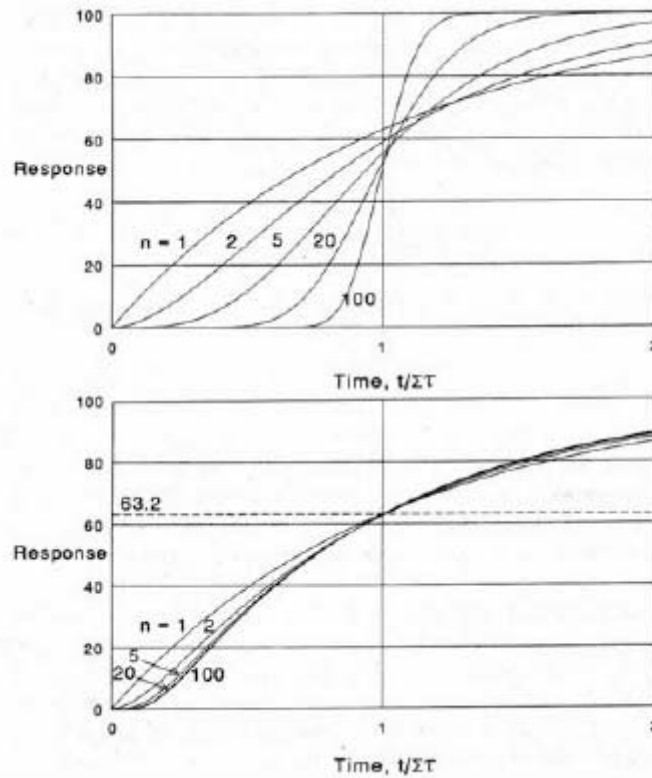


Figura.13

Esta gráfica muestra el tipo de respuesta de los procesos multicapacitivos interactuantes, difiere de los procesos capacitivos y el tiempo muerto de respuesta, la curvatura indica la equivalencia entre las capacitancias menores con el tiempo muerto.

FUENTE:[PDF.Instrumentacion y control automatico. Universidad del Cuyo].

El periodo natural del lazo puede ser estimado con precisión tomando en cuenta donde la máxima pendiente le de respuesta corta el eje de las abscisas, esta interacción identifica el tiempo muerto efectivo del proceso. El tiempo muerto efectivo más la constante de tiempo efectiva debe ser igual al retardo total del proceso

$$td + \tau_1 = \tau \frac{n^2 + n}{2} \quad (50)$$



Los componentes de un lazo de control contienen elementos dinámicos que almacenan energía. El intercambio de energía entre los elementos dinámicos de cualquier sistema físico produce oscilaciones. Las oscilaciones permanentes se caracterizan por la aplicación en forma periódica de fuerzas en fase con el efecto de la última fuerza aplicada.

Para mantener el periodo de oscilación constante en un lazo de control la señal senoidal que recorre el mismo deberá tener un desfase de 360° . La realimentación negativa como tal introduce un desfase de 180° , de manera que para el caso en que el lazo deba oscilar en forma permanente, todos los elementos que participan del mismo deberán contribuir con un desfase adicional de 180° . Un lazo de control es la unidad básica de control de un proceso, en el lazo de control se encuentra tanto un elemento primario de medición, elemento secundario de medición o transmisor de señal, un receptor y un elemento final de control.

Todo lazo de control dispone de un periodo característico al cual oscila y es denominado período natural. Cualquier perturbación que contenga componentes cercanas al período y estén dadas las condiciones de oscilación, hará que el lazo oscile a su período natural.

El período natural de cualquier lazo de control, depende de la combinación de los elementos dinámicos que posee el lazo. Se puede decir que:

- Si los elementos dinámicos que integran el lazo de control son conocidos, podremos determinar el período natural.
- Si no se conocen los elementos dinámicos, podremos determinarlos midiendo el periodo natural.

Que los elementos del lazo produzcan en conjunto un desfase de 180° es condición necesaria pero no suficiente para que las oscilaciones sean mantenidas.

Puede demostrarse que la respuesta a una entrada sinusoidal

$$u(t) = A(\text{sen}wt) \quad (51)$$

De un bloque cuya función de transferencia $G(s)$ es lineal es

$$x(t) = kA\text{sen}(wt + \emptyset) \quad (52)$$

Donde:

A = es la amplitud w = el período

k = la ganancia $\emptyset$ = el desfase

La Ganancia se define como:

$$k = \text{amplitud de la señal de salida} / \text{amplitud de la señal de entrada}$$

El desfase se define como:

$$\emptyset = \text{fase de señal de salida} - \text{fase señal de entrada}$$

En el modo de control de lazo cerrado o (feedback), la variable controlada se mide constantemente y se compara con el valor de referencia. Si se produce desviación entre ambos valores se aplica una acción correctora al elemento final de control para retornar la variable controlada al valor deseado. Equivale a tener el controlado en modo automático.

De este modo se puede expresar la función de transferencia de lazo cerrado en función de las ganancias del proceso y del controlador, siendo la ganancia de lazo cerrado

$$k = \frac{k_p k_c}{1 + k_p k_c} \quad (53)$$

Donde: k_p Es la ganancia del proceso.

k_c Es la ganancia del controlador

Para la ganancia de lazo abierto es:

$$k = k_p k_c \quad (54)$$

Las condiciones que los elementos de un lazo de control deben reunir en conjunto, para que el sistema oscile en forma permanente son:

- Desfase de 180°
- Ganancia de lazo abierto igual a la unidad

Los procesos en su mayoría disponen de varios elementos dinámicos por lo general capacitivos y rara vez inductivos, que se combinan con elementos resistivos. A los elementos dinámicos, se suma otro elemento que no pueden ser considerado como tal, pero que influye notablemente en los lazos de control. Este es el denominado tiempo muerto cuya dimensión es simplemente el tiempo. En los sistemas físicos, no es posible transferir la energía entre dos elementos dinámicos en tiempo cero. El tiempo muerto es el tiempo requerido para la función de transferencia.

En un proceso a la acción de un controlador proporcional, el cual no posee elementos dinámicos. Un controlador manipulara la apertura de la válvula para mantener la variable controlada en el valor consigna y responde a la expresión:

$$m(t) = \frac{100}{P} e(t) + b \quad (55)$$

Donde

$m(t)$ = La variable manipulada

$e(t)$ = El error

$100/p = kc$ = Es la ganancia del controlador

b = La polarizacion o bias

La ganancia del controlador esta en función de p , que se denomina banda proporcional. Se agrega además la polarizacion b , que representa el valor que toma la variable manipulada $m(t)$ cuando el error es cero, es decir cuando la variable controlada $c(t)$ coincide con el valor de consigna. Siendo esta nomenclatura que se utiliza normalmente en control de procesos industriales.

Siendo el controlador proporcional un componente estático en el lazo de control, su desfase es: $\emptyset = 0^\circ$. Por ello se tendrán oscilaciones permanentes si el proceso produce un desfase de 180° , es decir

$$AP = -180 = -\pi$$

Esto significa que un lazo de control en un proceso de tiempo muerto puro controlado por un controlador proporcional, tendrá un periodo natural que duplica el valor del tiempo.

Las oscilaciones serán mantenidas, si además la ganancia de lazo abierto es unitaria. Como se muestra continuación en la figura.14.

$$K = k_p k_c = 1 * \frac{100}{p} = 1 \quad (56)$$

Comportamiento de tiempo muerto por un controlador proporcional.

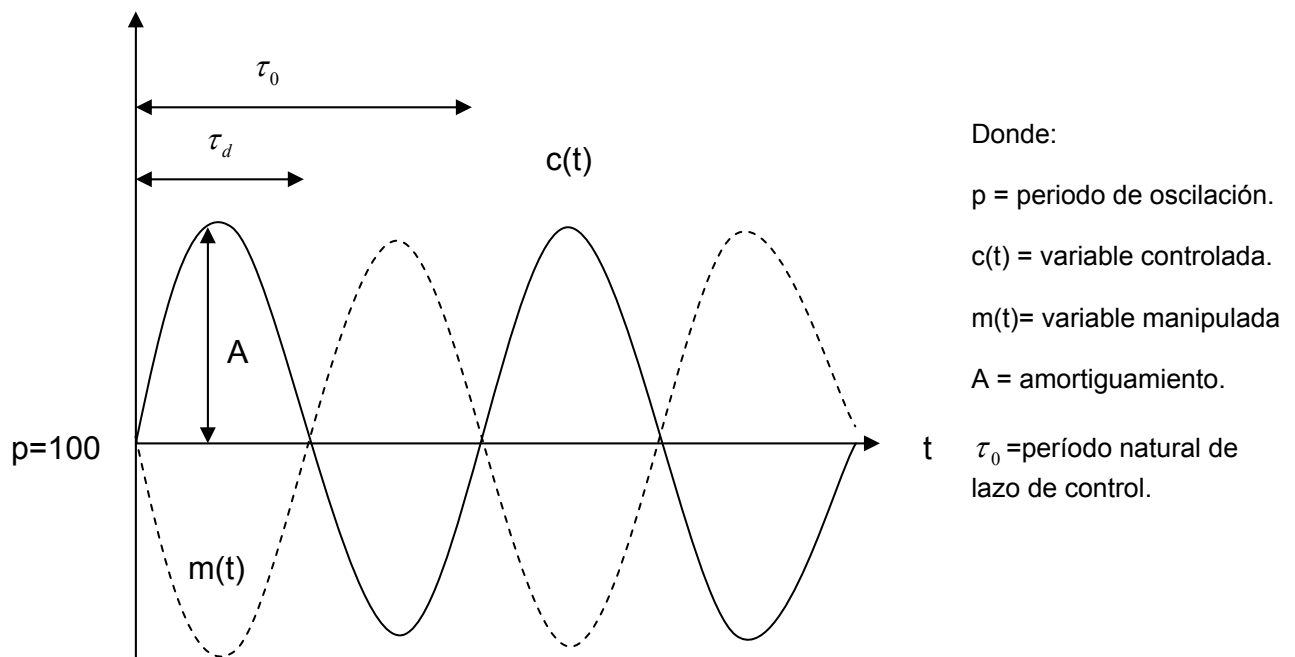


Figura.14.

Esta gráfica muestra el tipo de respuesta en un proceso bajo la acción de un controlador proporcional, manejando un periodo de banda proporcional, donde se muestra el comportamiento de la variable tanto controlada y manipulada.

En el control de procesos, lo deseable es obtener oscilaciones amortiguadas. Existe un amortiguamiento óptimo que es el denominado amortiguamiento de $\frac{1}{4}$ de amplitud, en el que la amplitud de la señal senosoidal disminuye su valor en cada periodo a $\frac{1}{4}$ de su valor anterior. Para lograr este grado de amortiguamiento, la ganancia de lazo abierto debe ser de $\frac{1}{2}$ para lo cual deberá duplicarse la banda proporcional del controlador.

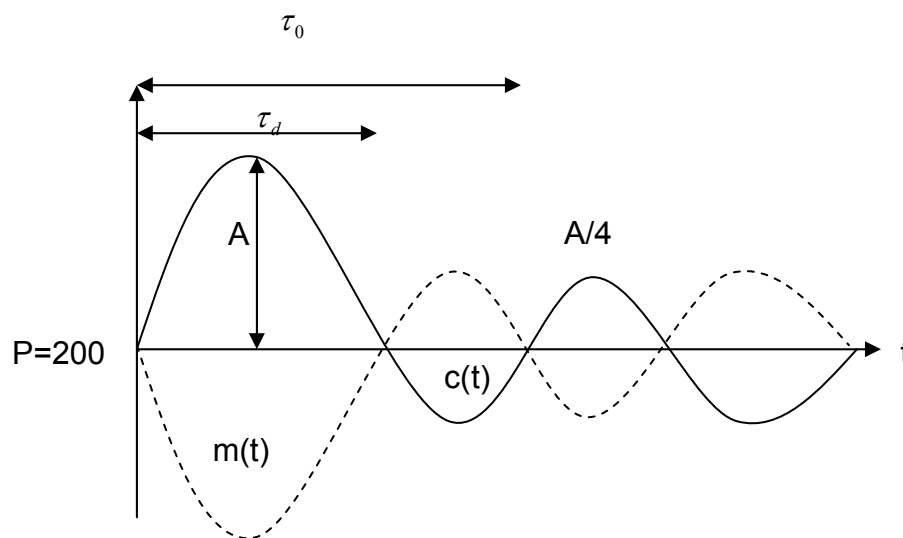


Figura.15. Amortiguamiento de $\frac{1}{4}$ de amplitud.

Los controladores únicamente proporcionales manejan un ajuste en el cual tienen la ventaja que solo cuentan con un parámetro de ajuste, k , sin embargo, tienen de una gran desventaja: operan con una desviación, o error de estado estacionario en la variable que se controla.

Cuando se produce una perturbación y varía la variable controlada, alejándose del valor de consigna o parámetro de ajuste, se produce un error y el controlador manipula la variable $m(t)$ de modo de corregir la desviación de $c(t)$. La variable controlada se estabiliza para un tiempo $t = \infty$ en un valor diferente al de referencia, y esta diferencia es lo que se denomina error de estado estacionario u offset. El offset se produce exclusivamente por la característica estática del controlador proporcional.

Debido a que el controlador proporcional es estático, solamente responde a los cambios instantáneos del error.

$$e = \frac{p[m(t) - b]}{100} \quad (57)$$

Donde: b = polarización o bias, $m(t)$ = variable manipulada, p = periodo de oscilación, e = error.

1.7 Banda proporcional

A continuación se presenta una definición de banda proporcional: la banda proporcional se refiere al error (expresado en el porcentaje de rango de la variable que se controla) que se requiere para llevar la salida del controlador del valor más bajo hasta el valor más alto.

Cuando el proceso exige una banda proporcional alta, el controlador proporcional, presenta en general un error de offset inaceptado, de allí que deba recurrirse a otro modo de control, tal como el integral que responde a una expresión como

$$m(t) = \frac{1}{R} \int e(t) dt \quad (58)$$

Donde: $m(t)$ = variable manipulada, $e(t)$ = error en función del tiempo.

R = tiempo integral.

Si a la entrada del controlador integral le aplicamos un error sinusoidal

$$e(t) = A \sin 2\pi \frac{t}{\tau_0} \quad (59)$$

Donde: A = amortiguamiento, τ_0 = período natural de lazo de control.

t = tiempo.



Se tendrá

$$m(t) = \frac{A\tau_0}{2\pi R} \left(-\cos 2\pi \frac{t}{\tau_0} \right) + m_0 \quad (60)$$

Siendo

$$-\cos x = \sin \left(-\frac{\pi}{2} + x \right) \quad (61)$$

Luego

$$m(t) = \frac{A\tau_0}{2\pi R} \sin \left(-\frac{\pi}{2} + 2\pi \frac{t}{\tau_0} \right) + m_0 \quad (62)$$

El desfase del controlador integral es:

$$\varnothing_c = -\frac{\pi}{2} + \frac{2\pi t}{\tau_0} - \frac{2\pi t}{\tau_0} = -\frac{\pi}{2} \quad (63)$$

Lo cual está indicado que el controlador integral produce un atraso de fase de 90°

La ganancia del controlador integral es

$$k_c = \frac{A\tau_0 / 2\pi R}{A} = \frac{\tau_0}{2\pi R} \quad (64)$$



En oscilación permanente, para un proceso de tiempo muerto y controlador integral, la suma de los desfases del controlador y el proceso será

$$-\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi t_d}{\tau_0} = -\pi \quad (65)$$

De donde

$$\frac{2\pi t_d}{\tau_0} = \frac{\pi}{2} \quad (66)$$

Luego

$$\tau_0 = 4t_d \quad (67)$$

Esta ultima expresión nos muestra que el periodo natural de una planta de tiempo muerto controlada por un controlador integral es el doble del que se obtuvo bajo un control proporcional, se puede decir que el periodo natural de oscilación del lazo es mas lento que con el uso de un controlador de tipo proporcional. El lazo de control se ha vuelto más lento pero el controlador integral elimina el error de offset.

FUENTE:[PDF. Instrumentación y control automatico. Universidad nacional del cuyo].

De manera general dentro del estudio del proceso capacitivo puro o integrador puro nos permite tener un amplio esquema acerca del funcionamiento y comportamiento que tienen tanto el sistema de control involucrado para este tipo de proceso y con el sistema dinámico que esta ampliamente relacionado.



1.8 Aproximaciones de Pade.

El estudio analítico o por simulación de los sistemas de control realimentado, involucra normalmente la manipulación de las funciones de transferencia de los dispositivos que lo componen, como lo son el controlador, el proceso controlado y los instrumentos de medición y actuación.

Las aproximaciones de Pade para tiempo muerto, son de las más populares en los estudios de control. Las aproximaciones de Pade se han desarrollado para permitir $e^{-\alpha s}$ para poder ser representado por el cociente de orden inferior polinomial en s . La forma general de representar una aproximación de Pade es la siguiente:

$$e^{-\alpha s} \cong \frac{a_p (\alpha s)^p + a_{p-1} (\alpha s)^{p-1} + \dots + a_0}{b_q (\alpha s)^q + b_{q-1} (\alpha s)^{q-1} + \dots + b_0} \quad (68)$$

Donde el orden de los polinomios, p y q , así como los coeficientes a_i, b_j se eligen para poder tener la expansión de serie de energía para el coeficiente polinomial en la ecuación anterior. Recordando que una extensión de la serie de Taylor de $e^{-\alpha s}$ es:

$$e^{-\alpha s} = 1 - \alpha s + \frac{(\alpha s)^2}{2!} - \frac{(\alpha s)^3}{3!} + \dots \quad (69)$$

Sin embargo una gran cantidad de términos se requieren para dar una buena aproximación, conduciendo así mismo a los sistemas de alto orden.

Una mejor aproximación usada es la ecuación (68), la cual conserva términos relativamente de orden inferior, pero que se pueden hacer equivalentes a los términos en la ecuación (69). Los coeficientes del sistema a_i, b_j los cuales causan que las ecuaciones (68 y 69) sean equivalentes para un máximo número de términos de la ecuación (69) (para un orden específico p, q) a esto se le llama aproximación de Pade.

Las aproximaciones posibles comúnmente empleadas son: las de primero, segundo y tercer orden, aunque a veces se emplean algunas de mayor orden.

La aproximación de Pade de primer orden ($p=q=1$) (valido hasta $|\alpha s| \sim 1$) es definido como:

$$e^{-\alpha s} \approx \frac{1 - \frac{\alpha}{2}s}{1 + \frac{\alpha}{2}s} \quad (70)$$

De manera similar, la aproximación de segundo orden ($p=q=2$) (valido hasta $|\alpha s| \sim 2$) es definido como:

$$e^{-\alpha s} \approx \frac{1 - \frac{\alpha}{2}s + \frac{\alpha^2}{12}s^2}{1 + \frac{\alpha}{2}s + \frac{\alpha^2}{12}s^2}; \quad (71)$$

Y la aproximación de tercer orden ($p=q=3$) (valido hasta $|\alpha s| \sim 3$) es definido como:

$$e^{-\alpha s} \approx \frac{1 - \frac{\alpha}{2}s + \frac{\alpha^2}{10}s^2 - \frac{\alpha^3}{120}s^3}{1 + \frac{\alpha}{2}s + \frac{\alpha^2}{10}s^2 + \frac{\alpha^3}{120}s^3} \quad (72)$$

Obviamente las aproximaciones de Pade de un orden más alto pueden ser utilizadas, de igual forma es de esperar que una aproximación de un orden más alto, se obtiene una mejor aproximación. Los pasos de respuesta del primero, segundo y tercer orden de las aproximaciones de Pade, se pueden contemplar en la figura 16, que se muestra a continuación. Observe que el numero de ceros del plano, a la mitad aumenta con el orden de la aproximación, de modo que el retraso de tiempo, viene siendo aproximado por muchos ceros RHP.

La frecuencia de respuesta de las aproximaciones de Pade son ilustradas por un diagrama de Bode en la figura 17. Observe que el cociente de la amplitud de Pade es siempre exacto, solamente el cociente de la fase de la Aproximación de Pade en frecuencias más altas.

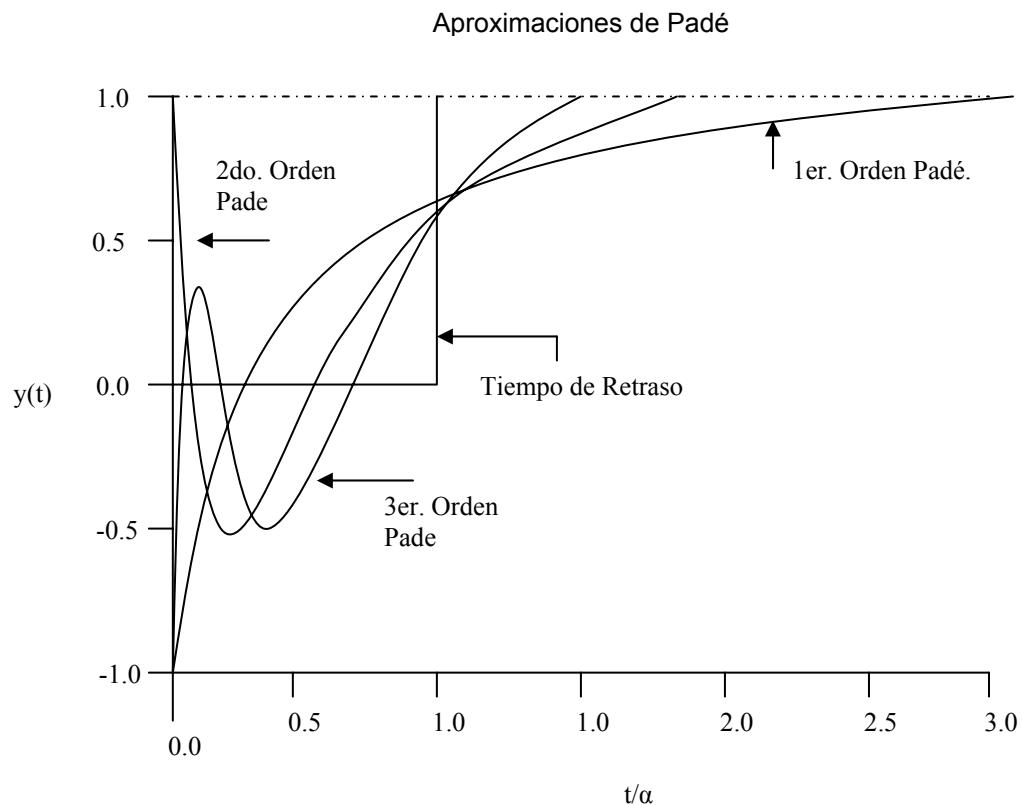


Figura.16.

Unidad de paso de respuesta de un retraso de tiempo puro, usando, primero, segundo y tercer orden de aproximaciones de Pade.

FUENTE: [Babatunde A. Ogunnaike. W. Hanner Ray. "Process Dynamics, Modeling and Control.].

Diagrama de Bodé.

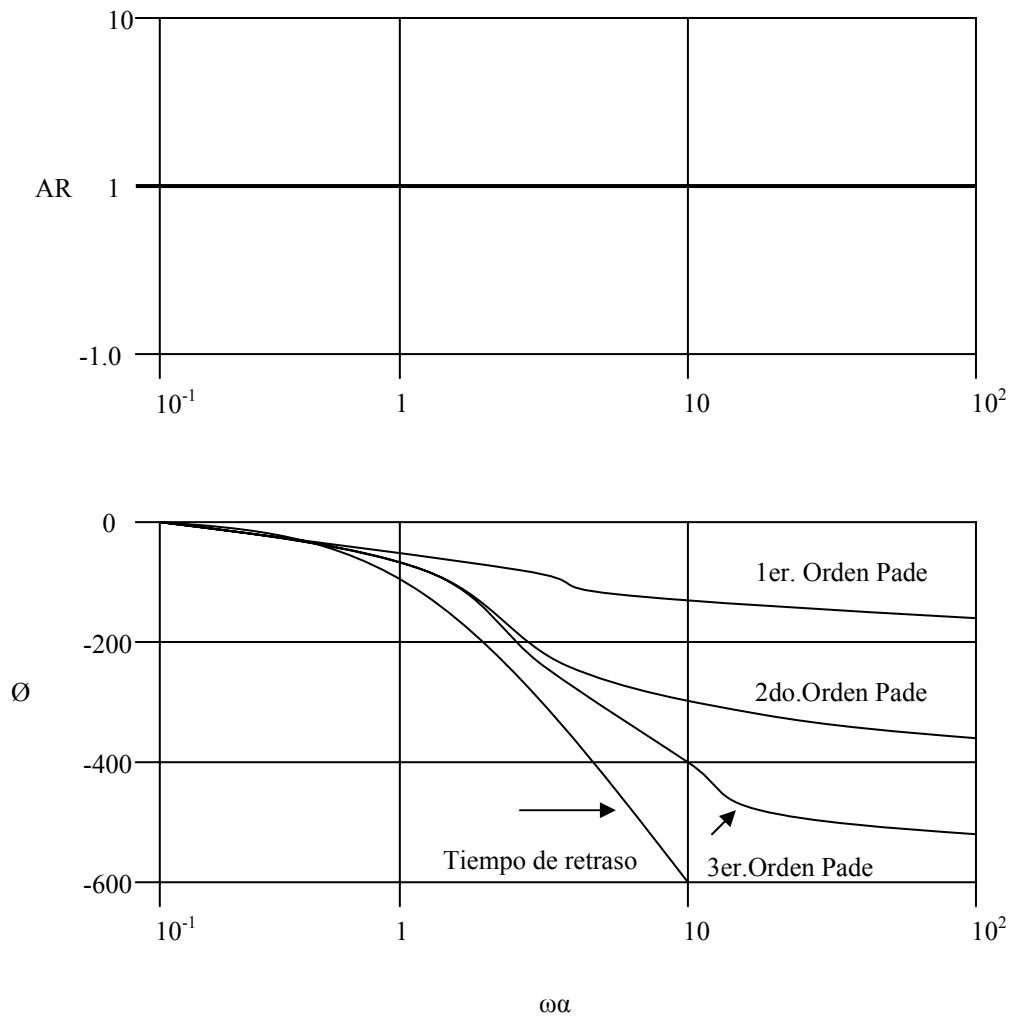


Figura.17.

Respuesta de Frecuencia de un retraso de tiempo puro, y el primero, segundo y tercer orden de aproximaciones de Pade.

FUENTE:[Babatunde. A. Ogunnaike. W. Hannen Ray. "Process dynamics Modeling and control].

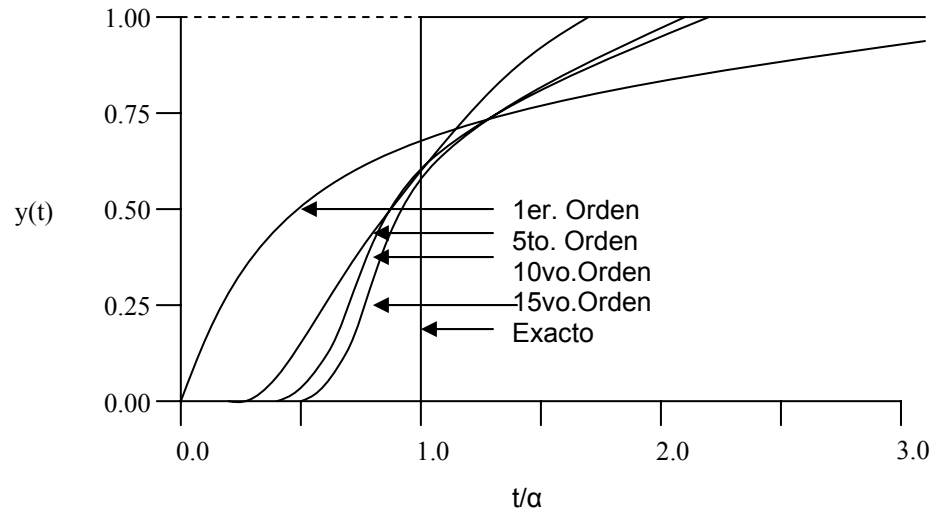


Figura.18.

Unidad de paso de Respuesta de un tiempo de retraso puro usando el sistema de N primeros ordenes de aproximación.

FUENTE:[Babatunde. A. Ogunnaike. W. Hanner Ray. "Process dynamics Modeling and control].

Por lo tanto es razonable aproximar el retraso por un número infinito de procesos de primer orden utilizando la siguiente ecuación:

$$e^{-\alpha s} \cong \frac{1}{\left(\frac{\alpha s}{N} + 1\right)^N} \quad (73)$$

El paso de respuesta de la ecuación (73) es mostrado en la figura 18. Para N y hasta 15vo. orden. Observando que el retraso de la fase se puede emparejar razonablemente bien pero el cociente de la amplitud falla gravemente en los de alta frecuencia. En general la aproximación de Pade da resultados muchos mejores para el mismo orden de modelo para la aproximación de sistemas de mayor orden.



Un tanque de agua “acumula” la entrada neta (flujo), que es positiva cuando el flujo de entrada supera al de salida. La acumulación es negativa cuando el flujo de salida es mayor al de entrada, sin embargo el término sigue siendo aplicable.

El tanque de agua nos proporciona un modelo muy sencillo de un sistema dinámico básico, este es conocido como integrador. Se puede referir a un sistema dinámico como un acumulador.

Un sistema dinámico es aquel en el cual los efectos actuales (salidas) son el resultado de causas actuales y previas (entradas). En esta definición se introduce la noción de causa y efecto que muchas veces se utiliza para describir los fenómenos de ingeniería. El modelado y comportamiento del proceso capacitivo puro o integrador puro se puede llevar a cabo con el prototipo desarrollado en este trabajo específicamente a nivel laboratorio y para poder manejar los modelos y fenómenos suscitados para este proceso en especial. Para poder comprender el comportamiento que tiene un proceso capacitivo puro o integrador puro, es importante realizar, una simulación de dicho proceso por medio de un software matemático llamado Matlab, básicamente Matlab es un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones totalmente integrado, está orientado en donde se encuentren implicados cálculos matemáticos y la visualización de los mismos. Matlab es un sistema interactivo que opera como una matriz que no requiere de dimensionamiento.



Esto permite resolver distintos problemas numéricos en una fracción de tiempo menor al que le tomaría el escribir un programa en algún lenguaje de programación. Además entre otra cualidad, le permite ser un lenguaje de programación amigable con el usuario con características mucho mas avanzadas y más fáciles de utilizar que en los lenguajes como Fortran o Basic. Matlab integra análisis numérico, cálculo matricial, visualización gráfica en un entorno muy completo donde los problemas y las soluciones son expresados del mismo modo en que se escribirían matemáticamente.

Es importante realizar la simulación, de las funciones de transferencia que presentan cada tipo de respuesta que presentan los diferentes sistemas, en especial para sistemas de primer y segundo orden empleados para este prototipo de Dinámica y Control de Procesos.

1.9 Simulación en Matlab de sistemas tipo capacitivo puro.

En esta sección se presenta el enfoque computacional para el análisis de una respuesta transitoria con MATLAB, con frecuencia se usan respuestas transitorias tales como las escalón, impulso y rampa, para investigar las características en el dominio del tiempo de los sistemas de control. Dependiendo del numero de entradas y salidas en el sistema analizado.

Este programa en Matlab es diseñado en base a la función de transferencia, del sistema tipo capacitivo puro para una respuesta de tipo escalón unitario.

```
>> 'programa para sistema tipo capacitivo puro';
```

```
>> 'respuesta de un sistema escalón unitario';
```

```
>> A = [-1 -1; 6.5 0];
```

```
>> B = [1 1; 1 0];
```

```
>> C = [1 0; 0 1];
```

```
>> D = [0 0; 0 0];
```

```
>> step ( A, B, C, D);
```

```
>> end.
```

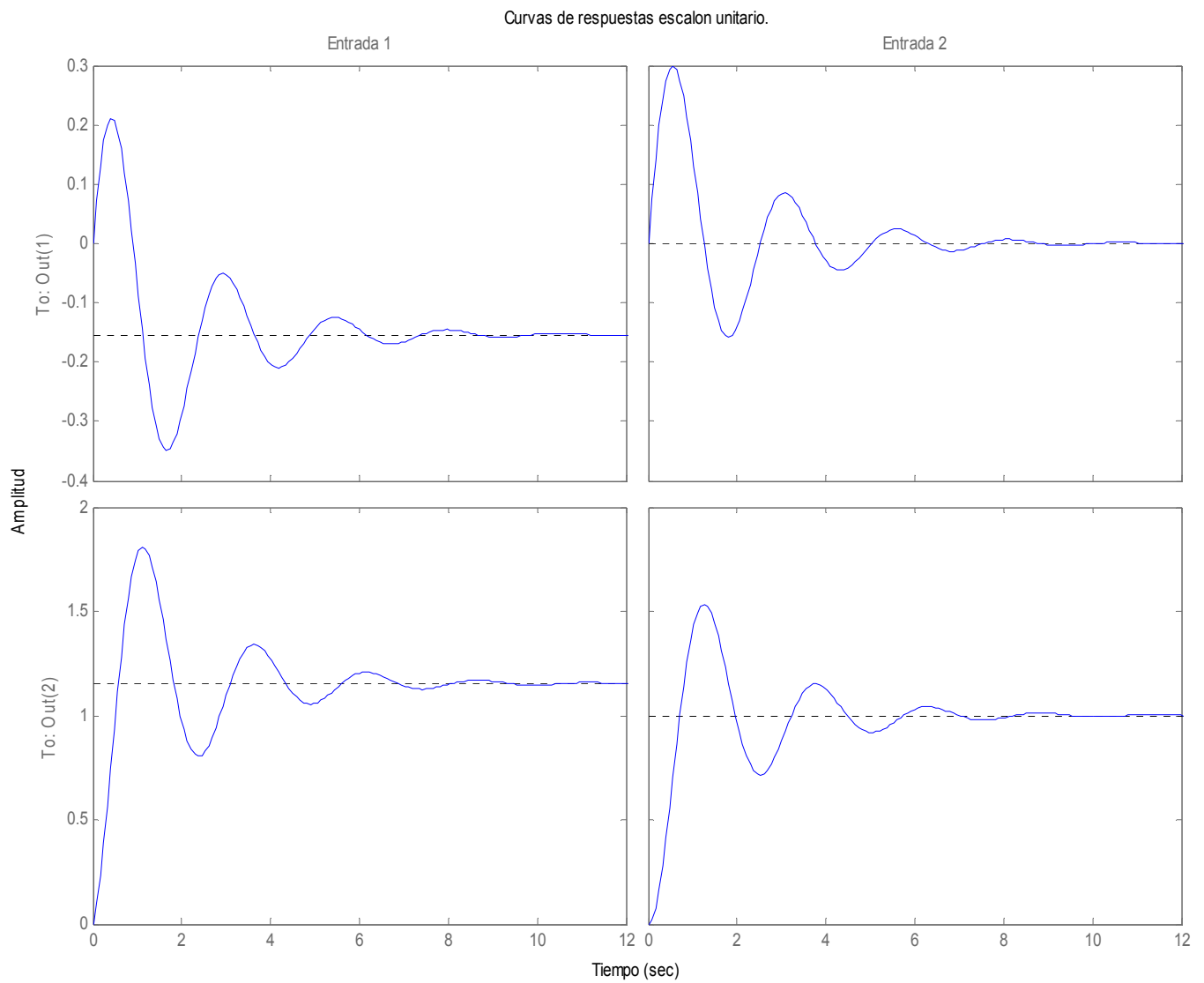


Figura. 19. Curvas de respuestas escalón unitario.

FUENTE:[MATLAB 7.1 R12].



La respuesta impulso unitario de un sistema de control se obtiene mediante algunos de los siguientes comandos de MATLAB:

`impulse (num,den)`

`impulse(A, B, C, D)`

El comando “`impulse (num,den)`” gráfica la respuesta impulso unitario en la pantalla. El comando “`impulse (A, B, C, D)`” produce una serie de gráficas de respuesta impulso unitario, una para cada combinación de entrada y salida del sistema con el vector de tiempo determinado automáticamente.

Este programa en Matlab es diseñado en base a la función de transferencia, del sistema tipo capacitivo puro para una respuesta de tipo impulso unitario.

```
>> 'programa para sistema tipo capacitivo puro';
```

```
>> 'sistema de respuesta impulso unitario';
```

```
>> A = [0 1;-1 -1];
```

```
>>B = [0; 1];
```

```
>>C = [1 0];
```

```
>>D = [0];
```

```
>>impulse (A, B, C, D);
```

```
>>end.
```

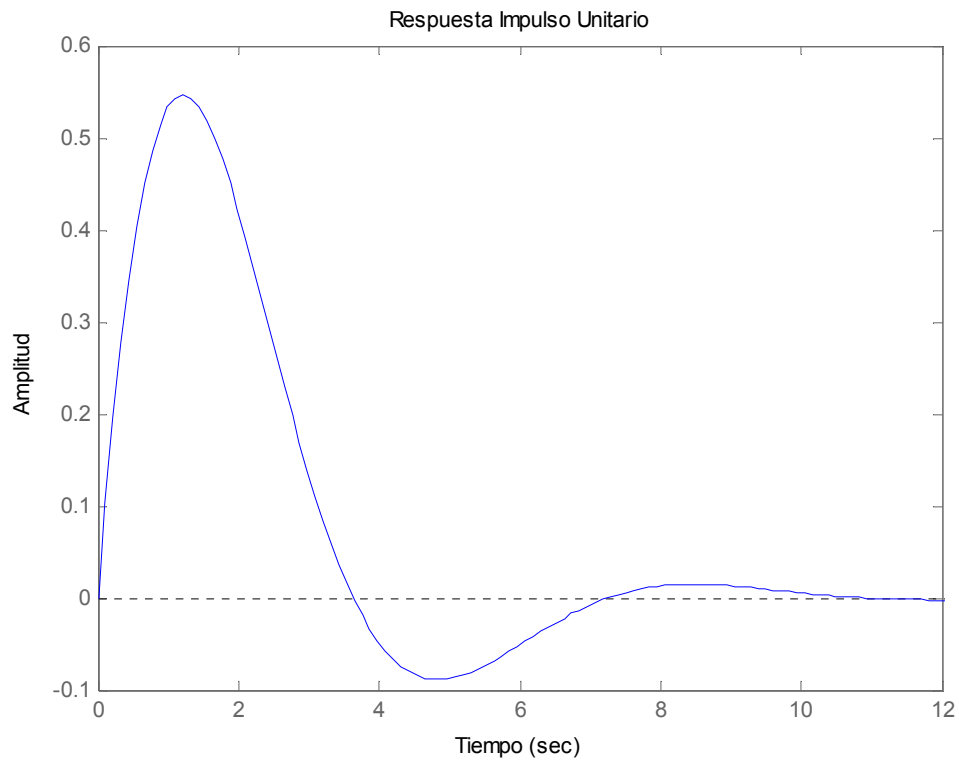


Figura. 20. Curva de respuesta impulso unitario.

FUENTE: [MATLAB 7.1 R12].

Como no hay un comando en MATLAB con el que se permita identificar la respuesta rampa de un sistema de control, se necesita por lo tanto usar el comando `step` para poder obtener la respuesta tipo rampa, tomando en cuenta la función de transferencia.



Este programa en Matlab es diseñado en base a la función de transferencia, del sistema tipo capacitivo puro para una respuesta de tipo rampa.

```
>> 'programa de sistema tipo capacitivo puro';  
>> 'respuesta de un sistema tipo rampa';  
>> num [0 0 0 11];  
>> den [1 1 1 01];  
>> step(num, den);  
>> end.
```

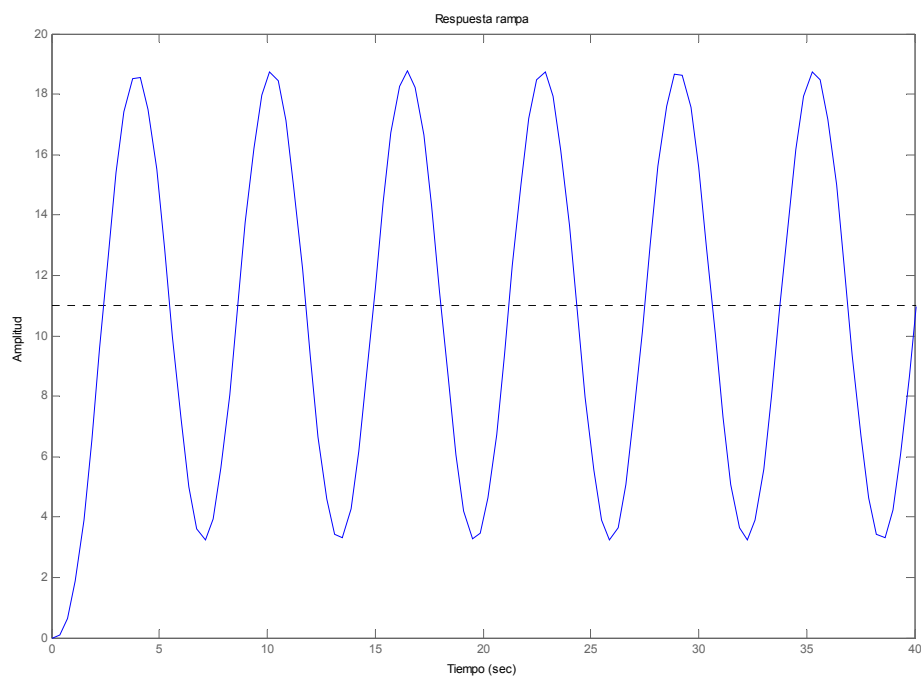


Figura. 21. Curva de respuesta tipo rampa.

FUENTE: [MATLAB 7.1 R12].



II. PROCESO DE RETRASO LINEAL.



2. Sistema estático.

Un sistema estático es aquel en el que los efectos actuales (salida) dependen solo de las causas actuales (entradas). En virtud de esta definición, un sistema cuya salida cambia con el tiempo puede describirse como estático, siempre y cuando las entradas cambien asimismo de manera correspondiente. La escala de tiempo en la que se perciben los sistemas puede provocar una gran diferencia. Dado cualquier sistema, es posible elegir una medición de tiempo lo bastante pequeña como para que el retardo inherente entre la entrada y la salida se convierta en algo apreciable, haciendo por tanto que el sistema aparente sea dinámico. La elección de una escala de tiempo depende de los objetivos de investigación del sistema.

Existen sistemas de bajo orden con un nivel de complejidad que involucran aquellos sistemas modelados por ecuaciones diferenciales lineales de alto orden. Tales sistemas se caracterizan por su función de transferencia en el que el denominador polinomial es de un orden más o menos alto. Hay todavía otra clase de sistemas “sistemas con retardo de tiempo” clasificado también de alto orden.

El retraso lineal presenta las siguientes características:

- Las puertas reales tienen retrasos de propagación intrínsecos
- Las puertas reales tienen una impedancia de salida infinita.

2.1 Retraso de primer orden

Elemento de retraso de primer orden (elemento de la constante de tiempo)

Un elemento de demora o retraso de primer orden se puede ilustrar por medio del nivel del líquido dentro de un tanque, en donde el flujo que sale del mismo se supone proporcional al nivel del tanque. La dinámica de este proceso se describe por medio de las expresiones:

$$CL = (dh/dt) = f_1 - f_2 \quad \text{y} \quad f_2 = h / RL \quad (74)$$

Por lo tanto,

$$RL \frac{dh}{dt} + h = RL f_1$$

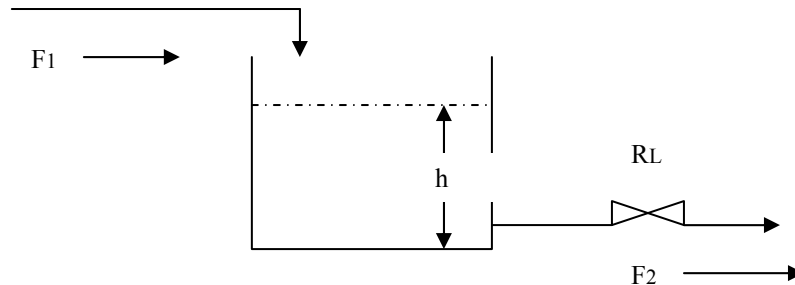


Figura.22.
Retraso de primer orden, elemento de flujo líquido.

Este retardo se denomina también retardo de constante de tiempo, retardo RC, retardo exponencial, retardo simple, retardo lineal individual y de muchas otras formas.

Su pendiente en cualquier punto es tal que alcanzaría el valor final en un tiempo llamado «constante de tiempo». En una constante de tiempo en realidad se llega al 63% del camino.

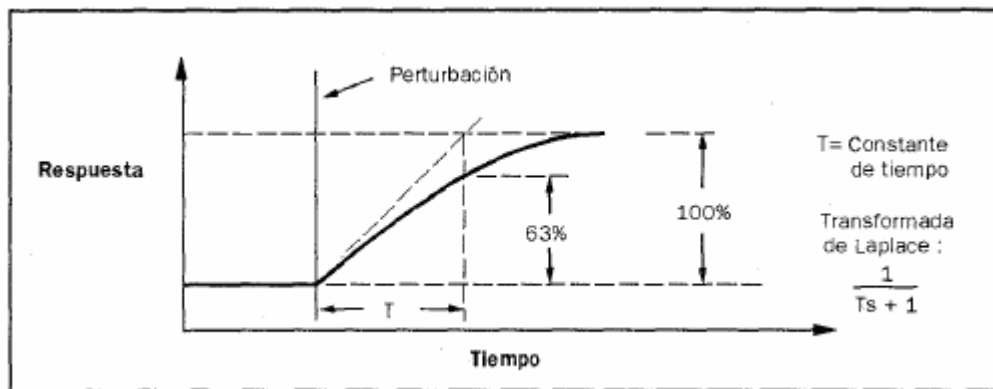


Figura.23

Respuesta de un sistema de primer orden.

FUENTE: [PDF. Instrumentación y control automatico. Universidad nacional del cuyo].

Una forma de representar la cantidad de tiempo de retardo de un lazo de control es considerar los procesos dinámicos (integral y de retardo) o los atrasos de primer orden y los tiempos muertos en el lazo. El tiempo muerto o retardo es un fenómeno común que ha caracterizado el comportamiento de algunos procesos.



En esencia todos los procesos físicos conllevan alguna demora de tiempo pura o de transporte entre la entrada y la salida. Un retardo de tiempo sencillo, esto es, un retardo de primer orden, se representa por el modelo de estado o función de transferencia de primer orden

$$G(s) = 1 / Ts + 1; \quad (75)$$

T = constante de tiempo (retardo de primer orden).

En general los procesos dinámicos (integrales) de orden superior se pueden ver en términos del número equivalente de procesos de primer orden. De esta manera el retardo de tiempo es inherente a la mayor parte del comportamiento de un sistema dinámico, y la propagación de la señal a través de un retardo de tiempo es demorada en el sentido de que se requiere un tiempo finito (varias constantes de tiempo) para que la salida de un retardo de primer orden llegue a su valor completo para una entrada determinada.

2.2 Sistemas en serie dos primeros – ordenes.

Considerando la situación en que dos líquidos contenidos en tanques están conectados en serie, cada uno comienza del tipo de identificación. Estos sistemas pueden estar configurados en una o dos maneras. Permitiendo considerar el primero de estas configuraciones en la figura 24.

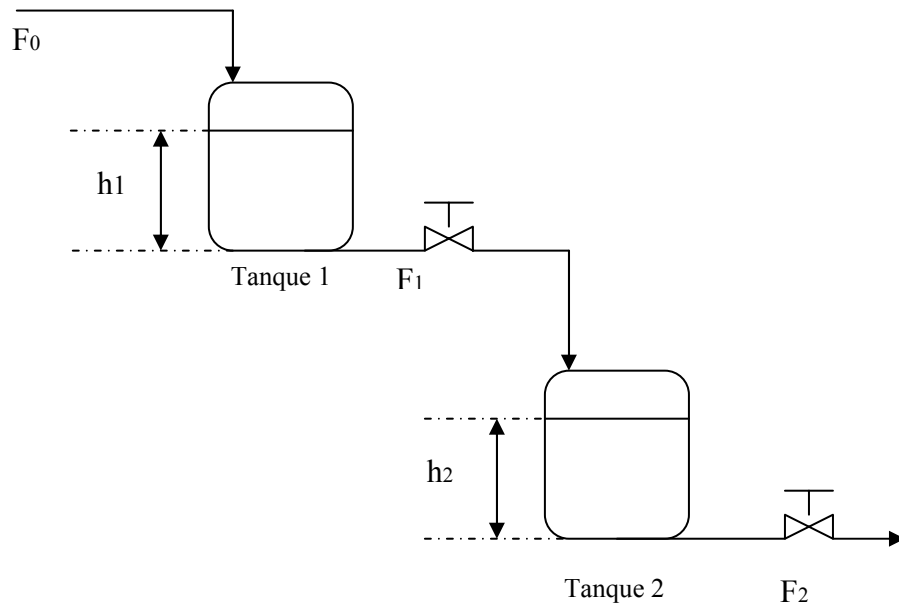


Figura. 24.

Dos tanques no interactuantes conectados en Serie.

Existe una situación en que el flujo de salida del primer tanque, descarga libremente en la atmósfera antes de entrar al segundo tanque. Por lo tanto el dato de flujo de esta corriente suele determinarse por el nivel del líquido en el primer tanque y es totalmente independiente de las condiciones del segundo tanque.

De este modo aunque las condiciones en el primer tanque, influye en las condiciones para el segundo tanque, se tiene que observar cuidadosamente que las condiciones en el segundo tanque no influyen de ninguna manera para el primer tanque.

El segundo tanque no interactúa de ninguna manera con el primero, a esto se le llama configuración de la no interacción.

Comparando el arreglo en la figura 24, con la figura 25, en este caso, el flujo de salida del primer tanque ahora depende de la diferencia entre el nivel de los dos tanques, con el resultado de variaciones en las condiciones para el segundo tanque, que va estar influenciado por las condiciones del primer tanque.

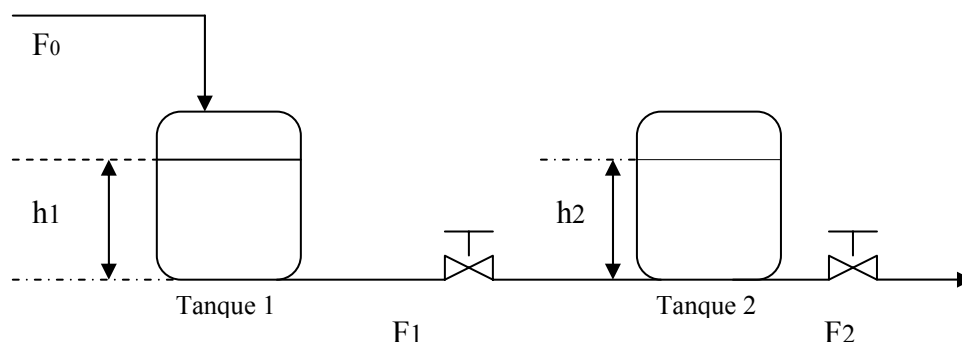


Figura. 25.
Interacción de dos tanques en Serie.

El comportamiento dinámico del conjunto de interacción, está diferenciado del comportamiento dinámico de la alternativa del arreglo de la no interacción.

2.3 Dos sistemas no interactuantes en serie.

Para simplificar, se asume una relación lineal entre el nivel del líquido y el valor del flujo por medio de un sistemas de válvulas en la salidas como se observa en la figura. 25, así de esta manera el flujo de salida es directamente proporcional al nivel del liquido. Si A_1 y A_2 representan el cruce seccional de las áreas de los tanques 1 y 2 respectivamente, entonces el seguimiento del modelo matemático se logra haciendo balances de materia para cada tanque.

- Para el primer tanque

$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = F_0 - c_1 h_1 \quad (76)$$

- Para el segundo tanque, el flujo es entregado por $F_1 = c_1 h_1 - c_2 h_2$ así de esta manera se tendrá:

$$A_2 \frac{dh}{dt} = c_1 h_1 - c_2 h_2 \quad (77)$$

Estas dos ecuaciones pueden estar arregladas y presentadas en términos de sus variables de desviación en la manera más usual, teniendo como resultado:

$$\tau_1 \frac{dy_1}{dt} = -y_1 + K_1 u \quad (78)$$

$$\tau_2 \frac{dy_2}{dt} = -y_2 + K_2 y_1 \quad (79)$$



Donde las variables de desviación están dadas por $y_1 = h_1 - h_{1s}$; $y_2 = h_2 - h_{2s}$,
y $u = F_0 - F_{0s}$.

Y los parámetros del sistema están dados por:

$$\tau_1 = \frac{A_1}{c_1} \quad ; \quad \tau_2 = \frac{A_2}{c_2} \quad (80)$$

y

$$K_1 = \frac{1}{c_1}; K_2 = \frac{c_1}{c_2} \quad (81)$$

1. Cada componente del tanque es modelado por una ecuación diferencial de primer orden; por lo tanto el proceso entero es un ensamble de dos sistemas de primer orden en serie.
2. la función de transferencia individual representada para cada uno de los componentes del tanques, es obtenida por la transformada de Laplace en las ecuaciones 72 y 73, como resultado tendremos:

$$y_1(s) = \frac{K_1}{\tau_1 s + 1} u(s) = g_1 u(s) \quad (82)$$

$$y_2(s) = \frac{K_2}{\tau_2 s + 1} y_1(s) = g_2 y_1(s) \quad (83)$$

Para este sistema nos interesa estudiar el efecto de cambios en la función de entrada F_0 , en el nivel del segundo tanque, queriendo investigar la influencia de u en y_2 . Se debe de relacionar la influencia de u en y_1 , ya que esta respuesta es de primer orden.

La ecuación diferencial encontrada para este sistema, es la única que representa el comportamiento de y_2 y su dependencia directa en u , no es indirecta su dependencia a través de una variable intermedia muy poco importante y_1 , tal modelo puede ser obtenido por eliminación de y_1 desde las ecuaciones 72 y 73. Diferenciando la ecuación 73 con respecto al tiempo y substituyendo en la ecuación 72 para el resultado de la primera derivada de y_1 quedando:

$$\tau_2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} = -\frac{dy_2}{dt} + \frac{K_2}{\tau_1} (-y_1 + K_1 u) \quad (84)$$

La ecuación diferencial de segundo orden en y_2 con u en función de la fuerza.

2.4 Modelo de función de Transferencia.

La función de transferencia representada por la composición del sistema relacionado $y_2(s)$ directamente a $u(s)$ como se muestra en la figura 20, y pudiendo ser obtenida para sustituir la ecuación 82 para y_1 en la ecuación 83, quedando como resultado:

$$y_2(s) = \frac{K_2}{\tau_2 s + 1} \frac{K_1}{\tau_1 s + 1} u(s) \quad (85)$$

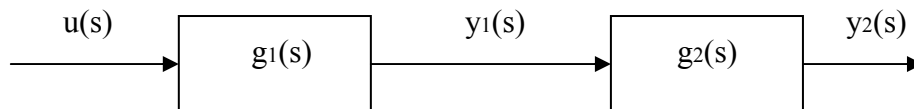


Figura. 26.

Representación de Diagrama de Bloques de dos sistemas de primer orden conectados en serie.

La función de transferencia total para este proceso es por lo tanto ahora dado por:

$$g(s) = \frac{K_1 K_2}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (86)$$

Con los siguientes parámetros:

- $K = K_1 K_2$ la combinación estabilidad – ganancia de estado.
- Dos constantes de tiempo τ_1 y τ_2 , la constante de tiempo individual de la contribución de elementos de primer orden.

La función de transferencia para este proceso tendrá dos polos ($s = -1 / \tau_1$) y ($s = -1 / \tau_2$) y no hay ceros.

2.5 Paso de unidad de respuesta de los sistemas en serie no interactuantes.

Se podrá usar la función de transferencia de la ecuación (85). obteniendo expresiones para saber como responde este sistema con varias entradas. Cuando la función de entrada es la unidad de paso de la función, el sistema responde quizás obteniendo desde:

$$y_2(s) = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \frac{1}{s} \quad (87)$$

Desde este caso $u(s) = 1/s$. sobre la función parcial de expansión es simplemente invertida ($\tau_1 \neq \tau_2$) dando como resultado:

$$y_2(t) = K \left[1 - \left(\frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_2} \right) e^{-t/\tau_1} - \left(\frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \right) e^{-t/\tau_2} \right] \quad (88)$$

En el caso especial cuando $\tau_1 = \tau_2 = \tau$.

$$y_2(s) = \frac{K}{(\tau s + 1)^2} \frac{1}{s} \quad (89)$$

Y el producto de la inversión de Laplace :

$$y_2(t) = K \left(1 - e^{-t/\tau} - \frac{t}{\tau} e^{-t/\tau} \right) \quad (90)$$

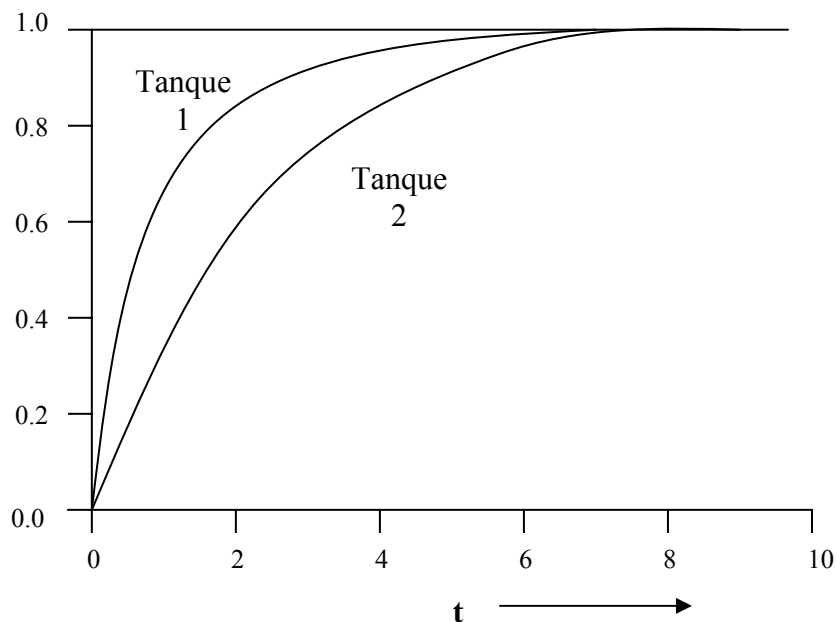


Figura. 27

Unidad de paso de respuesta del nivel del líquido
en los dos tanques del proceso.

FUENTE: [Babatunde. A. Ogunnaike. W. Hannen Ray. "Process dynamics Modeling and control"].

Los puntos más sobresalientes aproximándose a estas respuestas son:

1. Durante el sistema simple de primer orden, la respuesta es instantánea, la respuesta del segundo tanque del sistema muestra el comportamiento senoidal caracterizado por una condición inicial (en $t = 0$) seguida por un incremento en la velocidad a la aproximación final de un estado fijo.

2. En el segundo tanque la respuesta en el origen es cero, como se muestra la figura 27. Esto es debido a que la respuesta es de primer

orden. $\left. \frac{dy_2}{dt} \right|_{t=0} = 0$.

3. Cuando es obtenido por el sistema simple de primer orden, la misma medición de renuente inherente para el segundo sistema no interactuante de primer orden es obtenido por integración, tiempo de terminación, la diferencia entre la respuesta instantánea $y^* = k$ y la actual unidad de paso de respuesta quedando la siguiente ecuación.

$$J_2 = \int_0^{\infty} [y^* - y(t)] dt \quad (91)$$

$$= K \int_0^{\infty} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_2} \right) e^{-t/\tau_1} - \left(\frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \right) e^{-t/\tau_2} \right] \right\} dt$$

Que cuando es evaluado da como resultado:

$$J_2 = k(\tau_1 + \tau_2) \quad (92)$$

Que esta comparado con el único correspondiente resultado del sistema de primer orden: $J = k \tau$ cuando $A=1$. La aplicación de este resultado es la adición de anotar el sistema de primer orden con una constante de tiempo de τ_2 aumentando la inherente renuencia dentro del sistema por una cantidad directamente relacionada a esta constante de tiempo. así dos sistemas de primer orden en serie son más renuentes a un cambio de respuesta, por el mismo sistema de primer orden.

2.6 Los sistemas interactuantes.

Los balances de materia para este arreglo son mostrados a continuación.

Para el Tanque 1:
$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = F_0 - F_1 \quad (93)$$

Para el Tanque 2:
$$A_2 \frac{dh_2}{dt} = F_1 - F_2 \quad (94)$$

Asumiendo resistencia lineal, el dato de flujo de salida del segundo tanque, queda para $F_2 = C_2 h_2$, pero ahora F_1 esta dada por:

$$F_1 = C_1 (h_1 - h_2) \quad (95)$$

Para el caso de la no interacción, si se introduce ahora la misma constante y estas ecuaciones quedan explicitas en términos de la desviación usual de variables, utilizando transformadas de Laplace y reordenando el resultado de la expresión nos dará seguimiento al modelo de la función de transferencia

$$y_2(s) = \frac{K}{\tau_1 \tau_2 s^2 + (\tau_1 + \tau_2 + K_2 \tau_1) s + 1} u(s) \quad (96)$$

Observando ahora la diferencia entre la función de transferencia para el caso de la no interacción (dada en la ecuación 85) y el único indicado en la ecuación (96) para el caso de la interacción estando en presencia de los términos $K_2\tau_1$ en el coeficiente de s en el denominador polinomial en la ecuación (96) en estado fijo K_2 . Esta aproximación indicativa de la interacción del segundo tanque con el primer tanque (vía constante de tiempo τ_1).

2.7 Sistemas de segundo orden.

Un sistema de segundo orden, el comportamiento dinámico es representado por una ecuación diferencial de segundo orden:

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = bu(t) \quad (97)$$

Donde $y(t)$ y $u(t)$ son respectivamente las salidas del sistema y las entradas son variables. De la misma forma los parámetros característicos del sistema serán más comunes. En este caso la forma estándar será:

$$\tau^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + 2\zeta\tau \frac{dy}{dt} + y = Ku(t) \quad (98)$$

Y los nuevos parámetros introducidos son dados para ($a_0 \neq 0$) para:

$$\tau = \sqrt{\frac{a_2}{a_0}}; \quad 2\zeta\tau = \frac{a_1}{a_0}; \quad K = \frac{b}{a_0}$$

Asumiendo que el modelo de la ecuación anterior, esta en términos de las variables, la transformada de Laplace y el cambio subsecuente da el modelo de función de transferencia:

$$y(s) = \frac{K}{\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1} u(s) \quad (99)$$

De modo que la función general de transferencia para un sistema de segundo orden queda:

$$g(s) = \frac{K}{\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1} \quad (100)$$

Observe que mientras la función de transferencia de un sistema de primer orden, tiene un denominador polinomial de primer orden, la función de transferencia de segundo orden también presenta un denominador polinomial de segundo orden (es decir una ecuación cuadrática).

Características de los parámetros.

Los sistemas de segundo orden contienen tres características:

1. K , es la ganancia de estado constante.
2. ζ , es el coeficiente de humedad, y
3. τ , el periodo natural (o la frecuencia natural inversa)



Las funciones de transferencia de los sistemas de segundo orden no tiene cero, pero contiene dos polos localizados en $s = \tau_1$ y $s = \tau_2$ donde τ_1 y τ_2 son las dos raíces de la ecuación cuadrática del denominador.

2.8 Respuesta de segundo orden para sistemas de varias entradas.

La respuesta para sistemas de segundo orden a una función del paso de magnitud A obtenido de la ecuación (100). Desde $u(s) = A/s$ teniendo:

$$y(s) = \frac{K}{\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1} \frac{A}{s} \quad (101)$$

Se puede cambiar esta expresión para tener:

$$y(s) = \frac{AK / \tau^2}{s(s - \tau_1)(s - \tau_2)} \quad (102)$$

Donde τ_1 y τ_2 son las raíces de la ecuación cuadrática del denominador los polos de la función de transferencia. Ordinariamente invirtiendo la ecuación anterior, y obteniendo después una fracción parcial nos queda como resultado.

$$y(t) = A_0 + A_1 e^{\tau_1 t} + A_2 e^{\tau_2 t} \quad (103)$$

Donde A_0 , A_1 y A_2 son las constantes obtenidas durante la extensión parcial de la fracción, sin embargo los valores de las raíces τ_1 y τ_2 , se obtienen con la formula cuadrática:

$$r_1, r_2 = -\frac{\zeta}{\tau} \pm \frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\tau} \quad (104)$$

Se puede ahora observar que las raíces pueden ser verdaderas o complejas dependiendo del valor del parámetro ζ . Teniendo entonces tres diversas posibilidades de respuesta, en las cuales es posible revisar en los siguientes tres casos.

Caso 1. $0 < \zeta < 1$ (Conjugaciones Complejas) (τ_1 y τ_2)

Puede ser demostrado que para este caso, se llega a una simplificación.

$$y(t) = AK \left[1 - \frac{1}{\beta} e^{-\zeta t / \tau} \sin \left(\frac{\beta}{\tau} t + \emptyset \right) \right] \quad (105)$$

Donde: $\beta = |\zeta^2 - 1|^{1/2}$, $\emptyset = \tan^{-1}(\beta / \zeta)$

Caso 2: $(r_1 = r_2 = -1/\tau)$ raíces verdaderas iguales.

En este caso porque se tiene un par de raíces repetidas, no se puede utilizar la ecuación (103) directamente. La inversa de Laplace de la versión modificada apropiada de la ecuación (81), teniendo:

$$y(s) = \frac{AK/\tau^2}{s(s-r)^2} \quad (106)$$

Da la respuesta requerida:

$$y(t) = AK \left[1 - \left(1 + \frac{t}{\tau} \right) e^{-t/\tau} \right] \quad (107)$$

Desde entonces $r = -1/\tau$. El comportamiento del tiempo indicado por esta ecuación es un acercamiento exponencial al último valor de AK.

Caso 3: $\zeta > 1$ (r_1 y r_2 reales y verdaderas)

Con β definida en la ecuación (84), las raíces ahora se dan cerca de:

$$r_1, r_2 = -\frac{\zeta}{\tau} \pm \frac{\beta}{\tau}$$

Y la respuesta se da cerca de:

$$y(t) = AK \left[1 - e^{-\zeta t/\tau} \left(\cosh \frac{\beta}{\tau} t + \frac{\zeta}{\beta} \sinh \frac{\beta}{\tau} t \right) \right] \quad (108)$$

Donde las funciones hiperbólicas *senh*, *cosh* están definidas por:

$$\sinh \Theta \equiv \frac{1}{2}(e^{\Theta} - e^{-\Theta}) \quad (109)$$

$$\cosh \Theta \equiv \frac{1}{2}(e^{\Theta} + e^{-\Theta}) \quad (110)$$

La respuesta indicada del tiempo es otro acercamiento exponencial al último valor de *AK*. Aunque no inmediatamente de la ecuación (108), mas sin embargo, este acercamiento exponencial particular es un poco más lento que el que esta indicado en la ecuación (107). Observe ahora el comportamiento que tiene el paso de respuesta para sistemas de segundo orden.

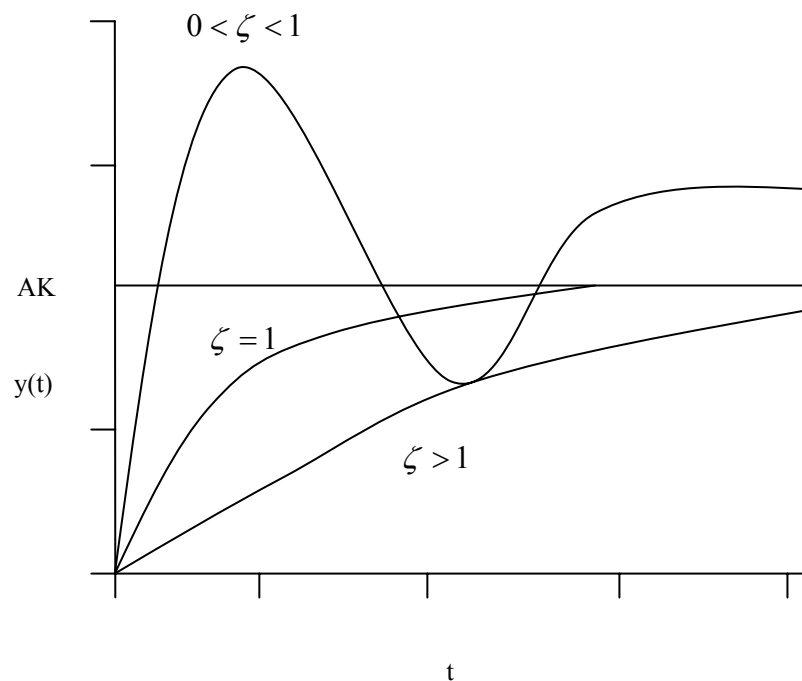


Figura. 28.

Paso de respuesta de sistemas de segundo orden.

FUENTE: [Babatunde. A. Ogunnaike. W. Hannen Ray. "Process dynamics Modeling and control].

Estas tres respuestas se bosquejan de manera general en la figura 22.

1. La respuesta del caso 1 (cuando $0 < \zeta < 1$) es oscilatorio.
2. La respuesta del caso 2 (cuando $\zeta = 1$), ofrece el acercamiento mas rápido al valor final sin la oscilación.
3. La respuesta del caso 3 (cuando $\zeta > 1$) es inactivo.

Una onda pura del seno con frecuencia $1/\tau$. Esto se refiere como la frecuencia natural de oscilación ω_n . Observe que su recíproco el periodo natural de oscilación es τ estableciendo la razón del nombre dado a este parámetro.

2.9 Sistemas N de primer orden en serie.

En estos sistemas de primer orden conectados en serie, el comportamiento es realmente una extensión directa. En primer lugar, porque cada uno de los sistemas de un conjunto N son de primer orden, la relación de función de transferencia para cada componente se expresa de la siguiente manera:

$$y_1(s) = \frac{K_1}{\tau_1 s + 1} u(s)$$

$$y_2(s) = \frac{K_2}{\tau_2 s + 1} y_1(s)$$

$$y_i(s) = \frac{K_i}{\tau_i s + 1} y_{i-1}(s)$$

$$y_{N-1}(s) = \frac{K_{N-1}}{\tau_{N-1} s + 1} y_{N-2}(s)$$

$$y_N(s) = \frac{K_N}{\tau_{Ns+1}} y_{N-1}(s)$$

Obteniendo que la función de transferencia total generalizada para dos sistemas de primer orden en serie es:

$$y_N(s) = \left(\prod_{i=1}^N \frac{K_i}{\tau_i s + 1} \right) u(s) \quad (111)$$

Justamente dos sistemas de primer orden en serie resultan ser un sistema de segundo orden, al conjunto de sistemas de primer orden N en serie, resultando un sistema de N orden.

Características de los parámetros.

- $K = \prod_{i=1}^N K_i$ La combinación de ganancia de estado, a un producto individual de N, contribuyendo al sistema ganancias de estado.
- N constantes de tiempo, $\tau_i, i = 1, 2, \dots, N$.

Considerando a continuación una representación en diagrama de bloques de N no interacciones de sistemas de primer orden que están conectados en serie.

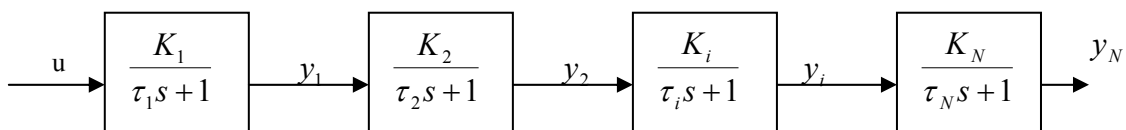


Figura. 29.

Diagrama de bloques de N no interacciones.

La función de transferencia para este proceso es:

$$g(s) = \left(\prod_{i=1}^N \frac{K_i}{\tau_i s + 1} \right) \quad (112)$$

Los términos descompuestos en factores N se amplían para dar un denominador del orden polinomial N expresado en la siguiente ecuación:

$$g(s) = \frac{K}{a_N s^N + a_{N-1} + \dots a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (113)$$

Observe que la función de transferencia para orden N en serie tiene polos localizados en $s = -1/\tau_i$; $i=1, 2, \dots, N$.

Respuesta de Paso de la Unidad.

La respuesta de este sistema a un cambio de paso de la unidad a la entrada es obtenida desde la ecuación (111), con $u(s)=1/s$, es decir:

$$y_N(s) = \left(\prod_{i=1}^N \frac{K_i}{\tau_i s + 1} \right) \frac{1}{s} \quad (114)$$

El cual por la extensión de la fracción parcial se convierte:

$$y_N(s) = K \left(\frac{A_0}{s} + \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{\tau_i s + 1} \right) \quad (115)$$

Donde la constante A_i (obtenida de la expansión de la fracción parcial) están dadas por:

$$A_0 = 1; A_i = \lim_{s \rightarrow (-1/\tau_i)} \frac{[(\tau_i s + 1)g(s)]}{Ks} \quad (116)$$

Invirtiendo la ecuación (115), la respuesta del paso de la unidad es obtenida como:

$$y_N(t) = K \left(1 + \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{\tau_i} e^{-t/\tau_i} \right) \quad (117)$$

Conociendo la naturaleza de esta respuesta, hay que considerar los siguientes puntos.

1. La adición subsecuente de sistemas de primer orden hace realmente que la lentitud del sistema llegue a ser más pronunciada. Pudiendo ver el comportamiento que tienen este tipo de sistemas en la figura 30, con un diagrama de diversas respuestas de paso de la unidad para sistemas de primer orden N , cuando N adquiere varios valores.
2. Puede ser demostrado, que mientras $N > 1$, la curva de la respuesta del paso de unidad en el origen será cero, es decir;

$$\left. \frac{dy_N}{dt} \right|_{t=0} = 0$$

3. El factor inherente, obtenido evaluando la siguiente integral donde $y^* = K$ y $y_N(t)$ están dados dentro de la ecuación (117).

$$J_N = \int_0^{\infty} [y^* - y(t)] dt$$

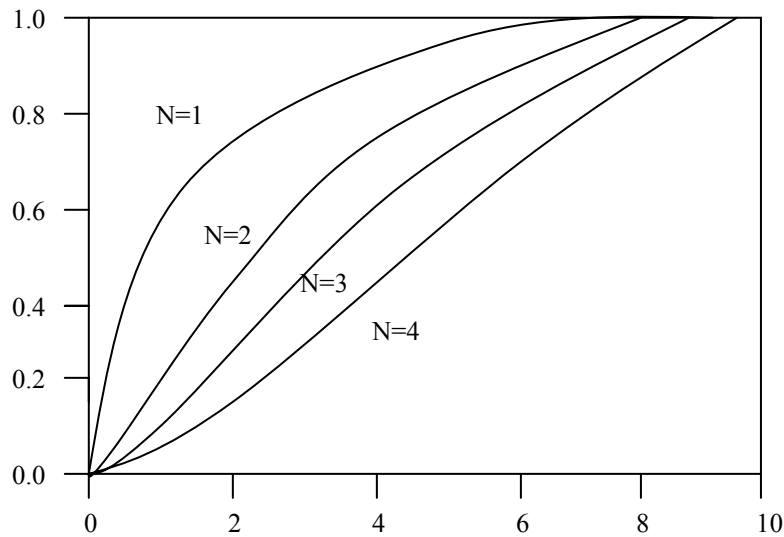


Figura. 30.

Paso de la unidad de respuesta de varias no interacciones de sistemas de primer orden en serie.

FUENTE: [Babatunde. A. Ogunnaike. W. Hannen Ray. "Process dynamics Modeling and control].

Un caso de Limitación Especial.

Para un sistema de N primer orden en serie se considera la siguiente situación:

- Todas las ganancias de estado N implicadas son iguales a 1.
- Todas las constantes de tiempo son iguales, y
- La constante es igual a $\frac{\alpha}{N}$

La implicación de este tercer punto es que cada vez mas el número de sistemas en el conjunto aumenta, y la constante de tiempo de cada uno de estos sistemas se disminuye.

La función de transferencia para este sistema esta dada por:

$$g_N(s) = \frac{1}{\left(\frac{\alpha}{N}s + 1\right)^N} \quad (118)$$

Cuando $N \rightarrow \infty$, cada constante de tiempo que contribuya valdrá cero. La consecuencia inmediata que se tendrá es que ahora se tiene una secuencia finita de los sistemas individuales, cada uno comportándose de tal manera como un proceso con ganancia pura. Hasta ahora la respuesta limitadora en cada etapa es una función de paso, que sigue estando lejos de saber cual es la respuesta en la etapa final (que es la salida del sistema total) realmente.

La secuencia infinita especial de los sistemas de primer orden se comportan como un sistema que de ninguna manera no altera la forma de la función de entrada, simplemente introduce un retraso, haciendo que la salida aparezca como la misma función que la de entrada, solo es cambiada por cierta cantidad de unidades de tiempo.

2.9.1 Sistema general de orden N.

El sistema general de orden N comienza con funciones de transferencia de sistemas de N primer orden, combinando con la función de transferencia de la ecuación (111), y por lo tanto involucrando también la ecuación (112), se estaría ocupando un sistema de orden N.



Y como un sistema general de segundo orden puede exhibir el comportamiento dinámico que diferencia de el de dos sistemas de primer orden en serie. El comportamiento de un sistema general de orden N dependerá de la naturaleza de las raíces de N del polinomio del denominador en la ecuación (89). Sin embargo estas raíces son verdaderas o complejas, por lo tanto se tienen solamente dos situaciones:

1. Las raíces todas son verdaderas (distintas o múltiples), o
2. Algunas raíces son conjugadas mientras que otras son verdaderas.

En el primer caso, el comportamiento será exactamente como el de los sistemas N de primer orden, en el segundo caso necesitamos solamente observar que cada par de raíces de la conjugación del complejo contribuya al comportamiento de un sistema de segundo orden y al comportamiento total del sistema.

El comportamiento general del sistema de orden N , se componen principalmente del comportamiento de los sistemas N de primer orden en serie, o una combinación de varios sistemas de segundo orden, incluidos en la serie de sistemas de primer orden.

2.9.2. Simulación de los sistemas de retraso lineal en matlab.

Como ya se mencionó anteriormente matlab es un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones totalmente integrado, que esta orientado para llevar acabo proyectos en donde se encuentran implicados cálculos matemáticos y la visualización de los mismos. Matlab realiza operaciones matemáticas de la misma forma que una calculadora. La simulación de los sistemas de retraso lineal para el prototipo de dinámica y control de procesos es muy importante realizarla para poder comprender el comportamiento matemático que tiene el sistema y lo que ocurre físicamente en el prototipo.



Con estas simulaciones principalmente del sistema de retraso lineal, que comprende para los sistemas de primer y segundo orden del prototipo de dinámica y control de procesos y tomando en cuenta que modificando valores se puede mostrar claramente el comportamiento que se tendría dependiendo del sistema analizado. Las simulaciones para este tipo de sistemas parten principalmente en el desarrollo de programas por medio de este software de aplicación, estos programas están estructurados de tal manera que modificando variables o valores de estos muestran el comportamiento de los sistemas anteriormente mencionados.

2.9.3. Simulación de un sistema de retraso de primer orden.

De las funciones de transferencia y de los sistemas se pretende obtener las respuestas al impulso y escalonado de un sistema de primer orden.

Utilizando los siguientes comandos: impulse, step.

Desarrollando el siguiente programa: Respuesta de un sistema de primer orden ($1/(1+s)$).

```
>> 'programa para sistemas de retraso lineal';
```

```
>>'respuesta de un sistema de primer orden';
```

```
>> num = 1;
```

```
>> den = [ 1 1 ];
```

```
>> step (num, den);
```

Las variables num y den, indican principalmente la función que tiene el numerador y el denominador para la función de transferencia de un sistema de primer orden, teniendo como resultado la figura. 31, la cual muestra el comportamiento de un sistema de primer orden en un tanque de agua.

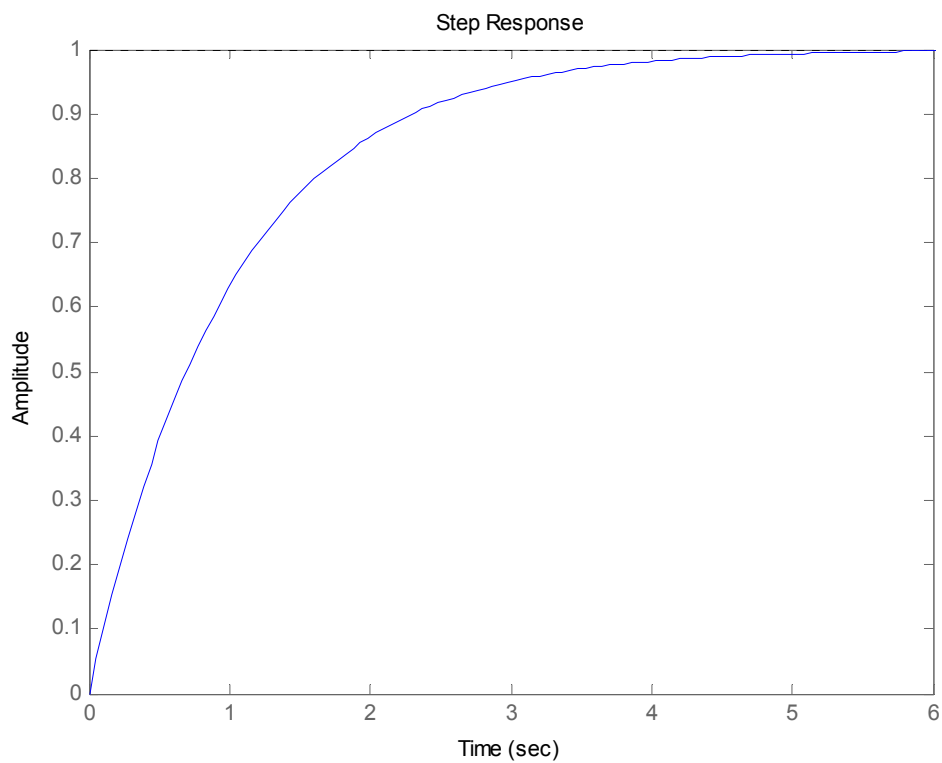


Figura.31
Simulación de un sistema de primer orden.

FUENTE:[MATLAB 7.1 R12].

2.9.4 Simulación de un sistema de retraso de segundo orden.

De la misma manera utilizando los comandos: `impz` y `step` se lleva a cabo el desarrollo de un programa de retraso lineal de segundo orden.

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 0.2s + 1}$$

```
>> 'programa para sistemas de retraso lineal';  
>> 'respuesta de un sistema de segundo orden';  
>> num = [ 0 1 0];  
>> den1 = [ 1 0.2 1 ];  
>> step (num, den1);
```

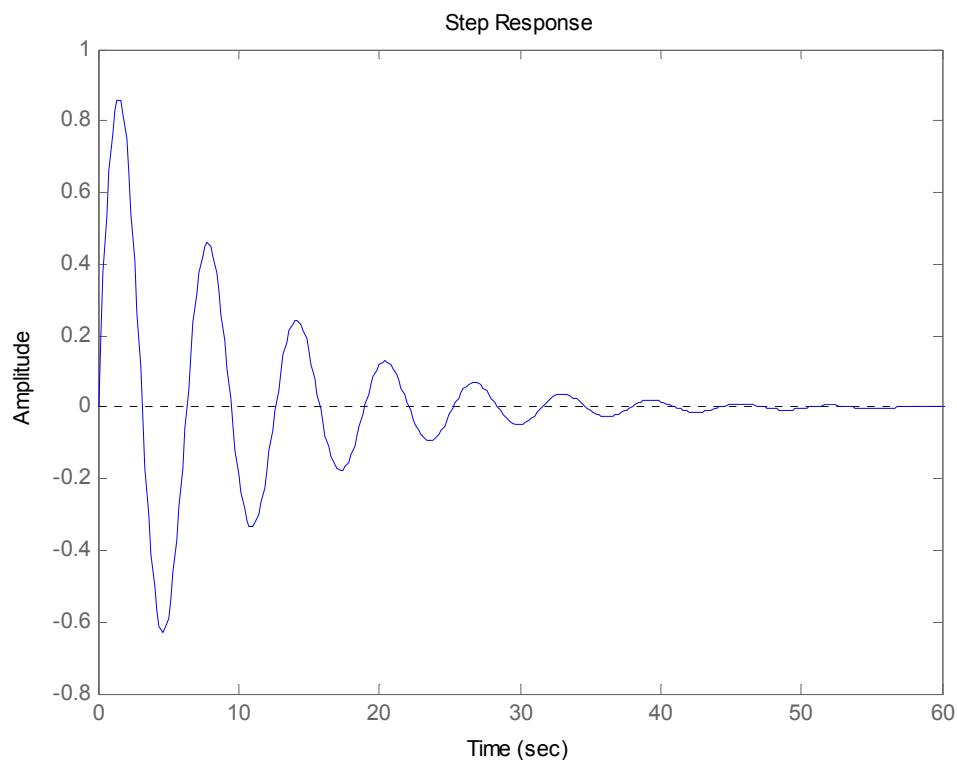


Figura.32.Simulación de un sistema de segundo orden.
FUENTE: [MATLAB 7.1 R12].



III. Proceso de Diseño y Montaje de Equipo.



3. Proceso de diseño y montaje de equipo y accesorios para prototipo de dinámica y control de procesos.

El prototipo de dinámica y control de procesos, esta diseñado principalmente, para operar sistemas (SISO) una simple entrada – una simple salida, (MIMO) múltiples entradas – múltiples salidas, en este tipo de sistemas se emplean el proceso capacitivo puro y el proceso de retraso lineal, de este tipo de procesos se operan diversas combinaciones: capacitivo puro – capacitivo puro, capacitivo puro – retraso lineal, retraso lineal – retraso lineal. El proceso de diseño y montaje de equipo y accesorios, se indican a continuación:

1. Se diseñaron cinco tanques principales, de material acrílico transparente de 0.2363 in de espesor, la altura de los tanques es de 10 in, con un diámetro de 8 in. Los tanques tienen como base una placa de acrílico con las siguientes dimensiones: 10 in de largo y ancho respectivamente. Los tanques cuentan con un drene al centro, el drene cuenta con una base roscable de 3/8 in. El cuerpo del tanque fue adherido a la base de acrílico, con la aplicación de cloroformo, sellando perfectamente, sin rastro de fuga de líquido. Principalmente cuatro tanques nos permiten realizar nuestros objetivos principales, así como el mostrar los diferentes tipos de arreglos que se pueden tener para el manejo del prototipo de dinámica y control de procesos. El quinto y ultimo tanque, es un tanque de balance que permitirá retroalimentar a las dos torres principales del prototipo, estas dos torres están conformadas cada una por dos tanques de material de acrílico, teniendo una separación aproximada de 10" entre cada tanque.
2. El tanque de balance, tiene una separación de las dos torres anteriores de 12" y una separación del extremo de la mesa de trabajo hacia la torre de 5".



Figura.33.

Montaje de Equipo principal y tubería.

3. Los espárragos empleados como soporte de los tanques, las tuercas y rondanas cuentan con un tratamiento de pintura, esto es llevando primero una aplicación de (primer), después la aplicación de pintura de color (azul neón), y finalmente una aplicación de laca, esta se aplico tanto a tuercas y tornillos como a los espárragos del prototipo.
4. Para poder llevar acabo el montaje del equipo, fue necesario ubicarlo dentro de una mesa de trabajo, en el cual va ser montado todo el equipo, la mesa de trabajo cuenta con las siguientes medidas. A lo largo de 70.86 in y a lo ancho de 31.5 in, con una altura a partir de nivel de piso terminado de 36 in o 3 ft.
5. En esta mesa de trabajo, se realizaron perforaciones, que son necesarias para los soportes del equipo.

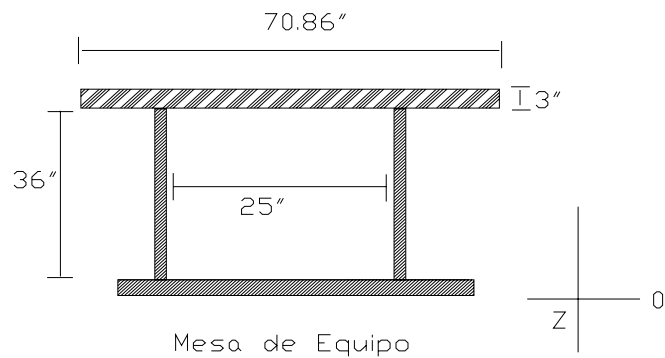


Figura. 34
Mesa de Ubicación de Equipo principal

6. Se procede al montaje de espárragos de $\frac{3}{4}$ in, y tanques como base principal, dichos espárragos estarán apoyados de tuercas y rondanas de $\frac{3}{4}$ in que ayudarán a sujetar firmemente los tanques de acrílico, el cual están conformadas dos torres principales con dos tanques cada una. Otra torre más pequeña con un solo tanque del mismo material y teniendo una altura menor a las dos anteriores. La altura que presentan los espárragos es de 40in.
7. El espacio entre las dos torres principales es de 30 in, la tercer torre mantiene una medida de espaciado de 12 in o 1 ft.
8. La mesa de trabajo cuenta con área específica que servirá como tablero de control de los principales instrumentos y equipo.

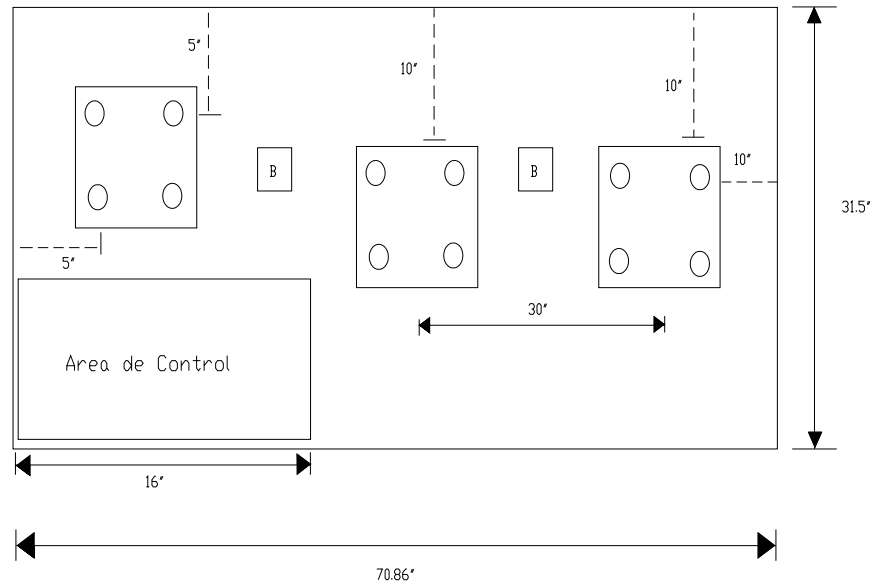


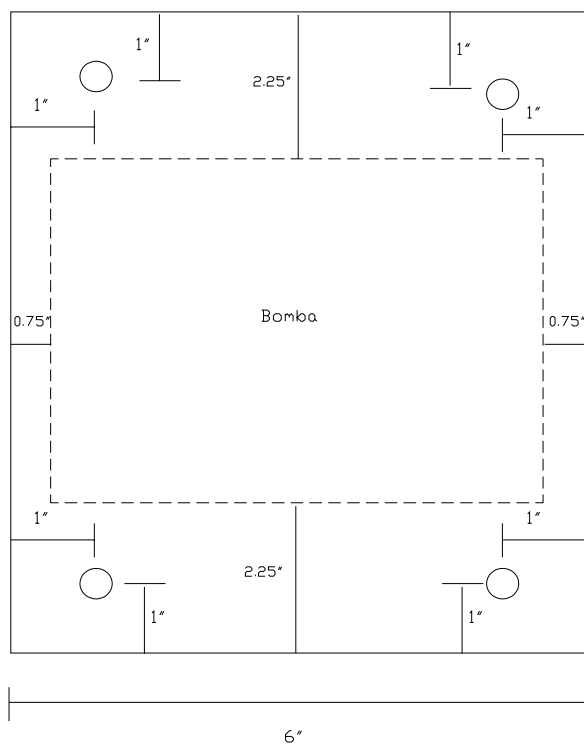
Figura.35.Vista aérea de equipo principal.

9. Para el montaje de la bomba es necesario el llevar acabo el diseño de las bases que servirán para la fijación y montaje de las bombas, para todo esto se diseñaron placas de acrílico montadas sobre soportes de varilla de acrílico, dichos soportes tienen una altura considerada de 4 in de alto, estos soportes cuentan cada uno con una perforación de $\frac{1}{4}$ in, al centro de estos, para poder ser empotrados en la mesa de trabajo, con la ayuda de tornillos de $\frac{1}{4}$ in.
10. Los soportes o tacones diseñados, donde va colocada la bomba, fueron fijados primeramente a la placa de acrílico con un poco de Cloroformo, quedando de manera independiente tanto la fijación hacia la bomba, como el empotrado del equipo a la mesa.
11. Las placas de acrílico para las bombas cuentan con las siguientes dimensiones: 8 in de largo * 6 in de ancho. Tomando en cuenta las medidas de la bomba y el espacio disponible en la mesa de trabajo.



Figura. 36.
Bombas fijas en Base.

Placa de Acrílico
para base de las Bombas



Soportes de la
Placa de Acrílico

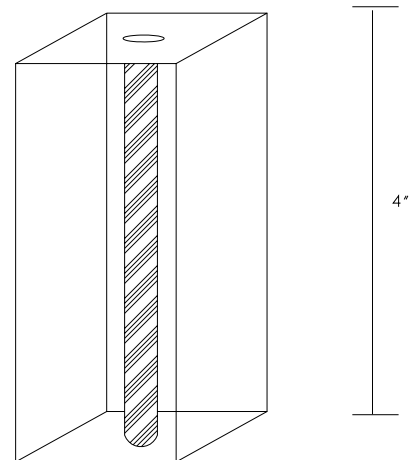




Figura.37 Placas de Bombas.

UNAM. FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA.



12. Los soportes de las placas cuentan con cuatro perforaciones una en cada extremo, esto para poder ser sujetos con tornillos de $\frac{1}{4}$ in * 6 in de largo, incluyendo además la colocación de rondanas, tanto de presión como planas, para poder ser sujetos los soportes a la mesa de trabajo, estas perforaciones se encuentran hechas a 1 in de distancia de colocación que tiene la bomba dentro de la placa, como se observa en la anterior figura 37. para el manejo en este prototipo el número de placas diseñadas son dos, acompañadas por una bomba tipo magnético de 1/35 HP.
13. Siguiendo el proceso de montaje se prosiguió al montaje las bombas, colocando tornillos de $\frac{1}{2}$ in para poder fijar la base de la bomba, de igual manera apoyados por rondanas de presión en la parte inferior de los tornillos y en la parte superior de rondanas planas, quedando bien fijas bombas, placas y soportes a la mesa de trabajo.
14. A continuación se llevo acabo la colocación de la tubería, manejando como base principal tubería de PVC de $\frac{1}{4}$ in, incluyendo accesorios como los son: codos de 90°, además incluyendo válvulas de paso y válvulas check, así como niples, coples y válvulas solenoides.
15. La tubería fue ensamblada en base al correspondiente isométrico de tubería, el cual contempla al prototipo en su totalidad, con la modalidad de ser mas objetivo y explicito el que este dividido en diferentes áreas, así como los accesorios e instrumentos que incluye para cada área de este prototipo.



Figura. 38.

Prototipo con tubería instalada.

El prototipo está dividido en este caso para el isométrico de tubería en once secciones, cada área está detallada con especificaciones y medidas nominales de tubería y accesorios que fueron necesarios para el diseño del prototipo.

El área de Isométrico de tubería está dividida en varias secciones que van desde el área "A" hasta el área "K", en cada área se especifican los accesorios y tramos de tubería con el cual cuenta esa parte del prototipo. A continuación se describen de manera general, los accesorios, tuberías e instrumentos que se encuentran presentes tanto en el equipo físico, como en los isométricos de tubería, los cuales fueron necesarios para la construcción del prototipo de Dinámica y Control de Procesos.



3.1 ISOMETRICO DE TUBERIA

Área “A”

Para el isométrico correspondiente a esta área se cuenta principalmente con:

Un tanque elaborado de material de acrílico con la siguiente especificación en plano de isométrico, el cual tiene las siguientes dimensiones 10 in de altura, por 8 in de diámetro. A este tanque le acompañan dos “T” de $\frac{1}{4}$ ”, dos válvulas de paso, dos coples, una reducción de $\frac{3}{8}$ a $\frac{1}{4}$ in, así como tres codos de 90° y los correspondientes tramos rectos de tubería que fueron necesarios para la construcción del prototipo. (El isométrico correspondiente al Área “A”, se encuentra ubicado en la parte de anexo de planos de prototipo del presente trabajo).

Área “B”

Para el isométrico correspondiente a esta área se cuenta principalmente con:

Un tanque elaborado de material de acrílico con las siguientes dimensiones, 10 in de largo por 8 de diámetro, este tanque va acompañado de una reducción tipo bushing de $\frac{3}{8}$ a $\frac{1}{4}$ in de salida, contemplando además como accesorios, dos coples de PVC de $\frac{1}{4}$ in, así como dos válvulas de paso, incluyendo dos codos de 90° . (El isométrico correspondiente al Área “B”, se encuentra ubicado en la parte de anexo de planos de prototipo del presente trabajo).



Área “C”

En esta área están contemplados, dos válvulas de paso, una válvula de retención o chek, esta se encuentra ubicada a la descarga de la bomba, dos coples de $\frac{1}{4}$ in de PVC, dos “T” recta de $\frac{1}{4}$ in de PVC, una bomba de tipo magnético de 1/35 H. P.

El área de descarga de la primer bomba GA-01, ya que la salida de descarga van dirigidas hacia el tanque inferior con clave TA-03, que se encuentra ubicado en la parte inferior de la primera columna de montaje del prototipo de Dinámica y Control de Procesos. Así mismo cuenta con la opción de control de descarga hacia el tanque de balance TA-05, que se encuentra ubicado como la ultima columna y la más pequeña del prototipo, así como de un codo de 90° de $\frac{1}{4}$ in de PVC. (El isométrico correspondiente al Área “C”, se encuentra ubicado en la parte de anexo de planos de prototipo del presente trabajo).

Área “D”

En esta área esta contemplado como la parte de la succión de los tanques hacia la bomba GA-01, que proporcionaría como parte del proceso capacitivo puro, esta parte del prototipo contempla los siguientes accesorios y válvulas como lo son: dos válvulas de paso de $\frac{1}{4}$ in, un cople roscable de $\frac{1}{4}$ in de PVC, dos codos de 90° de $\frac{1}{4}$ in, cuatro “T” recta de $\frac{1}{4}$ in, una reducción bushing para conexión con la bomba GA-01, de $\frac{3}{8}$ a $\frac{1}{4}$ in, y los tramos de tubería de PVC con medidas establecidas en el isométrico de tubería. (El isométrico correspondiente al Área “D”, se encuentra ubicado en la parte de anexo de planos de prototipo del presente trabajo).



Área “E”

El área E comprende el área de descarga de la bomba GA-01 hacia el tanque de balance o TA-05, esta área comprende los siguientes accesorios y válvulas: una válvula de paso de $\frac{1}{4}$ in, una válvula de retención o check, seis codos de 90° de $\frac{1}{4}$ in de PVC, una “T” recta de $\frac{1}{4}$ in, tramos rectos de tubería de PVC de $\frac{1}{4}$ in. Las medidas se encuentran especificadas en el plano de isométrico de tubería para esta área del prototipo. (El isométrico correspondiente al Área “E”, se encuentra ubicado en la parte de anexo de planos de prototipo del presente trabajo).

Área “F”

En esta área, se especifica la descarga del tanque de balance TA-05, hacia la segunda bomba de tipo magnético GA-02, los accesorios son descritos de la manera siguiente: dos reducción bushing de $\frac{3}{8}$ a $\frac{1}{4}$ in también de PVC, cuatro codos de 90° de $\frac{1}{4}$ in, un cople roscable de $\frac{1}{4}$ in. (El isométrico correspondiente al Área “F”, se encuentra ubicado en la parte de anexo de planos de prototipo del presente trabajo).

Área “G”

El área G, se especifica el área de descarga por parte de la bomba GA-02, hacia los tanques superiores de las columnas del prototipo, que tiene como función, el mantener abastecidos estos dos tanques, tanto el TA-01, como el TA-02. A la descarga de la bomba se encuentra: una válvula de retención o check, un cople roscable de $\frac{1}{4}$ in de PVC, manejando una ramificación de descarga para los tanques anteriormente mencionados, para la ramificación mencionada se encuentran los siguientes accesorios.



Una “T” recta de $\frac{1}{4}$ in de PVC, dos codos de 90° de $\frac{1}{4}$ in. (El isométrico correspondiente al Área “G”, se encuentra ubicado en la parte de anexo de planos de prototipo del presente trabajo).

Área “H”

EN esta área para el abastecimiento del tanque TA-01, como parte de la ramificación del área “G”, esta área cuenta con los siguientes accesorios: una válvula de paso de $\frac{1}{4}$ in de PVC, un cople roscable de $\frac{1}{4}$ in de PVC, cuatro codos de 90° de $\frac{1}{4}$ in, tramos de tubería recta de $\frac{1}{4}$ in de PVC. (El isométrico correspondiente al Área “H”, se encuentra ubicado en la parte de anexo de planos de prototipo del presente trabajo).

Área “I”

El área “I” para la parte inferior de la segunda columna del prototipo, el tanque TA-04, conformado en la parte superior, por la descarga de la bomba GA-01, para la parte inferior del tanque, una reducción bushing de $\frac{3}{8}$ a $\frac{1}{4}$ in, una “T” recta de $\frac{1}{4}$ in. En la parte superior del tanque se encuentra la descarga de la Bomba GA-01, tomando en cuenta los siguientes accesorios: una válvula de paso de $\frac{1}{4}$ in de PVC, un cople roscable de $\frac{1}{4}$ in de PVC, un codo de 90° de $\frac{1}{4}$ in de PVC, con tramos rectos de tubería de $\frac{1}{4}$ in. (El isométrico correspondiente al Área “I”, se encuentra ubicado en la parte de anexo de planos de prototipo del presente trabajo).



Área “J”

Esta área, se maneja la parte superior de la segunda columna del prototipo, con el tanque TA-02, empleando los siguientes accesorios: una reducción de $3/8 * 1/4$ in de PVC, dos “T” recta de $1/4$ in, ubicando la primer “T” recta hacia la tubería de succión de la primer bomba GA-01, la segunda “T” recta esta ubicada a la tubería de interacción de las dos columnas del prototipo, se cuenta con una válvula de paso de $1/4$ in, así como los correspondientes tramos de tubería de PVC de $1/4$ in. (El isométrico correspondiente al Área “J”, se encuentra ubicado en la parte de anexo de planos de prototipo del presente trabajo).

Área “K”

En esta área la tubería de succión de la segunda columna del prototipo es dirigida hacia la primer bomba GA-01 manejando los siguientes accesorios: tres TE recta de $1/4$ in, dos codos de 90° de $1/4$ in, dos válvulas de paso de $1/4$ de PVC, un cople roscable de $1/4$ in. (El isométrico correspondiente al Área “K”, se encuentra ubicado en la parte de anexo de planos de prototipo del presente trabajo).

El proceso de construcción y montaje del equipo se continúa con las conexiones eléctricas, para el equipo principal y el tablero de control, apoyado principalmente de un diagrama unificar que muestra las conexiones y cargas que se manejan en el prototipo de Dinámica y Control de Procesos.

Para el prototipo de Dinámica y Control de Procesos es necesario, el diseñar un tablero de control que permita manejar el equipo de una forma mas eficiente. En el diseño del tablero de control no solamente se especifican las dimensiones de la parte física del tablero, además se especifican los principales controles de operación con que debe de contar el prototipo de Dinámica y Control de Procesos.



3.2 Instrumentación.

La instrumentación es de gran importancia, para poder controlar el prototipo dependiendo el sistema que se este empleando, ya sea proceso capacitivo puro o proceso de retraso lineal o empleando ambos sistemas.

El prototipo cuenta con: sensores de nivel, válvulas solenoides, medidores de flujo digitales, válvulas de paso y principalmente un controlador tipo PID (proporcional integral derivativo), que se encarga principalmente de controlar las válvulas solenoides y las bombas, además tomando la opción de controlar manualmente desde tablero de control. Tanto los instrumentos como el controlador están específicamente ubicados, de acuerdo a las necesidades de los procesos se emplean, pudiendo ubicar de manera general en el Diagrama de Tubería e Instrumentación.

Las válvulas solenoides, los sensores de nivel y los medidores de flujo digitales, se les atribuye un suministro de energía de 12 VCA (voltaje de corriente alterna), el suministro de energía es proporcionado por una fuente de poder que regula el voltaje requerido para este tipo de instrumentos y para el tablero de control. Las bombas se les proporcionan un suministro de energía de 120 VCD (voltaje de corriente directa), las redes de suministro se pueden contemplar de manera general en el Diagrama Unificar para este prototipo.

3.2.1 Controlador.

El prototipo cuenta con un controlador PID (proporcional integral derivativo), que permite tener controlado y automatizado el prototipo. El controlador cuenta con tres entradas y dos salidas, así como un reelevador de voltaje. El controlador tiene como función principal el medir, decidir y actuar, todo esto para asegurar la estabilidad en un proceso.



El controlador es un dispositivo o aparato que mide el valor de la variable, cantidad o condición y opera para corregir o limitar cualquier desviación de un valor medio comparando con una referencia seleccionada (setpoint o punto de ajuste).

El set point, es la posición en la cual se fija el mecanismo del punto de control o sea el valor deseado de la variable controlada.

3.2.2 Sensores de nivel.

Los sensores de nivel, son dispositivos que permiten tener lecturas o registros de los niveles de operación, en este caso para los tanques de almacenamiento, los sensores de nivel permitirán tener al controlador una respuesta más rápida en cuanto al nivel que se este presentando dentro de los tanques. Los sensores de nivel empleados cubren el perfil de operación para este prototipo.

3.2.3 Válvulas solenoides.

Este tipo de válvulas son elementos capaces de regular el paso de flujo en un proceso, este tipo de válvulas se emplean para el prototipo para tomar en cuenta la automatización y el control de un proceso, estas válvulas solenoides actúan en apertura y cierre, esto debido al impulso de una carga o señal eléctrica, manteniendo la relación del punto de ajuste que se establezca en el controlador. El prototipo cuenta con dos válvulas solenoides, las cuales se muestra su ubicación en el Diagrama de Tubería e Instrumentación.

3.2.4 Bombas.

Las bombas empleadas para este prototipo son de 1/35 HP, las cuales tendrán la tarea de llevar acabo el suministro a los tanques de almacenamiento de agua del prototipo. Una bomba es un equipo de proceso que se utiliza para transportar, diversos fluidos, incluso sólidos en suspensión. Estas bombas son capaces de realizar las funciones necesarias para poder contemplar el proceso de un sistema capacitivo puro para el prototipo.



Figura.39. Bombas con tubería instalada.



3.3 Diagrama de Flujo de Proceso. (DFP)

El diagrama de flujo representa la forma más tradicional para especificar los detalles algorítmicos de un proceso. Se utiliza principalmente en programación, economía y procesos industriales; estos diagramas utilizan una serie de símbolos con significados especiales. Son la representación gráfica de los pasos de un proceso, que se realiza para entender mejor al mismo. Son modelos tecnológicos utilizados para comprender los pasos de la programación lineal.

Es un esquema gráfico más ilustrativo del proceso, ya que en éste se presentan los equipos que intervienen en él con su correspondiente balance de masa (indica que materiales entran y salen de cada equipo). En este diagrama se obtiene una idea más clara del proceso, pues se pueden identificar las corrientes y su sentido. Para el desarrollo del prototipo de dinámica y control de procesos fue necesario elaborar un diagrama de flujo de proceso. (El diagrama de flujo de proceso, se encuentra ubicado en la parte de anexo de planos de prototipo del presente trabajo).



3.4 Diagrama de Tubería e Instrumentación. (DTI)

Los diagramas de tubería e instrumentación son la representación gráfica de los datos necesarios para el desarrollo de la ingeniería de una planta química o petroquímica, en estos diagramas la simbología empleada para la designación de los equipos es más descriptiva que un diagrama de flujo de proceso. Con el propósito de simplificar los diagramas de tubería e instrumentación muchas veces son llamados DTI's.

En un diagrama de tubería e instrumentación se plasma la identificación y características principales de tubería, equipo, accesorios, instrumentación, que permitan la operación de una planta, en una forma eficiente y segura.

El diagrama de tubería e instrumentación es un documento de gran importancia, elaborado en la fase de Ingeniería básica del proyecto, que sirve para identificar líneas, diámetros de tuberías, accesorios, dispositivos de seguridad, dispositivos de control básicos necesarios para que el proceso sea eficiente, operable, flexible y confiable. Para el desarrollo del prototipo de dinámica y control de procesos fue necesaria, la elaboración de un Diagrama de Tubería e Instrumentación, el cual especifica los equipos, la instrumentación, así como la tubería empleada para el prototipo. (El diagrama de tubería e instrumentación, se encuentra ubicado en la parte de anexo de planos de prototipo del presente trabajo).



3.5 Diagrama Unifilar. (DU)

El diagrama unifilar es la representación gráfica de las instalaciones eléctricas, lo suficientemente detallado para su buena comprensión. Estos diagramas pueden ser de alto voltaje y de bajo voltaje, para el desarrollo del prototipo de dinámica y control de procesos el diagrama unifilar representado es de bajo voltaje, principalmente diseñado y especificado para las condiciones necesarias que requiere el prototipo, manejando un voltaje de corriente directa para bombas centrifugas y manejando un voltaje de corriente alterna, utilizando una fuente de poder, específicamente para el manejo y operación de instrumentos, así como de tablero de control. (El diagrama unifilar, se encuentra ubicado en la parte de anexo de planos de prototipo del presente trabajo).

3.6 Diseño de tablero de control.

En el prototipo de dinámica y control de procesos, el diseño y construcción de un tablero de control es de gran importancia para poder tener automatizado el prototipo.

El material empleado para la construcción del tablero de control, es de acrílico transparente del mismo material del que están hechos los tanques de almacenamiento. La placa principal ó cara del tablero, tiene las siguientes dimensiones establecidas, para la placa principal tiene: 16 in de largo * 16 in de ancho. La placa inferior o base de tablero cuenta con las siguientes dimensiones: 16 in de largo * 12 in de ancho, en esta placa en especial, cuenta con una pequeña área de soporte, la cual esta especificada como base principal de las placas frontales del tablero de control, la placa base cuenta con perforaciones para poder ser sujetado a la superficie de la mesa donde esta instalado el prototipo. Las placas frontales del tablero de control cuentan con las siguientes dimensiones: 12 in de largo * 10 ½ in de ancho, tomando en cuenta la elevación que tiene la placa principal que es de 45°. El tablero cuenta con una pequeña placa también de material de acrílico, esta placa se localiza debajo de la placa principal, sus dimensiones principales son de 16 in de largo * 2 in de ancho. La cara o placa principal del tablero de control es la de la parte trasera manejando las siguientes dimensiones: 16 in de largo * 10 ½ de ancho.

En el tablero de control se manejan interruptores tipo on-off, así como luces piloto indicadoras del tipo de actuación que se emplee para el manejo del prototipo, controlando manualmente bombas y válvulas de control, este manejo opcional es independiente al microcontrolador. En las figura se puede contemplar de manera general, sobre las dimensiones del tablero de control.

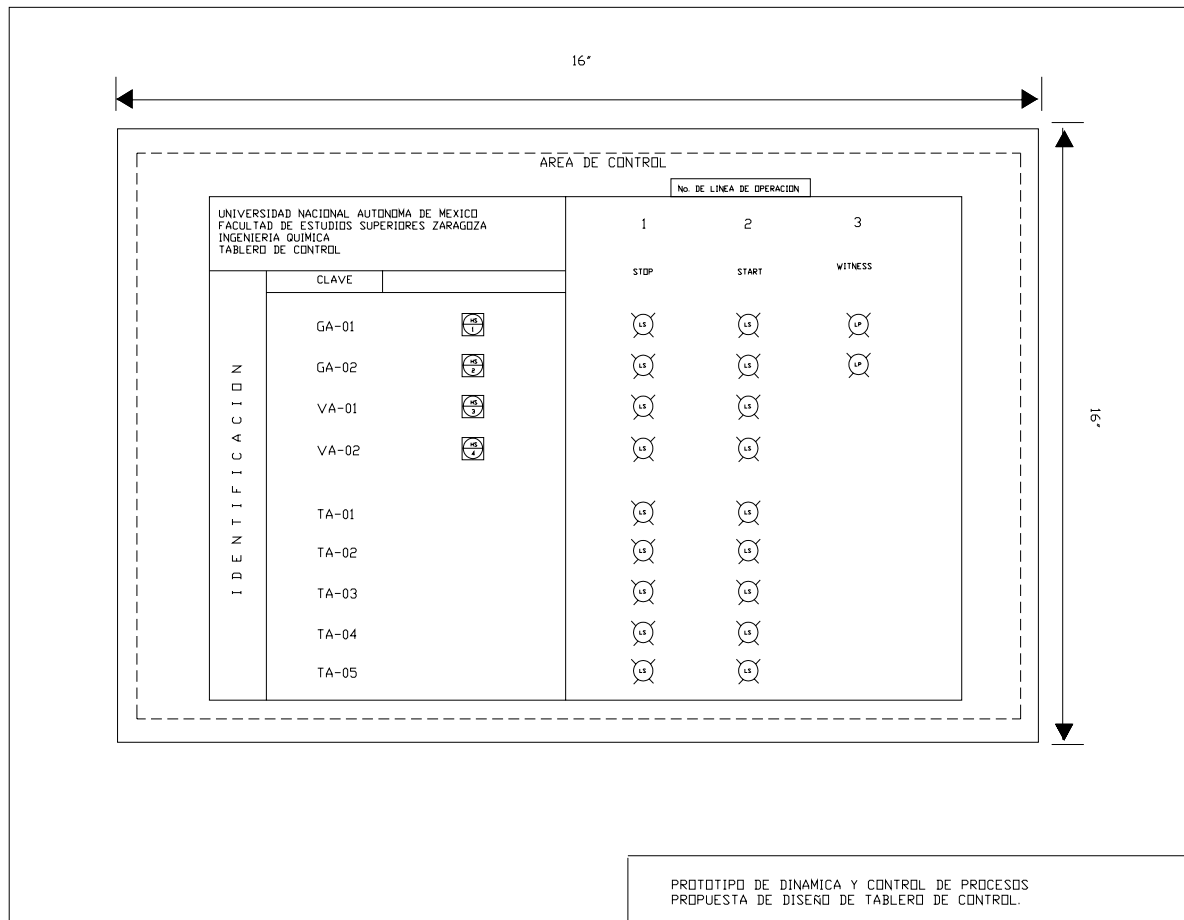
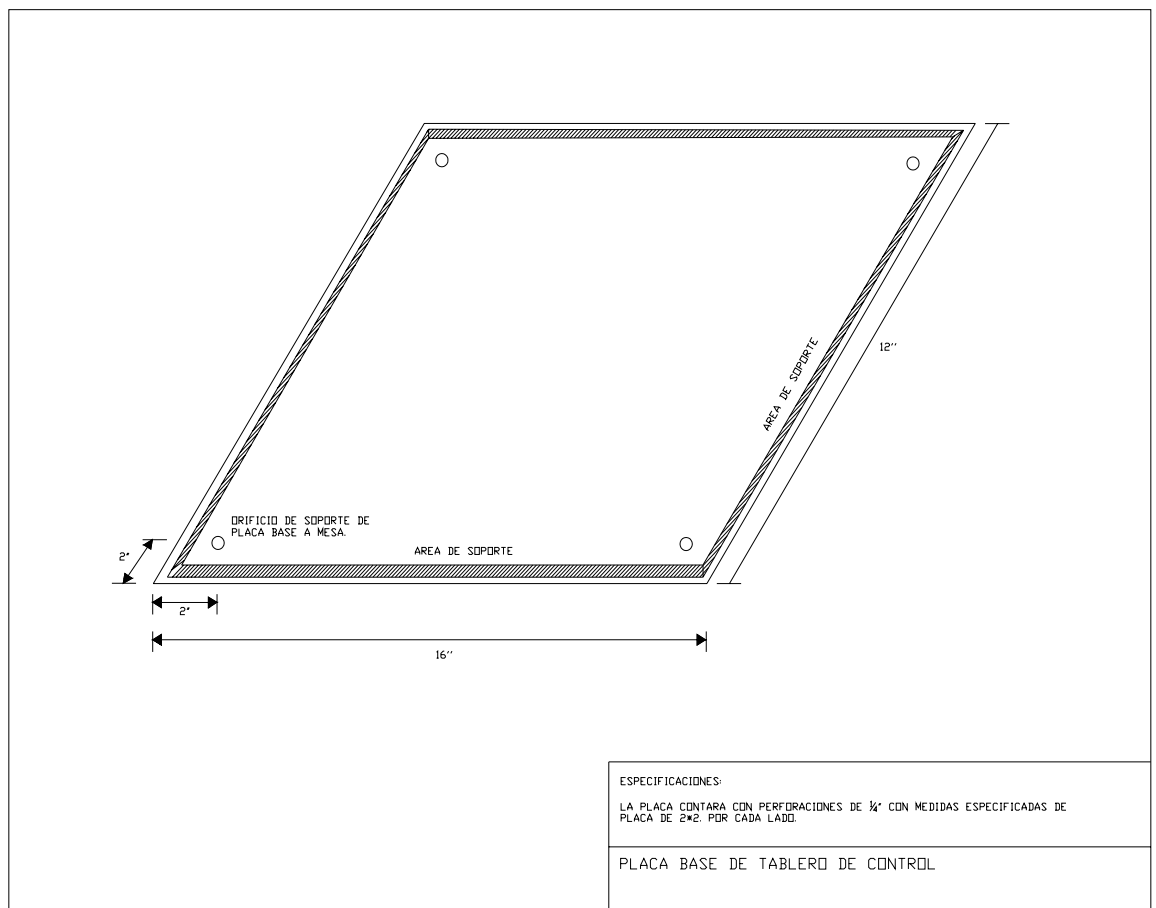
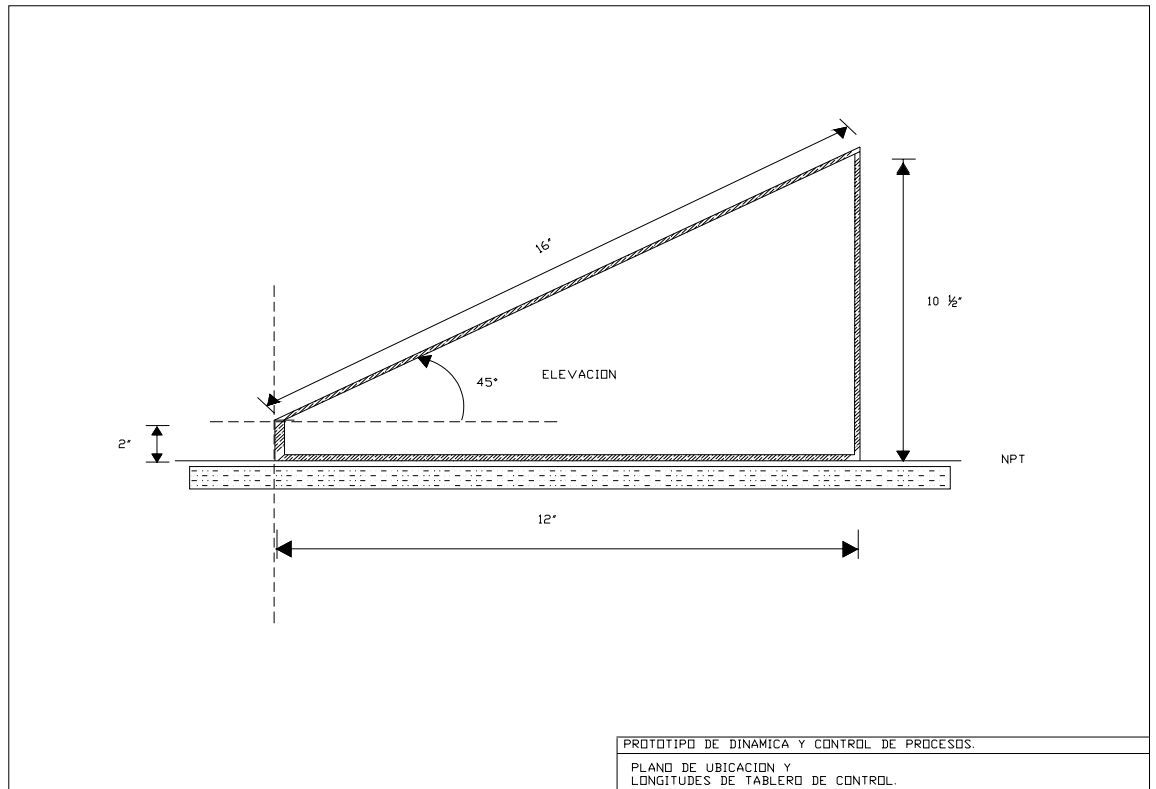


Figura. 40
Placa principal de Tablero de Control.



Figuras. 41 y 42. Placas de Tablero de Control.





IV. ANALISIS DEL PROTOTIPO **A NIVEL LABORATORIO.**



4. Exploración dinámica de los tanques drenados por gravedad.

El estudiante de ingeniería química deberá de ser capaz de:

1. Investigar el comportamiento de nivel del tanque por medio de un modelo con balances de masa.
2. Empezar T. F. (ventajas: relación multiplicación, respuesta de frecuencia obtenida directamente)
3. Obtener el paso de prueba de datos y concluir el modelo a medida que sea un FOPDT.
4. Determinar la linealidad del proceso a través del experimento.
5. Definir términos como proceso, ganancia (relacionando la pendiente de entrada y salida, estabilizando su estado) tiempo de retraso y constante de tiempo.

Procedimiento:

1. Demuestre el modelo de la ecuación derivada para el tanque, esta es aplicada hasta el último tanque. En el conjunto del proceso debe de estar además un proceso de segundo orden.
2. Sustituir un FOP ODE con una función de transferencia, mostrando la solución de la constante de tiempo.
3. Demostrar en la frecuencia trazada de un proceso de primer orden y demostrar la dinámica contra la ganancia estática.



Discusión:

1. ¿Por qué en este caso el proceso no es un integrador puro? ($1/S$) (drenado por gravedad)
2. ¿Por qué se hace este experimento (para obtener el modelo dinámico)? ¿Qué es modelo (ecuación, datos, modelo físico, modelo RCL)? ¿Qué se entiende por dinámica (transitoria, tiempo elemental involucrado) contra equilibrio de estado (independiente del tiempo).
3. ¿El modelo resultante que elementos lo componen? (válvula, proceso y transmisores).
4. El controlador de salida es típico de 0 – 10 volts, que es convertido (por e/p) a 3-15 psi (para la operación de control de válvulas neumáticas (0-100%).
5. El paso de prueba de salida es $1/S$
6. Porque 0.632 para la constante de tiempo.
7. Si no es lineal, emplee el resultado (línealize) cerrando el punto de operación.
8. El tamaño de entrada no debe cambiar (si el proceso es lineal) afectando el resultado en los parámetros del modelo. El tamaño de nivel de salida debe de ser distinto, así se deberá determinar, pero la constante de tiempo deberá ser la misma. En diferentes puntos de operación, misma entrada debe tener el mismo rendimiento a la salida, si el proceso es lineal.
9. La función de transferencia, asume condiciones iniciales, comenzando desde cero, que es el estado que se mantiene antes del disturbio.
10. Observando la salida del flujo (indicado en el cuadro) del fondo del tanque. Si este es constante entonces el proceso es $1/S$, el no estará constante.
11. Compruebe el tiempo de retraso del tanque (conoce este volumen), en contra del tiempo actual de la constante.

12. Algunos no están cubiertos en el tiempo y otros que si pueden estar cubiertos en el seguimiento de las lecciones. Aquí se agrupan porque son relevantes a esta lección del modelo.

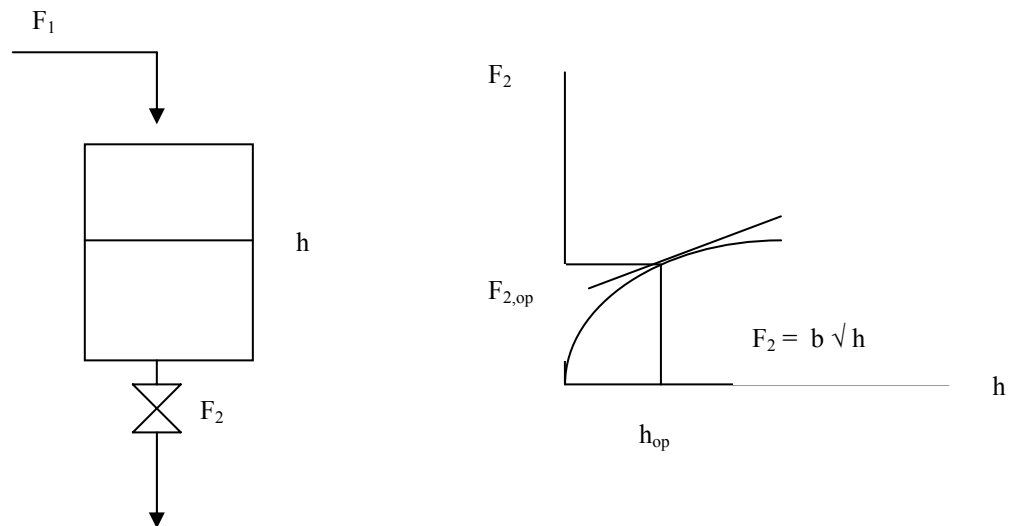


Figura. 43.
Comportamiento de un sistema drenado por gravedad

$$F_1 - F_2 = A \frac{dh}{dt}$$

$$F_1' = F_1 - \bar{F}_1; F_2' = F_2 - \bar{F}_2; h' = h - \bar{h}$$

$$F_1' + \bar{F}_1 - (F_2' + \bar{F}_2) = A \frac{d(h' + \bar{h})}{dt}$$

$$\bar{F}_1 = \bar{F}_2; \frac{d\bar{h}}{dt} = 0$$

$$F_1' - F_2' = A \frac{dh'}{dt}$$

Expansión de la Serie de Taylor.

$$F_2(h) = b\sqrt{h} = F_2(\bar{h}) + \frac{dF_2(\bar{h})}{dh}(h - \bar{h}) + \dots$$

$$F_2(h) - F_2(\bar{h}) = \frac{dF_2(\bar{h})}{dh}(h - \bar{h}) = F_2'$$
$$\therefore F_1' - \frac{dF_2(\bar{h})}{dh} h' = A \frac{dh}{dt}$$
$$A \frac{dh}{dt} + \frac{dF_2}{dh} h' = F_1'$$

Dejando el punto de operación constante de modo que necesitemos ocuparnos solamente de la desviación. Podemos caer en la primera notación y entender que nos estamos ocupando de variable de la desviación:

$$\frac{A}{\frac{dF_2}{dh}} \left(\frac{dh}{dt} \right) + h = \frac{F_1}{\frac{dF_2}{dh}}$$

$$\left(\frac{dF_2}{dh} \right)_{op} = \frac{b}{2h_{op}^{0.5}} = \frac{F_{2,op}}{h_{op}^{0.5} 2h_{op}^{0.5}} = \frac{F_{2,op}}{2h_{op}}$$

$$\tau_c = \frac{A}{\frac{dF_2}{dh}} = \frac{2Ah_{op}}{F_{2,op}} = \frac{2V_{op}}{F_{2,op}} = 2 * tiempo_interrupcion = constante_tiempo$$

$$\tau_c \frac{dh}{dt} + h = \frac{2h_{op}}{F_{2,op}} F_1$$

Observe que el tiempo de la interrupción con respecto a la constante del tiempo es esencial para el diseño de este experimento.

Tomando la transformada de Laplace,

$$\tau_c sH(s) + H(s) = \frac{2h_{op}}{F_{2,op}} F_1(s)$$

$$\frac{H}{F_1} = \frac{\frac{2h_{op}}{F_{2,op}}}{\tau_c s + 1}$$

si en la entrada de flujo está el cambio por la unidad de paso (1/s),

$$h(t) = K_p \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_c}}\right), \text{ es por lo tanto la definición de la constante del tiempo.}$$

Ahora se linealiza (con el truncamiento de la expansión de Taylor) el proceso a un primer orden ODE. Si el flujo de salida es constante se cambia como un disturbio (puede ser mantenido constante por la bomba) el efecto de disturbio tiene el mismo efecto dinámico. Sigue siendo un proceso intrínsecamente estable. Un aumento constante en el flujo de salida da lugar a una disminución en el nivel más bajo del tanque. El nivel más bajo del tanque y el flujo de la salida encontraran en un nuevo estado constante. Si asumimos que hay solamente un flujo constante ajustable de la salida (no hay flotación en la salida del flujo).

$$A \frac{dl}{dt} = F$$

$$AsL(s) = F(s)$$

$$\frac{L}{F} = \frac{1}{As}$$

$$L = \frac{F}{As} = \frac{1}{As^2}$$

$$l(t) = \frac{1}{A} t$$



Se sabe que el integrador puro, no representa el proceso en nuestra configuración física. La más importante a recordar sobre este proceso es que para controlar el flujo la válvula que lo controla debe volver siempre a su posición inicial para evitar fugas. Observamos que en este ejemplo la entrada es representada por $F=1/s$. Sin embargo, la función de transferencia del proceso L/F también es representada por $1/s$. ¿Cómo se pueden representar una señal y un sistema ambos por la misma cosa?.

1. Función del impulso de la unidad.

Considere el mismo tanque inferior, en estado constante, el flujo entrada = flujo de salida. El nivel del tanque lleva a cabo en un nivel constante. La válvula de entrada es abierta para cierta cantidad de tiempo y después cerrada volviendo a su posición anterior para permitir un flujo adicional en ft^3 de líquido.

Si disminuimos gradualmente el tiempo de apertura de la válvula y se aumenta el flujo, y se lleva esto al límite mientras el tiempo se reduce a cero y el flujo acerca a infinito hemos alcanzado un supuesto impulso de la unidad. Es como cerrar de golpe un martillo mecánicamente. Es un término matemático que se puede aproximar solamente físicamente.

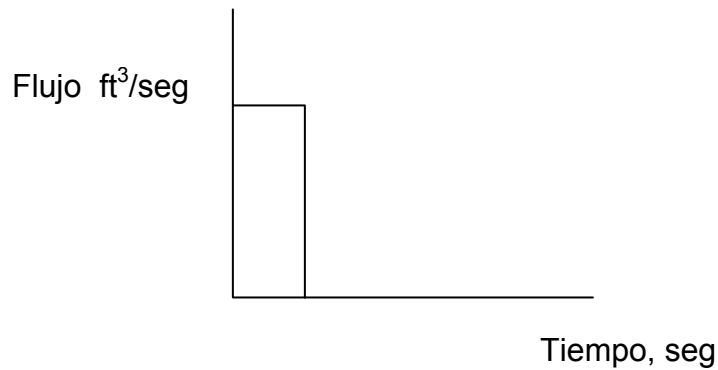
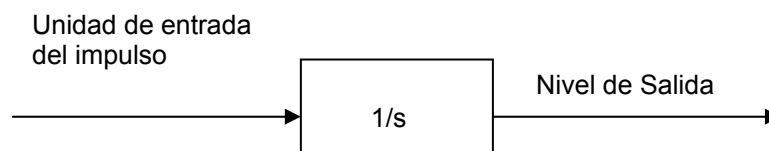


Figura. 44. Función de impulso de unidad de respuesta

2. Para probar que el nivel aumenta.



Salida(s)=1 (1/s), salida (t) = $\text{Laplace}^{-1}(1/s) = u(t)$ un paso de la unidad.

3. Porque la transformada de Laplace de un impulso de la unidad es uno, la función de la transferencia del sistema es justo la transformada de Laplace, como respuesta del impulso (una señal). Observe que la función de la transferencia del sistema se puede ahora interpretar como señal.

4. El ir de nuevo al proceso del nivel del tanque con una función de la transferencia de $1/s$, y un paso de la unidad $1/s$, hacemos una distinción entre los dos; uno que es la señal de entrada y el otro función de proceso de la transferencia.
5. Ahora podemos observar la obtención de la respuesta, usando diferentemente el teorema de la circunvolución que más bien es tomado de la transformada de Laplace inversa. Indica que la salida es obtenida a partir de la función de entrada a la respuesta del impulso (ambas en dominio de tiempo).

$$Salida(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} x(t-\tau)h(\tau)d\tau$$

Nota: $h(t-\tau)$ es $h(t)$ retrasado por τ , y $x(t-\tau)$ es $x(t)$ retrasado por τ . Estas son las traducciones en el tiempo. Puede ser probado que la transformada de Laplace de $x(t-\tau)$ es $e^{-s\tau}X(s)$.

Se asume que $x(t)$ siendo la entrada y $h(t)$ siendo el sistema o el proceso de respuesta de impulso.

6. encontremos la función de salida en t usando el integral de la circunvolución, se expone el problema en forma modificada. Dado que: $x(t) = u(t)$, $H(s) = 1/s$, hallando $y(t) = x(t) * h(t)$. La primer transformada de Laplace de $H(s)$ para conseguir $h(t) = u(t)$. Esta es la respuesta del impulso de $H(s)$. El símbolo $*$ denota la operación de circunvolución.

$y(t) = x(t) * h(t) = u(t) * u(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau)u(t-\tau)d\tau$ donde τ es una variable simulada para la integración. La función $u(t-\tau)$ es $u(t)$ retraso por τ . Desde $u(\tau) = 0$ para $\tau < 0$ la expresión anterior se convierte en $\int_0^{\infty} u(t)u(t-\tau)d\tau$. Desde $u(t) = 1$ para $0 \leq \tau \leq \infty$ de la

expresión anterior tenemos $\int_0^t u(t-\tau)d\tau$. Y desde $u(t-\tau) = 1$ para $0 \leq \tau \leq t$ la expresión anterior es reducida a $\int_0^t d\tau = t$.

7. Encuentre la respuesta en tiempo de un proceso de primer orden (unidad de ganancia) a un paso de la unidad de entrada usando la transformada de Laplace y el método integral de la circunvolución. Como referencia basarse en la tabla de Transformadas de Laplace para las varias funciones indicando claramente el primer problema.

Para el tanque superior

$$F_m - F_{salida} = A \frac{dh}{dt}. \text{ Pero } h = CF_{salida}^2, \text{ entonces, } F_{entrada} = F_{salida} + 2ACF_{salida} \frac{dF_{salida}}{dt}.$$

La relación dinámica entre la entrada y salida es mas compleja, aunque el primer orden es lineal, esto es porque el coeficiente es una constante no muy larga (es variación de tiempo). Nota en el flujo de la entrada el estado es constante = el flujo de salida. La dinámica combinada de los dos tanques debe ser conectada en cascada sobre la dinámica previamente derivada, un complicado proceso de segundo orden.

Para reforzar la introducción de conceptos:

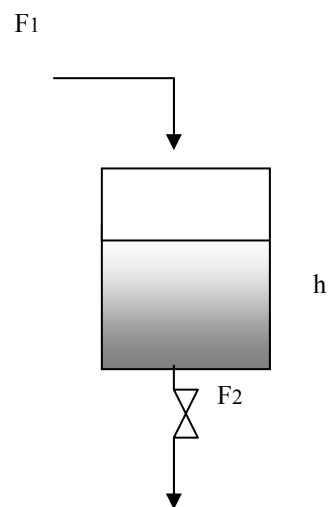
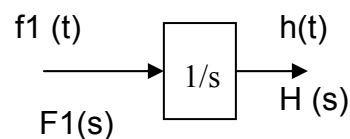


Figura. 45. Tanque drenado por gravedad.

Caso 1: F2 es constante



(1) $f_1(t)$ es una unidad de impulso, $F_1(s)=1$, $\frac{H(s)}{F_1(s)} = \frac{1}{s}$, $H(s) = \frac{1}{s} \therefore h(t) =$ unidad de paso.

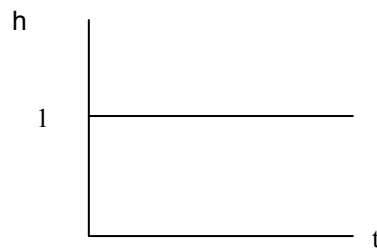


Figura. 46. Flujo de salida constante

(2) $f_1(t)$ es un paso de unidad, $F_1(s) = \frac{1}{s}$, $H(s) = \frac{1}{s^2}$, $h(t) = t$

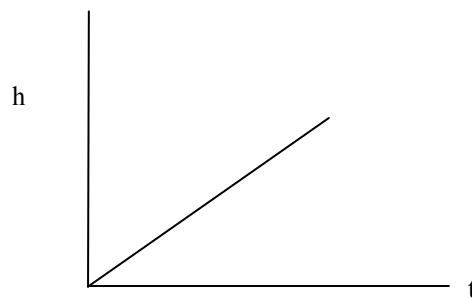


Figura. 47 Paso de unidad de respuesta.

Caso II f_2 es drenado por gravedad.

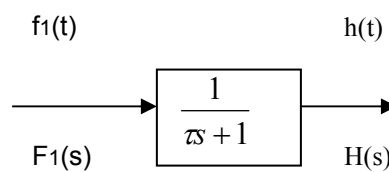


Figura.48. Función de Transferencia para un sistema drenado por gravedad

(1) $f_1(t)$ es una unidad de impulso, $F_1(t)=1$; $H(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$; $h(t) = e^{-\frac{t}{\tau}}$

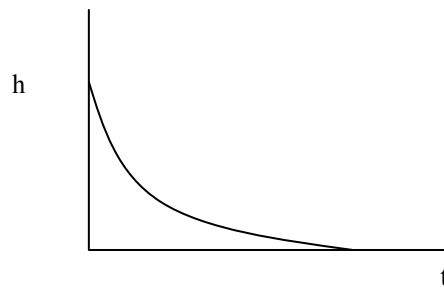


Figura. 49. Gráfica de sistema de respuesta

(2) $f_1(t)$ es una unidad de paso, $H(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \frac{1}{s}$; $h(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$

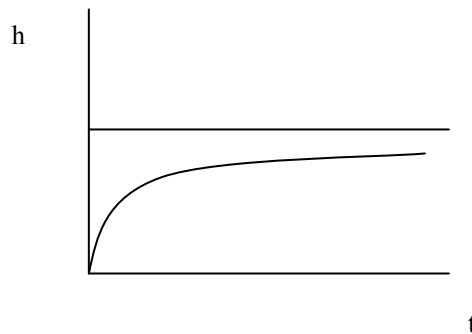


Figura. 50. Gráfica de sistema de unidad de paso de respuesta

Comúnmente usando los conceptos de la Transformada de Laplace.

$$L\left[\frac{df(t)}{dt}\right] = F(s)s - f(0)$$

$$f(t) \rightarrow \frac{d0}{dt} \rightarrow \frac{df(t)}{dt} = F(s) \rightarrow s \rightarrow F(s)s$$

$$\text{Nota: } L\left[\int_0^t f(\tau)d\tau\right] = \frac{F(s)}{s}$$

Por lo tanto $1/s$ es un integrador.

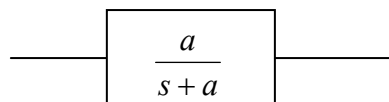
$$f(\tau) \rightarrow \int_0^t \{ \} d\tau \rightarrow \int_0^t f(\tau)d\tau$$

Es equivalente a

$$F(s) \rightarrow \frac{1}{s} \rightarrow \frac{F(s)}{s}$$

Para una función de unidad de paso. $f(\tau)=1$ para $\tau \geq 0$. La función de transferencia $\frac{1}{s}$ tiene un integrador por lo tanto $\int_0^t f(\tau)d\tau = t$.

Solución al problema de trabajo:



$a = \frac{1}{\tau_c}$ el impulso de respuesta de la función de transferencia es ae^{-at} . La

$$\text{salida es } y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau)ae^{-a(t-\tau)}d\tau = \int_0^{\infty} u(\tau)ae^{-a(t-\tau)}d\tau = a \int_0^{\infty} e^{-a(t-\tau)}d\tau$$

$$= a \int_0^t e^{-a(t-\tau)} d\tau = a \frac{1}{a} \left[e^{-a(t-\tau)} \right]_0^t = 1 - e^{-at} = 1 - e^{-t/\tau}.$$
 Esta es la igualdad de la transformada de Laplace de $\left(\frac{1}{s} \frac{1}{1 + \tau_c s} \right).$

Observe que el límite superior de la integración se convierte en t porque $(t - \tau)$ debe ser > 0 para la función exponencial no - cero.

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t - \tau) a e^{-a\tau} d\tau = \int_0^t a e^{-a\tau} d\tau.$$
 Esto es porque $u(t - \tau) = 1$ solamente cuando $0 \leq \tau \leq t$.

Para llevar acabo el análisis de este sistema es necesario en el manejo del prototipo los tanques se muestran en el siguiente esquema.

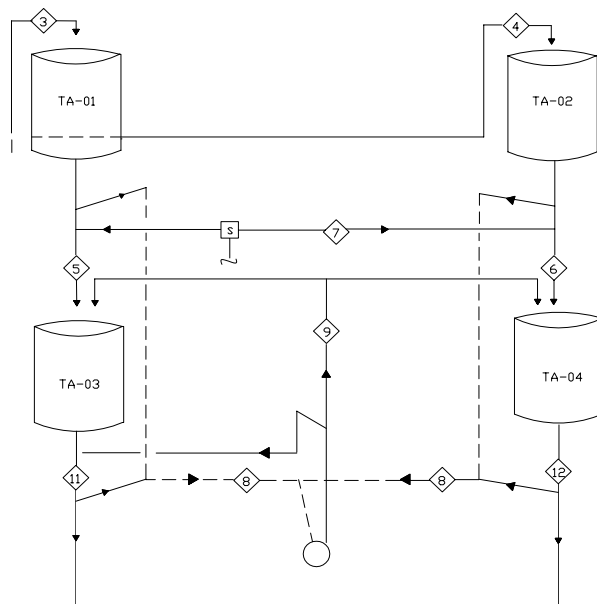


Figura. 51.

Esquema Representativo del sistema

Para el análisis de sistemas drenados por gravedad, es posible emplear, ya sea los tanques de lado derecho o izquierdo. Para el lado derecho de prototipo se ocupan el tanque TA - 02 y el TA - 04. Para el lado izquierdo serian el TA - 01 y el TA - 03, estos son sistemas drenados por gravedad, no empleando la bomba.



4.1 Controlador proporcional (P), solamente para control de nivel del tanque.

Los estudiantes de ingeniería química podrán:

1. Comprender el concepto de la regeneración del lazo cerrado (en contraste con el lazo abierto).
2. Observar los efectos del aumento en el controlador en su funcionamiento (defina el funcionamiento).
3. Realizar la diferencia entre el punto de ajuste y el rechazamiento de un disturbio en los controles (demostrando las curvas de respuesta para cada caso)
4. Predecir el error del estado solamente para el controlador P, y comprender dicha razón de estado solamente para este controlador.
5. Comprenda cual es la banda proporcional.

Procedimiento:

1. El objetivo total es mantener el llenado del tanque, manteniendo en operación constante el nivel; transmisores, válvulas de control, y controladores que son los dispositivos para alcanzar ese objetivo.
2. Derive el E/R y E/U para conservar sintonizados la mayoría de los lazos de control. Si los lazos de supervisión están implicados (es decir optimización), seguir del punto de ajuste llega a ser más importante.
3. ¿Porque se usa PB (banda proporcional)? Utilice PB o ganancia ingenieril primero defina el cociente del cambio fraccionario (sin dimensiones) para la ganancia proporcional, entonces PB.
4. Defina escalamiento de ganancia.
5. ¿Como se procesa la entrada (transductor, transmisor)?
6. Encuentre el error del estado constante.



7. Escriba la ecuación para un controlador proporcional. Explique la diagonal del controlador. (observe mas abajo).

Discusión:

1. ¿La colocación del transmisor en un diagrama de bloque de lazo cerrado está en la trayectoria delantera o de la regeneración?.
2. ¿Cuál es el valor inicial de la ganancia del controlador? ¿Se debe utilizar sintonización? Reajuste manual. (¿Porque es llamado así?)
3. Teóricamente para un flujo de salida proporcional (FOP) sin tiempo muerto debe seguir siendo estable para el control análogo; aproximando una respuesta inmediata, como aumento haga infinito.) ¿Si llega a ser inestable porqué es? (retraso, algoritmo digital, no - lineal, etc.).

Ecuación de regulación para el control proporcional P solamente es:

$$m = m_0 \pm k_c e$$

El sistema de control para un proceso integrador es:

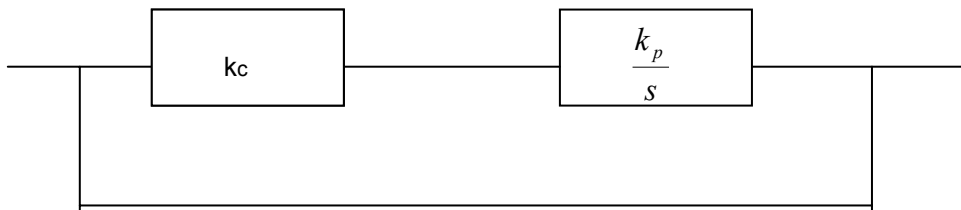


Figura. 52 Sistema de control de un proceso integrador

Desde $m = m_0$ en el estado constante (para esta clase de proceso la abertura de la válvula tiene ser restaurada al valor inicial eventual), el error en el estado constante es cero, no implicando ninguna compensación que éste ilustra la energía de la acción integral en quitar la compensación. Por lo tanto se puede incluir el modo integral en el regulador aunque aquí está en el proceso.

El sistema de control para un proceso de primer orden es:

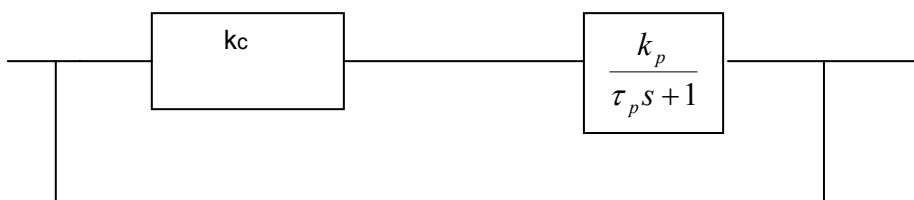


Figura. 53. Sistema de control de un proceso de primer orden

En estado constante la posición de la válvula asume siempre un nuevo valor sobre un cambio en el punto de ajuste. Por lo tanto el error del estado constante siempre existe. Cuando en vista de estos dos casos, se refiera a los dos sistemas de control del tanque. Otra manera de mirar el error del estado constante es encontrar el aumento estático de la función total de la transferencia dejando el acercamiento de s a cero. Si el aumento es uno, no existirá ninguna compensación, si no es unidad, entonces el error del estado constante existe con un modo integral en el regulador, el aumento estático de la función total de la transferencia es siempre unidad.

El error puede ser encontrado $\frac{E}{T} = \frac{E}{R} = \frac{1}{1+CP}$, la implicación de la sintonización para C es idéntica para seguir del punto de ajuste y el rechazamiento del disturbio. Templando para C se establece generalmente para un paso entrado para R que esto es aceptable (acercando al caso verdadero), pero para T nunca es un paso. Si asumiéramos un paso para S , la fuente verdadera del disturbio, T no será casi tan áspera como un paso porque D es generalmente retrasa. El punto importante es que se debe sintonizar para seguir del punto de ajuste, es generalmente demasiado débil para el rechazamiento del disturbio, esto es porque $\frac{E}{S} = \frac{-D}{1+CP}$.



4.2 El riesgo de utilizar sintonización en controladores PI por ensayo y error.

Los estudiantes podrán:

1. Comprender la necesidad de la acción integral del ejemplo de control de nivel del tanque. Haciendo que la ganancia del lazo cerrado sea uno. (Ninguna compensación).
2. Dibujar un diagrama de bloques para un control de lazo cerrado encendido basado en las funciones de transferencia para cada bloque.
3. Comprender la razón de tomar medidas contra la conclusión integral.
4. Derive el algoritmo para el controlador PI en T. F. en forma análoga y en forma digital.

Procedimiento:

1. Primero definiendo el aumento en el controlador como cociente del cambio fraccionario, entonces definiendo la banda proporcional seguida por la ecuación de Z-N. Observe que el transmisor es utilizado para el cálculo de banda proporcional (PB), esto es porque el operador es utilizado solamente en términos de porcentaje % para la medida y el punto de ajuste. Separe el factor de conversión y el factor de aplicación de la ganancia proporcional.
2. ¿Que se puede utilizar como regla de sintonización rápida? Derive la regla de sintonización rápida.

Discusión:

1. Usar de igual manera el punto de ajuste y el rechazo del disturbio.
2. Revisar las preguntas y las respuestas de la lección 1 y 2.
3. Explorar la relación entre la banda proporcional y la ecuación Z-N.
4. ¿Cómo se puede simplificar la ecuación Z-N si el proceso es drenado por gravedad.
5. Al usar una ecuación o una regla de sintonización debe estar enterado de lo que sucede con el algoritmo del controlador, es decir no ocultando los resultados de la ecuación de sintonización.
6. ¿Cómo se llega a un estado resintonizado como base? Igualando el lazo cerrado TF con el lazo abierto.

Para un proceso de segundo orden, como se muestra en la figura abajo, encuentre el controlador X tal que la respuesta al circuito cerrado es igual a la respuesta de circuito abierto. Esto es llamado un controlador resintonizado. La forma de contemplar que un controlador puede funcionar en un solo paso.

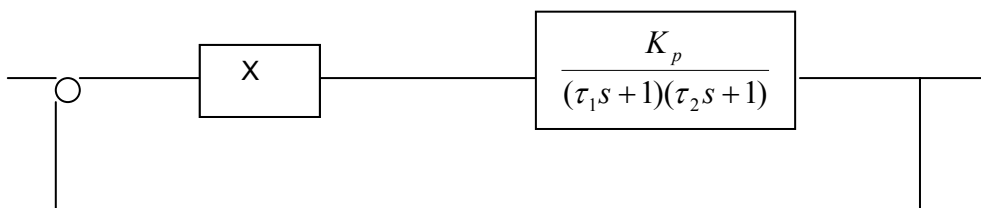


Figura. 54. Diagrama de bloques de un proceso de segundo orden.

$$\frac{X \frac{K_p}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}}{1 + X \frac{K_p}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}} = \frac{1}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$$

$$X = \frac{\delta}{K_p} \frac{1 + \tau_1 s}{\tau_1 s} \frac{1 + \tau_2 s}{1 + \delta \tau_2 s} \quad \text{donde} \quad \delta = \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2}$$

Este es el algoritmo clásico de un controlador, proporcional integral derivativo (PID), por ahora considerando solamente para el caso de primer orden esto es

$$\tau_2 = 0 \quad \text{entonces} \quad X = \frac{1}{K_p} \frac{1 + \tau_1 s}{\tau_1 s}$$

Esto es un controlador PI con la ganancia del controlador fijado como inverso representado por el proceso integrador puro, y es controlado por un controlador

PI. La salida desde el controlador es $m = bias + K_c \left[e + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt \right]$.

Sabemos que m tiene que volver a su posición original, y sabemos que el error desaparecerá eventualmente (teorema de valor final) y por lo tanto la integral debe ser cero. La única manera de que esto pueda suceder es tener que llegar más allá de la respuesta. Si el proceso es $\frac{1}{AGs}$ (G es la constante de

conversión) entonces el circuito cerrado total TF es $\frac{C_1(\tau_i s + 1)}{\tau_i s^2 + C_1 \tau_i s + C_1}$ donde

$C_1 = \frac{K_c}{AG}$. El punto a realizar aquí TF es complicado al analizar, pero con conocimiento sobre el proceso y la ecuación del controlador en el dominio del tiempo, se puede predecir el resultado. El numerador de TF es responsable de llegar más allá. El coeficiente determina cuales son las dos respuestas de TF para su comportamiento esto es relacionado con Z-N.

Para procesos de primer orden,

$$\text{Respuesta} = Y(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}).$$

La máxima cuesta ocurre en $t=0$, $\max \text{cuesta} = \frac{d(\text{respuesta})}{dt}(t=0) = \frac{Y}{\tau}$. La

ganancia del controlador puede estar expresada en unidades ingenieriles (para todo control numérico) en un cambio de radio fraccional o cambio de porcentaje (si la medida y el punto de ajuste están en porcentajes), o si el controlador requiere una banda proporcional. La regla mejor sintonizada puede ser ilustrada por un ejemplo: Considere un lazo de temperatura. A) El transmisor es de 50 a 250 grados Fahrenheit. B) Un cambio de apertura de la válvula desde 60 a 70%, resultando en el cambio de temperatura desde 150 a 190 grados Fahrenheit. C) El proceso de la constante de tiempo es de 3 minutos. (Un primer orden) y un retraso de 10 segundos.

El proceso de cambio es de $(190-150)/(250-50)=0.2$ o 20%. El cambio de apertura de la válvula es 10%. Por lo tanto la ganancia del proceso es 2 El estado contemplado de la ganancia proporcional en cociente de cambio de porcentaje es de $1.2 \cdot \Delta m / (r \cdot L)$. El Δm es el cambio de apertura de la válvula expresada en porcentaje %, el cual es 10. L es tiempo de retraso 10 segundos. R es la máxima cuesta, el cual no puede ocurrir en una prueba verdadera. Aquí se asume que el cambio es una medida en Porcentaje % y es dividida por el cambio en el tiempo. En este caso es $\frac{Y}{\tau} = 20 / (3 \cdot 60)$. Así el aumento proporcional de la ecuación, el cociente del cambio fraccionario es $1.2 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 60 / (20 \cdot 10) = 10.8$. La banda proporcional es simplemente definida como $100 / \text{ganancia proporcional en el cambio de radio fraccional}$, y es $100 / 10.8 = 21.6$. Aquí es definido el factor de amplificación como $AF \cdot 1 / \text{ganancia del proceso} = \text{ganancia proporcional}$, entonces $AF = 2 \cdot 10.8 = 21.6$. este es un factor dimensional después la resintonización del controlador se toma cuidando $(1 / \text{ganancia del proceso})$.



Es el factor usado actualmente para mejorar el funcionamiento de un estado resintonizado. Si utilizamos las unidades de la ingeniería el aumento proporcional se convierte $10.8 \cdot (100/\text{transmisor}) = 10.8 \cdot (100/(250-50)) = 5.4 \%$ de cambio de apertura de la válvula en grados F. La ganancia del proceso es $(190-150)/(70-60) = 4$ grados F/% cambio de apertura de la válvula. Usando la información anterior a recalcular AF tenemos $AF = 4 \cdot 5.4 = 21.6$, los mismos resultados. Estos factores dimensionales siguen siendo invariantes no importando el sistema que se llegue adoptar.

4.3 PID con filtro y el control del proceso de los Multitanques.

Los estudiantes de ingeniería química podrán:

1. Comprender porque un filtro es necesario.
2. Sepa expresar la derivada del bloque con filtro.
3. Comprenda la característica de la acción derivada con el filtro.
4. Simular el bloque derivado.

Procedimiento:

1. Para PID ideal con la derivada en la medida, la ecuación del controlador

$$\text{es : } u = \text{diagonal} + k_c \left[e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt + \tau_d \frac{dm}{dt} \right].$$

2. Si un filtro se agrega a la acción derivada, el diagrama de bloque se convierte.

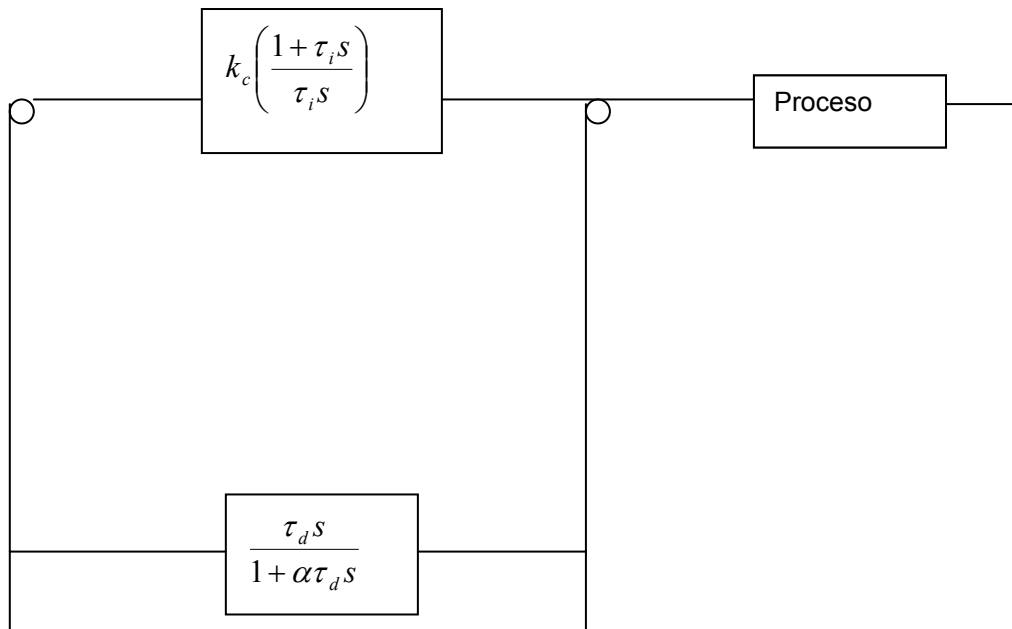


Figura.55. Diagrama de bloque de un controlador PID con filtro de acción derivada.

3. Una entrada de paso al bloque derivado tiene la respuesta siguiente:

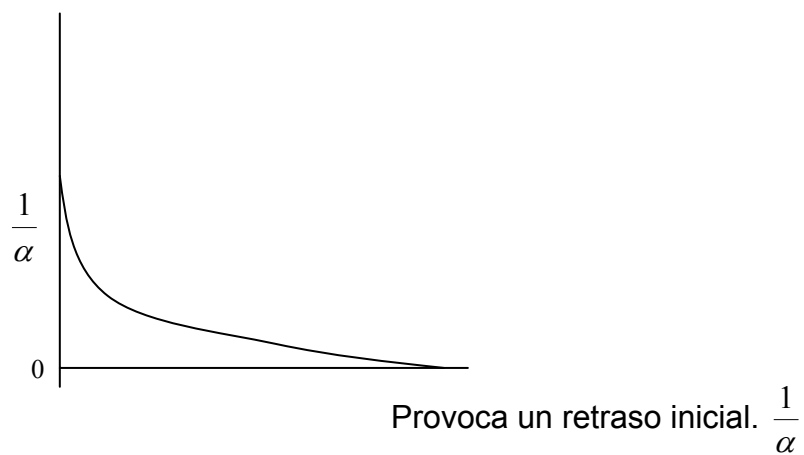


Figura. 56. Respuesta de un retraso inicial.

4. Solucionando queda Salida (s)= $\frac{1}{s} \frac{\tau_d}{1 + \alpha \tau_d s}$. Tomando la inversa de la

transformada de Laplace: Salida(t)= $\frac{1}{\alpha} e^{-\frac{t}{\alpha \tau_d}}$.

5. Para expresar el bloque derivado en el integrador de los términos para la simulación, primero escriba la función de transferencia: $\frac{O}{I} = \frac{\tau_d s}{1 + \alpha \tau_d s}$. O

que se multiplica y que se expresa cruzando en los términos el resto de

los términos: $O = \frac{1}{\alpha} I - \frac{1}{\alpha \tau_d} \frac{1}{s} O$.

Discusión:

1. ¿Por qué cuando se hace la prueba de paso para el tanque 1, tenemos que manipular el control derecho del tanque en el manual? Esto es porque cuando estudiamos los tanques dinámicos izquierdos, necesitamos aislar el resto de influencias y obtener la relación causa y efecto solamente entre el flujo superior izquierdo y el nivel mas bajo del tanque.
2. Cuando se agrega un filtro se agrega un filtro, el ruido se filtra a expensas de la introducción del retraso adicional de la fase.
3. Cuando la filtración aumenta y llega a ser más pesada el retroceso se consigue ser más pequeño.



4. 4 Control adoptivo proporcional integral (PI) de procesos no lineales.

El estudiante de ingeniería química podrá:

1. Manejar un proceso que no sea lineal.
2. Comprender el significado de adaptación.
3. Realice el modelado del proceso, pero, que no este limitado a un sistema FOPDT, generalmente el modelado para sintonización es realmente un ajuste a un FOPDT, esto es principalmente para contemplar reglas que requiere generalmente un FOPDT.

Procedimiento:

1. Utilice el ejemplo de tanques de gravedad y explique que el proceso no es lineal.
2. Con el ejemplo de un tanque drenado por gravedad, dado un aumento del nivel en el tanque, el proceso puede ser calculado linealmente.
3. Dado un nivel en el tanque, la constante de tiempo en el proceso puede ser calculado linealmente, (la interrupción es relacionado con el tiempo).
4. Esta constante de tiempo calculada del proceso puede ser utilizada posteriormente para poder calcular linealmente las constantes de sintonización (aumento en el controlador y tiempo integral).
5. En esta lección es dirigida solamente a los puntos finales que son utilizados para poder obtener un punto de funcionamiento (ahora valor de la medida), este se determina calculando de antemano los ajustes reales de interpolación y extrapolación basados en los puntos finales. Se asume que entre dos puntos finales, el proceso es lineal.



Discusión:

1. ¿Los ajustes para el controlador se ajustan continuamente?. La respuesta es si.
2. Observe en la salida del controlador en lo referente a los niveles de funcionamiento. ¿Cómo puede usted justificar el patrón de cambio?
3. El punto importante en esta lección, es la ganancia en el lazo de control constantemente abierto. Esto es $k_c k_p = \text{constante}$. Ahora es momento de revisar el concepto de ganancia:
 - a. Ganancia estática (k_p) de el proceso es obtenida para dejar $s=0$.
 - b. La amplitud de radio (AR) en Bode's, el diagrama para el proceso es generalmente un AR real (llamada B/A) por k_p , que es adimensional.
 - c. La ganancia dinámica, también se sabe que AR, para este proceso, es determinado por $AR = \frac{B}{A} \frac{1}{k_p}$. La ganancia dinámica no puede ser sintonizada.
 - d. Para la estabilización, el aumento estático en el lazo de control abierto máximo permitido. Localice el punto en el diagrama del ángulo de la fase de todos los elementos dinámicos (sin los aumentos estáticos) donde la curva se cruza sobre los 180° grados. AR se encuentra en frecuencia multiplicada por todas las ganancias estáticas para poder asegurar estabilidad. Cuando es igual a uno, el sistema de circuito cerrado esta en el borde de ser inestable, esto rendirá el aumento estático máximo a razón de la unidad sinusoidal no debe ser amplificada. Así máximo de (toda ganancia estática) * (toda la ganancia dinámica) en -180° grados.

$$= 1. \text{ máxima de (toda ganancia estática)} = \frac{1}{AR_{-180\text{GRADOS}}}.$$

Esta ecuación se puede utilizar para calcular el aumento máximo, si son procesos de ganancia estática.

- e. Considere físicamente una frecuencia sinusoidal en la frecuencia resonante (también llamado crítico) que entra en el sistema para cierta cantidad de tiempo en que la oscilación será sostenida en esta magnitud y la frecuencia solamente cuando el aumento estático total mide el tiempo, el aumento dinámico es uno.
- f. El margen del aumento (GM) es obtenido midiendo a partir del punto en el diagrama de la magnitud (en la frecuencia donde el ángulo de la fase se cruza en la línea de los -180 grados) lejos del eje $AR=1$.
- g. Otra manera de obtener estabilidad es el ángulo de fase (PM). PM y GM coexisten. Cuando GM es cero, PM también es cero.
- h. Fije la ganancia proporcional a $\frac{1}{k_p}$ para la base de la línea que sintoniza de modo que cualquier amplificación sea adimensional , separaremos la ganancia en dos factores para saber el factor de amplificación del controlador $* \frac{1}{k_p}$
- i. El aumento del proceso estático se puede encontrar por medio de la prueba de paso.
- j. La ganancia es un cociente de cambio fraccionario, que conduce a la definición de banda proporcional en un sistema escalado.



- k. Podemos convertir el sistema escalado al sistema de la ingeniería como se demostró en el ejemplo anterior de Z-N que sintoniza el factor de amplificación sin cambios para ambos sistemas.
 - l. El aumento en el controlador es igual para la salida absoluta e incremental (discutida bajo control numérico).
4. Discuta cualquier pregunta que tenga en las lecciones anteriores.



Conclusiones.

En base a los principios y conceptos que se fundamentan dentro de la dinámica y control de procesos, se desarrollo el prototipo para la dinámica y control de procesos a nivel laboratorio, dentro de la planta piloto de la FES ZARAGOZA, con la principal finalidad de la enseñanza, aplicación y modelado, que son relevantes para la operación del prototipo, cumpliendo satisfactoriamente uno de los principales objetivos del presente trabajo.

En el prototipo para la dinámica y control de procesos se logran identificar los principios y conceptos teóricos, aplicando modelos físicos y matemáticos que permiten al estudiante de ingeniería química el fortalecer la comprensión del tema y el logro de aprendizaje de manera significativa.

El prototipo esta diseñado específicamente para la operación de sistemas (SISO) una simple entrada – una simple salida, sistemas (MIMO) múltiples entradas – múltiples salidas, empleando el proceso capacitivo puro y de retraso lineal y combinaciones de ambos procesos, permitiendo la operación del prototipo de manera individual de cada proceso ó de manera conjunta manejando ambos procesos con diferente tipo de sistemas, logrando el objetivo satisfactoriamente con el diseño y construcción del prototipo que permite la operación de los procesos antes mencionados.



Se analizó si existen prototipos alternos que involucren este tipo de sistemas y los operen de manera conjunta, el prototipo para la dinámica y control de procesos cuenta con un diseño auténtico, que no está basado en algún otro prototipo alterno que manejen este tipo de sistemas.

Además determinando que información es relevante en el proceso experimental para poder operar y analizar el prototipo de una manera óptima, la percepción que se logra en el estudiante de ingeniería química, es la importancia del desarrollo de un modelo matemático pudiendo además llevar a cabo una simulación del modelo por medio de un software, permite obtener un tipo de respuesta adecuado del sistema como una vía para poder diseñar los sistemas de control, de esta manera se logran alcanzar satisfactoriamente los objetivos establecidos para el presente trabajo.



Bibliografía:

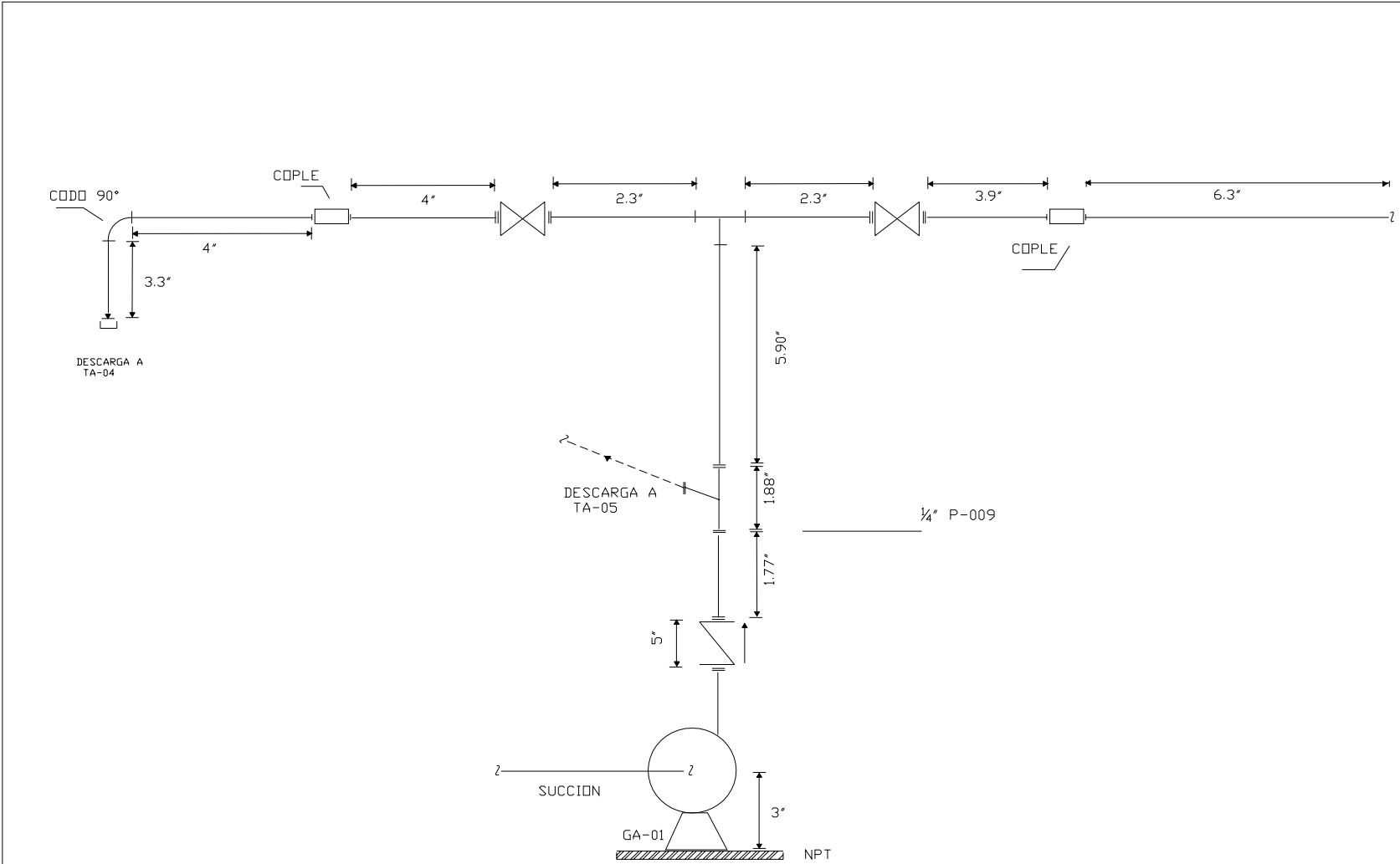
1. Babatunde A. Ogunnaike. W. Hannen Ray. "Process Dynamics, Modeling, and Control". New York Oxford. Oxford University Press Inc. USA. 1994.
2. George Stephanopoulos. "Chemical Process Control". Prentice Hall Inc. USA. 1984. 645 pp.
3. Kuo C. Benjamín. Sistemas de Control Automático. Séptima Edición. Prentice Hall Hispanoamericana. México. 1996.
4. Perry J.H. Chemical Engineers Handbook. Mc Graw Hill, México 1992.
5. Ogata Katsuhiko."Ingeniería de Control Moderna". Tercera Edición. Prentice Hall Hispanoamericana. México. 1998. 997 pp.
6. Ludwig. Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants. Gulf publishing company. 1965.
7. Crane, "Flujo de Fluidos en válvulas, accesorios y tuberías" McGraw Hill, México 1989.
8. Smith A. Carlos. "Control Automático de Procesos". Editorial Limusa. México. 1991. 717 pp.
9. Levenspiel Octave, "Flujo de Fluidos e Intercambio de Calor", Ed. Reverté, España 1996.
10. Wilkes, James O., "Fluid Mechanics for Chemical Engineers" Prentice Hall, Inc., USA 1999, p.599.



11. Tyler G., Hicks, B.M.E. Bombas, su selección y aplicación” CECSA, México 1990, p. 530.
12. Streeter.L.Victor, Mecánica de los Fluidos. Mc Graw Hill, Japón 1975, p. 752.
13. Sissom, Leighton E., “Elements of Transport Phenomena”, McGraw Hill, Inc, Kogakusha, Ltd. Japan, 1972, p.814.



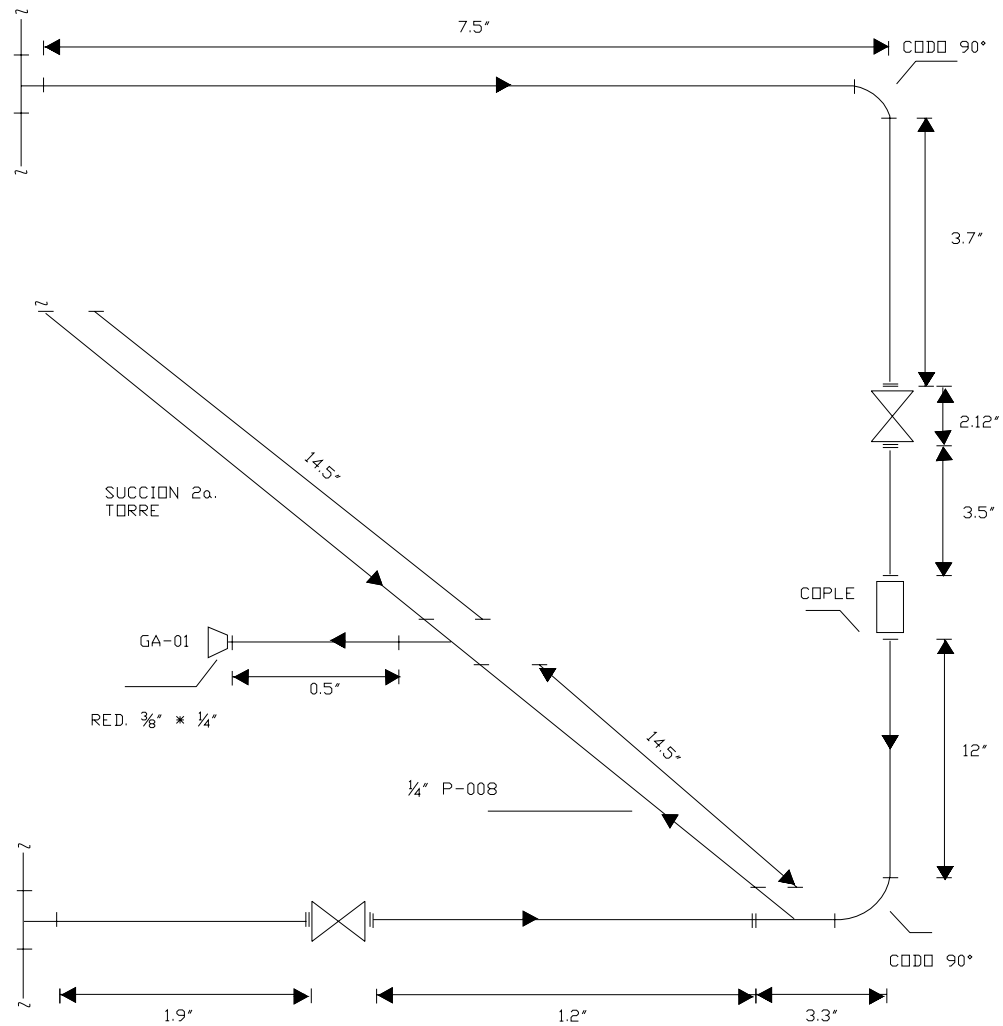
Anexo de Planos de Prototipo de Dinámica y Control de Procesos.



AREA "C"

PARTIDA	IDENTIFICACION	CANT. POR TAMARO				
		1/4"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"
TUBO	PVC	CED. - 40	9			
VALVULAS	DE PASO		2			
	CHECK		1			
CONEXIONES	CED.-40	CODO 90°	1			
	CED.-40	TE RECTA	2			
MISC.	1	BOMBA TIPO MAGNETICO GA-01 LC-2CP-MD				
	2	COUPLE SLIP/ROSCABLE CED.-40 PVC				
EMPAQ.						

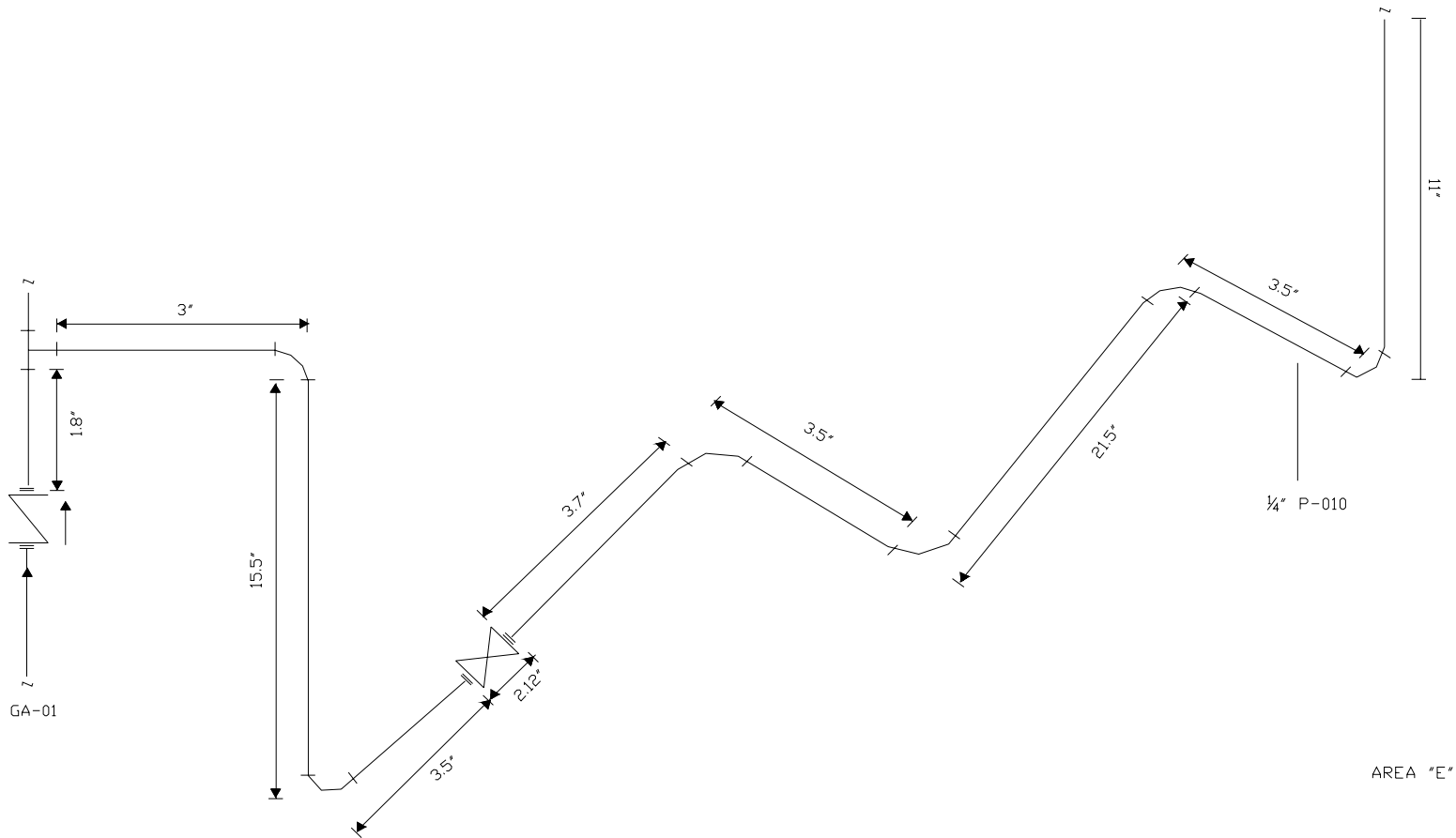
LINEAS INCLUIDAS		NOTAS:								UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA.		
¼" P-009		ELEVACIONES EN PULGADAS (in)	APROBADO PARA CONSTRUCCION	RGR.					ISOMETRICO DE TUBERIA. PROTOTIPO DE DINAMICA Y CONTROL DE PROCESOS.			
			DESCRIPCION	DIB.						ACOT. EN: in.	DIB. No. 03	HOJA 1 DE 1



AREA "D"

PARTIDA	IDENTIFICACION	CANT. POR TAMAÑO				
		1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"
TUBO	PVC	CED. - 40	7			
VALVULAS	DE PASO		2			
CONEXIONES	CED.-40	CODO 90°	2			
	CED.-40	TE RECTA	4			
MISC.	1	RED. 3/8" x 1/4" PVC				
	1	COUPLE SLIP/ROSCABLE CED.-40 PVC				
EMPAQ.						

LINEAS INCLUIDAS		NOTAS:	RAMAL DE SUCCION								UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES. ZARAGOZA.			
¼" P-008		ELEVACIONES EN PULGADAS (in)	APROBADO PARA CONSTRUCCION		RGR.						ISOMETRICO DE TUBERIA. PROTOTIPO DE DINAMICA Y CONTROL DE PROCESOS.			
			DESCRIPCION		DIB.						ACOT. EN: in.	DIB. No. 04	HOJA 1 DE 1	



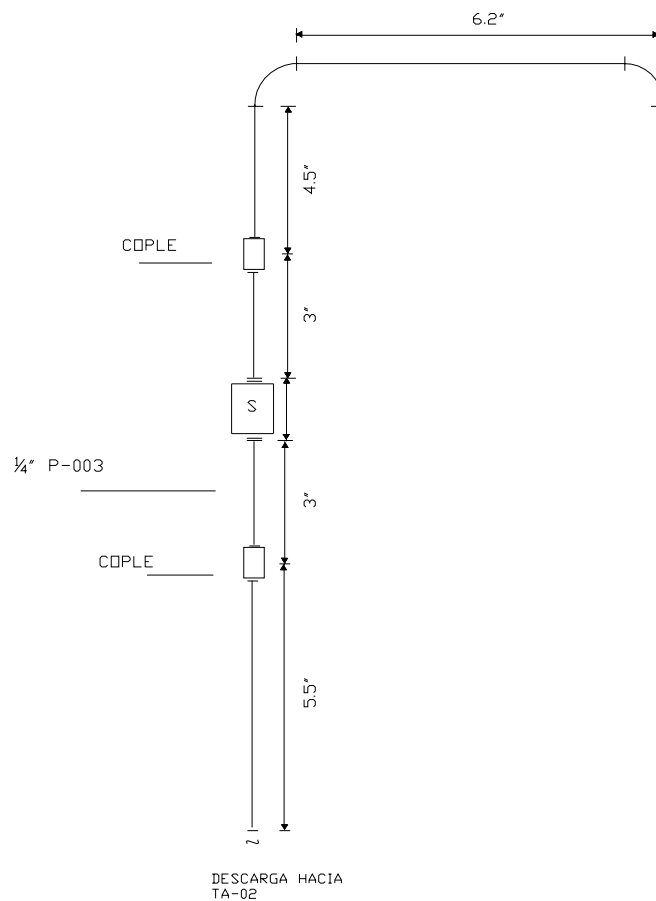
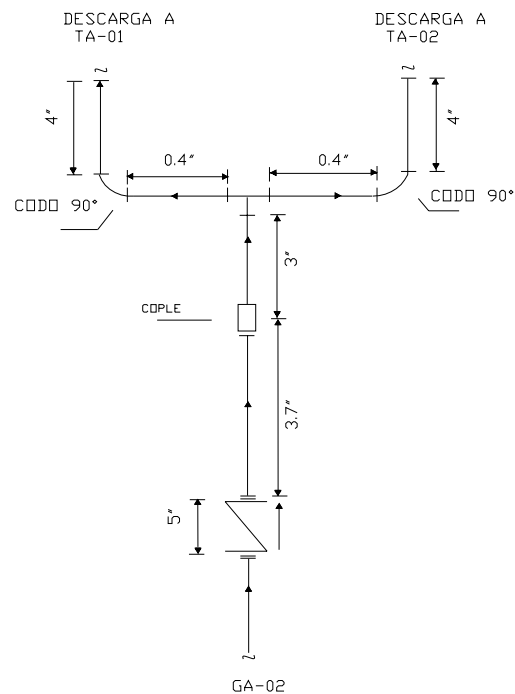
PARTIDA		IDENTIFICACION	CANT. POR TAMAÑO					
			1/4"					
TUBO	PVC	CED. - 40	11					
VALVULAS	DE PASO		1					
	CHECK		1					
CONEXIONES	CED.-40	CODO 90°	8					
	CED.-40	TE RECTA	1					
MISC.								
EMPAQ.								

LINEAS INCLUIDAS		NOTAS:							UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES. ZARAGOZA.		
¼" P-010		ELEVACIONES EN PULGADAS (in)	APROBADO PARA CONSTRUCCION	RGR.					ISOMETRICO DE TUBERIA. PROTOTIPO DE DINAMICA Y CONTROL DE PROCESOS.		
			DESCRIPCION	DIB.					ACOT. EN: in.	DIB. No. 05	HOJA 1 DE 1



PARTIDA	IDENTIFICACION	CANT. POR TAMAÑO					
		1/4"					
TUBO	PVC	CED. - 40	5				
VALVULAS							
CONEXIONES	CED.-40	CODO 90°	4				
MISC.	1	RED. 3/8" x 1/2" PVC					
	1	CODPLE ROSCABLE/SLIP 1/4" PVC					
	1	TANQUE DE ACRILICO 10"x8" TA-05					
EMPAQ.							

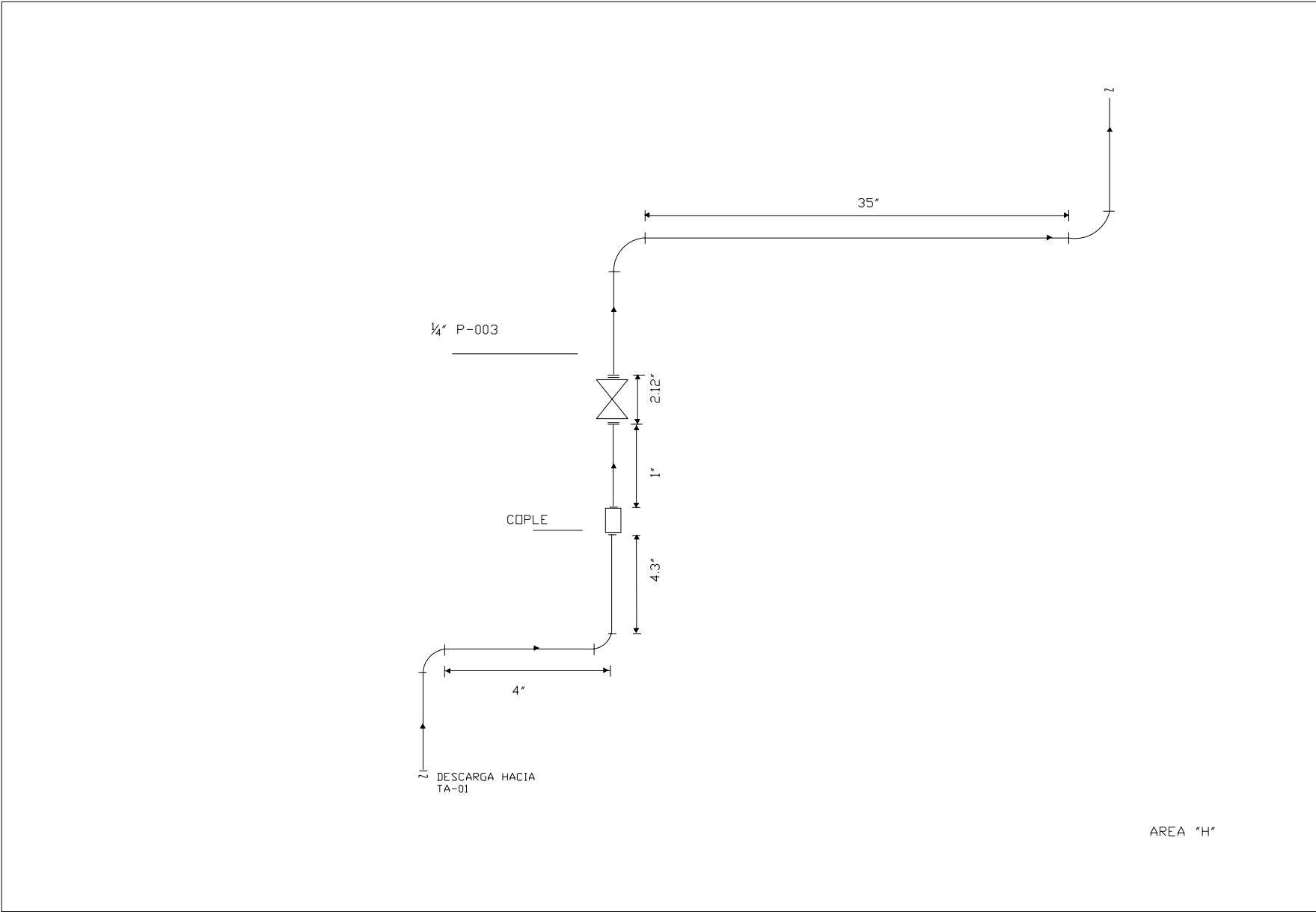
LINEAS INCLUIDAS		NOTAS:							UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES. ZARAGOZA.		
¼" P-002		ELEVACIONES EN PULGADAS (in)	APROBADO PARA CONSTRUCCION	RGR.					ISOMETRICO DE TUBERIA. PROTOTIPO DE DINAMICA Y CONTROL DE PROCESOS.		
			DESCRIPCION	DIB.						ACOT. EN: in.	DIB. No. 06



AREA "G"

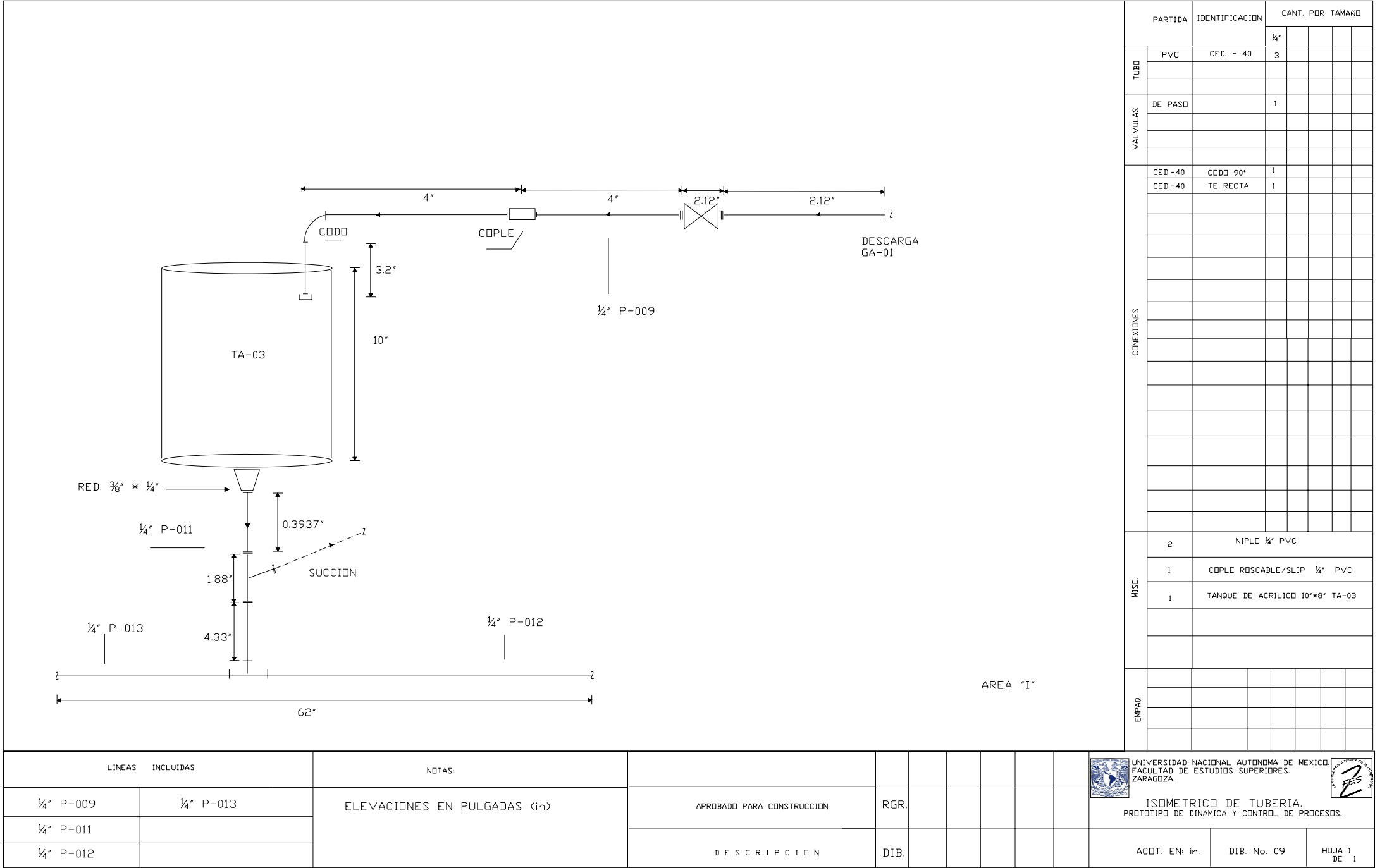
PARTIDA	IDENTIFICACION	CANT. POR TAMAÑO				
		1/2"				
TUBO	PVC	CED. - 40	7			
VALVULAS	CHECK		1			
	SOLEN.	S	1			
CONEXIONES	CED.-40	CODO 90°	4			
	CED.-40	TE RECTA	1			
MISC.	2	NIPLE 1/4" PVC				
	3	COBLE ROSCABLE/SLIP 1/4" PVC				
EMPAQ.						

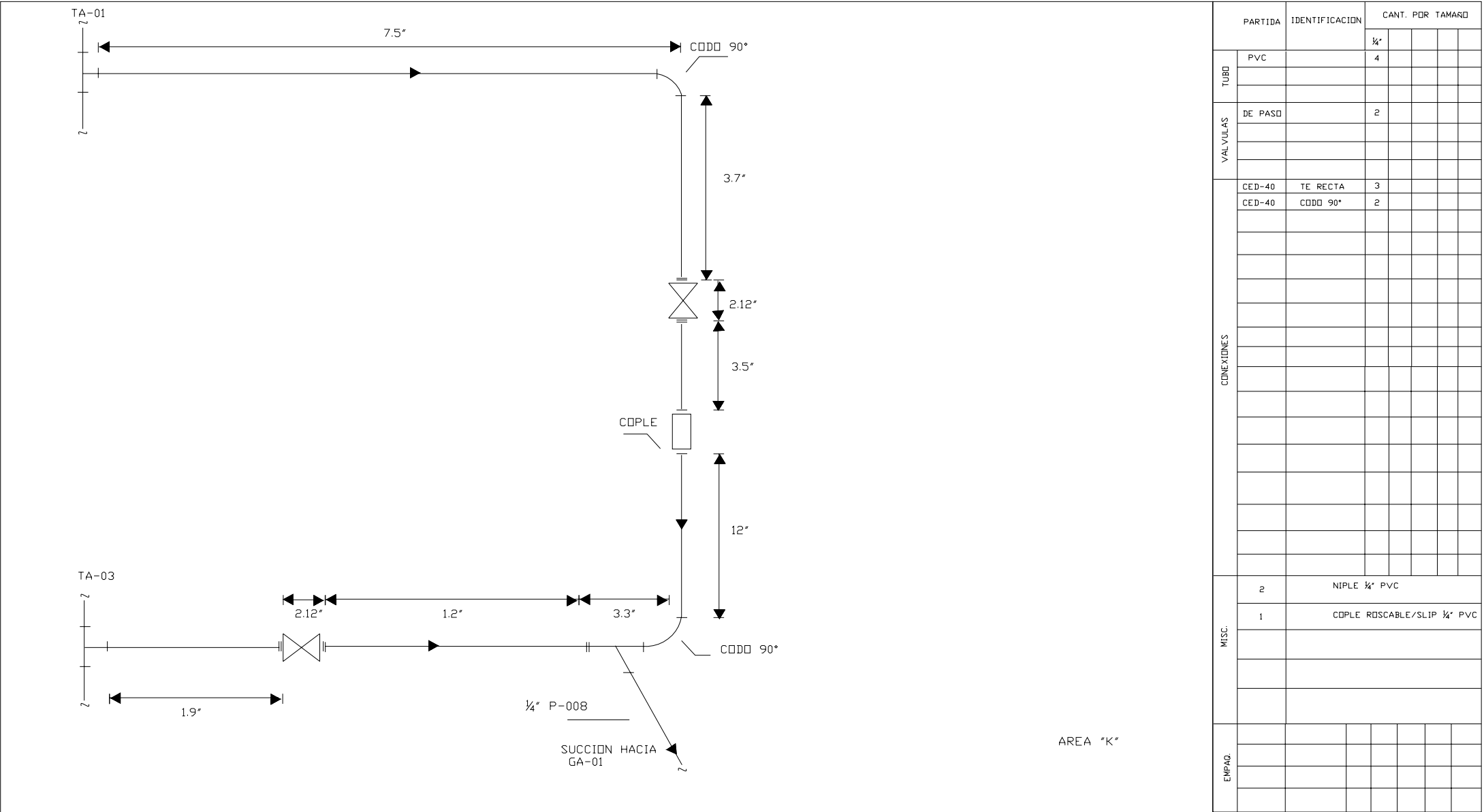
LINEAS INCLUIDAS		1/4" P-009 NOTAS:								
1/4" P-003		ELEVACIONES EN PULGADAS (in)	APROBADO PARA CONSTRUCCION		RGR.					 UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES. ZARAGOZA.  ISOMETRICO DE TUBERIA. PROTOTIPO DE DINAMICA Y CONTROL DE PROCESOS.
			DESCRIPCION		DIB.					
										ACOT. EN: in. DIB. No. 07 HOJA 1 DE 1



PARTIDA	IDENTIFICACION	CANT. POR TAMAÑO				
		1/4"				
TUBO	PVC	CED. - 40	3			
VALVULAS	DE PASO		1			
CONEXIONES	CED.-40	CODO 90°	4			
MISC.	2	NIPLE 1/4" PVC				
	1	COPLE ROSCABLE/SLIP 1/4" PVC				
EMPAQ.						

LINEAS INCLUIDAS		NOTAS:								UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA.			
¼" P-003		ELEVACIONES EN PULGADAS (in)	APROBADO PARA CONSTRUCCION	RGR.					ISOMETRICO DE TUBERIA. PROTOTIPO DE DINAMICA Y CONTROL DE PROCESOS.				
			DESCRIPCION	DIB.						ACOT. EN: in.	DIB. No. 08	HOJA 1 DE 1	





PARTIDA	IDENTIFICACION	CANT. POR TAMAÑO					
		1/4"					
TUBO	PVC	4					
VALVULAS	DE PASO	2					
CONEXIONES	CED-40 TE RECTA	3					
	CED-40 CODO 90°	2					
MISC.	2	NIPLE 1/4" PVC					
	1	COUPLE ROSCABLE/SLIP 1/4" PVC					
EMPAQ.							

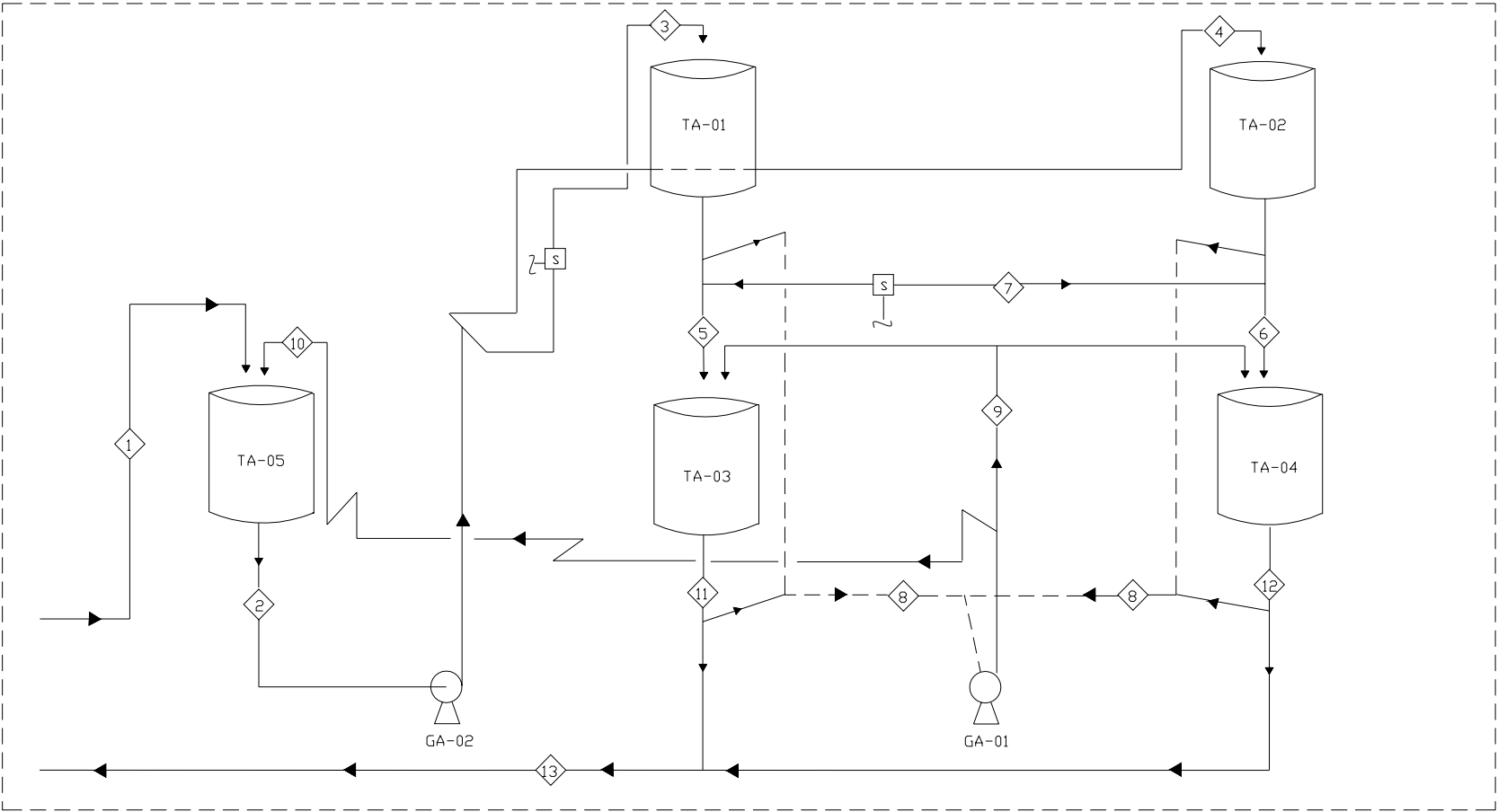
LINEAS INCLUIDAS		NOTAS:								UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES. ZARAGOZA.					
¼" P-008			ELEVACIONES EN PULGADAS (in)							ISOMETRICO DE TUBERIA. PROTOTIPO DE DINAMICA Y CONTROL DE PROCESOS.					
			APROBADO PARA CONSTRUCCION		RGR.										
			DESCRIPCION		DIB.								ACOT. EN: in.	DIB. No. 11	HOJA 1 DE 1

TABLA DE BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA													
C. PRINCIPALES/PARAMETROS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
FLUJO ft^3/seg	0.01081	0.00364	0.000915	0.000915	0.00337	0.00337	0.00281	0.00190	0.01081	0.01081	0.01267	0.01267	0.02534
TEMPERATURA $^{\circ}F$	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77
DENSIDAD	0.9993	0.9993	0.9993	0.9993	0.9993	0.9993	0.9993	0.9993	0.9993	0.9993	0.9993	0.9993	0.9993
FASE $\langle L, V, G \rangle$	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L

LISTA DE EQUIPO.

CLAVE EQUIPO

TA-01 T. ALMACENAMIENTO TEMP.
TA-02 T. ALMACENAMIENTO TEMP.
TA-03 T. ALMACENAMIENTO TEMP.
TA-04 T. ALMACENAMIENTO TEMP.
TA-05 T. ALMACENAMIENTO TEMP.
GA-01 B. TIPO MAGNETICA
GA-02 B. TIPO MAGNETICA



DIBUJOS DE REFERENCIA	REV.	DESCRIPCION	DIB.	DIS.	GTE. INGRÍA.	GTE. PROY.	FECHA	PROTOTIPO DE DINAMICA Y CONTROL DE PROCESOS.				UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA.	
		APROBADO PARA CONSTRUCCION	RGR.									DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO. DFP-001	
												DIBUJO No. 01	
												REV. 01	

