

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE VALENCIA

PROYECTO FINAL DE MÁSTER

*Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio
Ambiente.*

Sintonización mediante formulación teórica del regulador PID para el control del nivel de agua en depósitos que alimentan aducciones de gran longitud.

Autor: Burgos Geovanny Gordillo Guambaña

Director: Vicent Espert Alemany

CURSO: 2012-2014

Contenido

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Importancia del control de nivel de un depósito.....	2
1.2 Allievi	4
1.3 Objetivos.....	6
Capítulo 2. Marco teórico.....	8
2.1 Sistemas de control	9
2.2 Componentes básicos de un sistema de control.....	9
2.2.1 Elementos de un sistema de control	10
2.2.2 Señales principales	11
2.3 Ventajas de los sistemas de control	12
2.4 Tipos y clasificación de los sistemas de control	13
2.4.1 Sistemas de control en lazo abierto	13
2.4.2 Sistemas de control en lazo cerrado o realimentados	13
2.4.3 Comparación entre sistemas en lazo abierto y lazo cerrado.....	14
2.5 Que es realimentación y cuáles son sus efectos.....	15
2.5.1 Efecto de la realimentación en la ganancia global	15
2.5.2 Efecto de la realimentación en la estabilidad	15
2.5.3 Efecto de la realimentación en la sensibilidad.....	15
2.5.4 Efecto de la realimentación sobre perturbaciones externas o ruido	16
2.6 Sistemas de control lineal y no lineal	16
2.7 Consideraciones sobre el diseño y acciones básicas de control.....	18
2.7.1 Ondas de prueba empleadas en los sistemas de control	20
2.8 Transformada de Laplace.....	22
2.8.1 Transformada de Laplace de algunas funciones.....	24
2.8.2 Propiedades de la transformada de Laplace	24
2.8.3 Transformada inversa	25
2.9 Linealización y variables de desviación	26
2.10 Función de transferencia.....	30
2.10.1 Polos y ceros.....	31

2.11	Controlador o regulador.....	32
2.11.1	Regulador o regulador PID.....	33
2.12	Nota sobre la señal de error o desviación	35
2.13	Modelos mediante diagrama de bloques.....	37
2.13.1	El diagrama de bloques.....	37
2.13.2	Reducción de diagramas de bloques.....	38
2.13.3	Reglas algebraicas	39
Capítulo 3.	METODOLOGÍA.....	42
3.1	El proceso de diseño	43
3.2	Funciones de transferencia en el control de nivel del tanque frente a los cambios de entrada y los cambios en la apertura de la válvula.....	46
3.2.1	Obtención de la función de transferencia del controlador (regulador).....	53
3.2.2	Función de transferencia del error	53
3.3	Método analítico para el diseño de controladores PID-PI.	58
3.4	Cálculo y diseño de los diferentes parámetros del sistema.....	58
3.4.1	Diseño del controlador PI.	60
3.4.2	Obtención de la ecuación ht (cota del agua en el depósito)	64
3.4.3	Obtención de la ecuación $\tau(s)$ (grado de apertura).....	67
Capítulo 4.	Comparación y discusión con Allievi.....	71
4.1	Descripción del sistema en estudio.....	72
4.2	Parada y arranque programada a válvula abierta de la estación de bombeo de Moixent.....	74
4.3	Arranque y parada programada a válvula cerrada del grupo de bombeo de Moixent.....	81
4.4	Parada accidental y arranque programado de las bombas a válvula abierta.....	88
Capítulo 5.	Conclusiones y Recomendaciones	96
5.1	Conclusión.	97
5.1.1	Recomendaciones	98
	Bibliografía.....	99

Índice de figuras

FIG. 2-1 RELACIÓN BÁSICA DE LOS COMPONENTES	10
FIG. 2-2 ELEMENTOS Y SEÑALES DE UN SISTEMA DE CONTROL	11
FIG. 2-3 SISTEMA DE CONTROL DE LAZO ABIERTO	13
FIG. 2-4 SISTEMA DE CONTROL EN LAZO CERRADO.....	14
FIG. 2-5 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA NO LINEAL	17
FIG. 2-6 ESTRUCTURA PARA EL CONTROL DE UN PROCESO.....	19
FIG. 2-7 ESTRUCTURA PARA EL CONTROL DE UN PROCESO CON LA INCLUSIÓN DE UN REGULADOR	19
FIG. 2-8 PROCESO DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL.....	20
FIG. 2-9 ONDAS DE PRUEBA EMPLEADAS EN LOS SISTEMAS DE CONTROL.....	22
FIG. 2-10 DEFINICIÓN DE LA VARIABLE DE DESVIACIÓN.....	27
FIG. 2-11 LA APROXIMACIÓN LINEAL ES TANGENTE A LA FUNCIÓN EN EL PUNTO DE OPERACIÓN.....	29
FIG. 2-12 UN PID CALCULA SU ACCIÓN DE CONTROL BASÁNDOSE EN LOS ERRORES DE CONTROL PASADO, PRESENTES Y FUTUROS	33
FIG. 2-13 FORMA NO INTERACTUANTE	35
FIG. 2-14.....	37
FIG. 2-15A.....	38
FIG. 2-16B.....	38
FIG. 3-1 PROCESO DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL.....	43
FIG. 3-2 SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL	44
FIG. 3-3 DIAGRAMA FUNCIONAL DEL NIVEL EN UN DEPÓSITO.....	44
FIG. 3-4 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO	45
FIG. 3-5 AJUSTE VÁLVULA DE GUILLOTINA	48
FIG. 3-6 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL ACTUADOR, PLANTA Y PERTURBACIÓN	53
FIG. 3-7 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL REGULADOR PID.....	53
FIG. 3-8 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL ERROR	54
FIG. 3-9 DIAGRAMA DE BLOQUES GENERAL DEL CONTROL DE NIVEL DE UN PROCESO CON PERTURBACIÓN.....	54
FIG. 3-10 DIAGRAMA DE BLOQUES EQUIVALENTE PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL DE UN DEPÓSITO	55
FIG. 3-11 DIAGRAMA DE BLOQUES EN FUNCIÓN DEL CAUDAL DE ENTRADA.....	55
FIG. 3-12 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ENTRADA- SALIDA	56
FIG. 3-13 DIAGRAMA DE BLOQUES DE T(S).....	56
FIG. 3-14 LUGAR DE LAS RAÍCES	63
FIG. 4-1 REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA EN ALLIEVI.....	73
FIG. 4-2 COTA DE AGUA EN EL DEPÓSITO DE RAMBLAR (CASO 1)	76
FIG. 4-3 NIVEL DE AGUA EN EL DEPÓSITO DE RAMBLAR (CASO 1)	78
FIG. 4-4 GRADO DE APERTURA DE LA VÁLVULA DE GUILLOTINA (CASO 1)	78
FIG. 4-5 EVOLUCIÓN DE AGUA DENTRO DEL CALDERÍN (CASO 1)	80
FIG. 4-6 CAUDAL SALIDA AL DEPÓSITO DE RAMBLAR (CASO 1)	81
FIG. 4-7 CAUDAL ENTRADA AL DEPÓSITO DE RAMBLAR (CASO 1).....	81
FIG. 4-8 EVOLUCIÓN DE LA COTA DE AGUA EN EL DEPÓSITO A VÁLVULA CERRADA.....	83
FIG. 4-9 REPRESENTACIÓN DEL NIVEL A VÁLVULA CERRADA.....	84
FIG. 4-10 REPRESENTACIÓN DEL GRADO DE APERTURA A VÁLVULA CERRADA.....	85
FIG. 4-11 REPRESENTACIÓN DEL GRADO DE APERTURA A VÁLVULA CERRADA CON ALIMENTACIÓN SUPERIOR.....	86
FIG. 4-12 EVOLUCIÓN DEL AGUA EN EL CALDERÍN A VÁLVULA CERRADA.....	86

FIG. 4-13 EVOLUCIÓN DEL NIVEL DE AGUA EN EL DEPÓSITO CON ALIMENTACIÓN POR LA PARTE INFERIOR (CASO 2).	87
FIG. 4-14 EVOLUCIÓN DE LA SALIDA DE CAUDAL EN EL DEPÓSITO DE RAMBLAR A VÁLVULA CERRADA.	88
FIG. 4-15 EVOLUCIÓN DE LA ENTRADA DE CAUDAL EN EL DEPÓSITO DE RAMBLAR A VÁLVULA CERRADA.....	88
FIG. 4-16 EVOLUCIÓN DE LA COTA DE AGUA EN EL DEPÓSITO (CASO 3).....	90
FIG. 4-17 EVOLUCIÓN DEL NIVEL DE AGUA EN EL DEPÓSITO (CASO 3)	90
FIG. 4-18 GRADO DE APERTURA DE LA VÁLVULA MOTORIZADA (CASO 3).....	91
FIG. 4-19 COMPORTAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN (CASO 3).....	92
FIG. 4-20 CAUDAL DE SALIDA EN EL DEPÓSITO DE RAMBLAR (CASO 3).....	93
FIG. 4-21 CAUDAL DE ENTRADA EN EL DEPÓSITO DE RAMBLAR (CASO 3).	93
FIG. 4-22 EVOLUCIÓN DE LA PRESIÓN DEL NUDO NV06 (CASO 3).....	94

Índice de tablas

TABLA 3-1 CARACTERÍSTICAS DE LA VÁLVULA	48
TABLA 3-2 VARIABLES DEL DEPÓSITO DE RAMBLAR	
TABLA 3-3 VARIABLES TUBERÍA 1.....	58
TABLA 3-4 VARIABLES TUBERÍA 2	
TABLA 3-5 VARIABLES DE SALIDA	58
TABLA 4-1 PARADAS Y ARRANQUES DE LOS GRUPOS DE BOMBEO CON IMPOSICIÓN EN LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN	75
TABLA 4-2 REPRESENTACIÓN DE VÁLVULAS ABIERTAS	75
TABLA 4-3 PARÁMETROS DEL REGULADOR PI	76
TABLA 4-4 MANIOBRAS DE LA VÁLVULA DE REGULACIÓN (CASO 2)	82
TABLA 4-5 PARADAS Y ARRANQUES DE LOS GRUPOS DE BOMBEO CON IMPOSICIÓN EN LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN (CASO 2)	83
TABLA 4-6 CUADRO DEL GRUPO DE BOMBEO EN MARCHA (CASO 3)	89
TABLA 4-7 TABLA DE PARADA Y ARRANQUE DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO MOIXENT (CASO 3).....	89
TABLA 4-8 VELOCIDADES DE LOS DIFERENTES TRAMOS DEL SISTEMA (CASO 3)	92

Capítulo 1.

Introducción

1.1 Importancia del control de nivel de un depósito.

El control de los sistemas de abastecimiento de agua es cada vez más importante para optimizar su gestión; mecanismos como una regulación automática son implementados con el fin de mejorar el funcionamiento de la instalación. Los retos para los sistemas de abastecimientos de agua urbano consiste en garantizar la cantidad de agua necesaria debido al aumento de la población y por aumento de la demanda, así como la de garantizar la calidad requerida para los distintos usos. En un futuro deberán entrar en juego nuevos sistemas en donde la eficiencia y eficacia sean requerimientos claves para los abastecimientos de agua potable; así estrategias como las que citaremos a continuación serán necesarias efectuarlas.

- Empleo de sistemas de bajo costo y bajo consumo energético.
- Empleo de sistemas tendentes a la reducción de consumos.
- Independizar los consumos, en función de la calidad requerida en cada uso.
- Sistemas de automatización que regulen las posibles variaciones en el sistema, para prevenir afecciones en su entorno.

Los elementos hidráulicos en una red se pueden clasificar en dos categorías: activos y pasivos. Los elementos activos son bombas, válvulas, controladores (PID), turbinas, etc. los cuales pueden ser operados para controlar el flujo o la presión de agua en zonas específicas. Las tuberías y depósitos son elementos pasivos, en la medida que reciben los efectos de la operación de los elementos activos, en términos de presión y de flujo; pero sobre dichos elementos no se pueden actuar directamente.

Un sistema de control de supervisión en una red de agua generalmente incluye un sistema de telemetría que actualiza periódicamente algo de información a partir de un conjunto seleccionado de elementos pasivos y de la mayoría de los elementos activos, esta información se compone frecuentemente de la presión, lecturas de flujo y nivel, así como el estado de los elementos activos, los cuales reflejan la condición de funcionamiento instantáneo de la red de agua. Además y muy importante existen mecanismos para accionar los elementos activos (sensores, PID) en la red para controlar su rendimiento. Sin embargo es una tarea difícil derivar las estrategias de control apropiadas para los elementos activos, con el fin de utilizar los recursos de manera eficiente y cumplir a cabalidad con los requisitos; como por ejemplo una presión específica, o como el control de nivel en un depósito.

El control óptimo en redes de agua aborda el problema de la generación de estrategias de control antes de tiempo, para garantizar un buen servicio en la red; con lo que de esta manera ciertos objetivos de rendimiento en el sistema se logrará de acuerdo con la necesidades de una utilidad específica como es: una reducción al mínimo de la oferta y los

costos de bombeo, la maximización de la calidad del agua, regulación de depósitos para mantener su nivel constante y en otros aspectos para la prevención de fugas, etc.

Es por ello que existe la necesidad de crear, modelar y simular sistemas de abastecimiento de agua, de manera que su comportamiento pueda ser plenamente comprendido y la totalidad del proceso optimizado. Ilyas Eker y Togay Kara (2002), describen una operación y control de un sistema de suministro de agua en donde en el modelo hidráulico el acoplamiento no lineal es incluido, entre la velocidad del flujo y el depósito de cabecera; en el diseño del controlador de nivel de agua utilizan el método de optimización robusta H, en donde la naturaleza de las perturbaciones y cargas son consideradas. La realimentación en el diagrama de regulación de control es necesaria para proveer una operación más estable y mejorar los márgenes de robustez.

La velocidad de una de las bombas es manipulada para el control de nivel de cabecera, porque manipular la velocidad de las tres bombas simultáneamente tiene un costo elevado que el de la velocidad de una sola bomba, y la mayoría de sistemas de suministro de agua trabajan de esta manera en Alemania, reduciendo el costo de operación y ahorro de Kwh de electricidad por día; además este controlador es diseñado para eliminar perturbaciones de bajas frecuencias y atenuar perturbaciones de altas frecuencias y medidas del ruido, la acción integral es requerida en el regulador para eliminar el error en estado estacionario. Este estudio reveló el comportamiento dinámico y las interacciones entre los elementos pasivos y activos presentes en los sistemas de abastecimiento.

Dewis Jones (2008) amplían nuestro entendimiento de como el sistema hidráulico y eléctrico propuesto afecta la respuesta dinámica de la planta, mediante un paquete de simulación genérico; de entre los puntos importantes de su estudio es el desarrollo del regulador PID, su sintonización es con reglas estándares basado en el modelo lineal, de esta manera el método de sistema de control clásico puede ser aplicado para ajustar un controlador básico, el resultado es integrado con el modelo hidráulico turbina /generador.

Mediante la representación de un diagrama de bloques en simulink para el sistema linealizado SISO (planta) y el regulador, sintonizan las ganancias K_p , K_i y K_d para de esta manera satisfacer la respuesta en circuito cerrado, aplicando las reglas propuestas por Hagihara.

Petr Chalupa y Jakub Novák (2013), realizan su modelación y control de un sistema hidráulico de tres tanques considerando las no linealidades presentes en instalaciones reales, las cuales son identificadas e incluidas en el modelo matemático final. Un PID óptimo y un modelo de control predictivo son propuesto y comparados en el entorno de simulink.

En el modelo ideal planteado el flujo a través de la válvula depende solamente del nivel de referencia, mientras que en el modelo mejorado la válvula fue cerrada parcialmente a

diferentes posiciones al comienzo del experimento. Una relación entre la posición y un valor k se obtuvo, el término inercial presente en tuberías de gran longitud no está presente en este modelo. Por lo tanto considerando estas características físicas en el sistema se alcanza un mejor método de optimización usando el controlador predictivo no lineal cuyas técnicas pueden ser fácilmente generalizados a un amplio conjunto de sistemas hidráulicos.

I. Boiko (2013) presenta un regulador PID de estructura variable para controlar el nivel del proceso con una metodología de análisis de estabilidad y desempeño. Normalmente el nivel es regulado por un controlador PID o PI los cuales pueden ser implementados como parte del sistema de control distribuido para lograr estabilizar el caudal de salida, los controladores son sintonizados de acuerdo a los métodos y técnicas establecidos (Astrom & Hagglund, 1984,1995; Shinsky, 1988; Ziegler & Nichols, 1942). Sin embargo en muchas situaciones el desempeño satisfactorio puede ser difícilmente alcanzado, debido al hecho que el problema de nivel es un proceso de integración; el cual en combinación con el termino integral del PI o PID resultara en un doble circuito de integración, la presencia del termino integral en el controlador es absolutamente necesario para asegurar el error cero en estado estacionario.

Los controladores PID se usan con menos frecuencia para el proceso considerado, debido a la introducción del termino derivativo el cual podría amplificar el ruido de medición, por lo tanto para la parte aplicativa el análisis y diseño se basará para el caso de controladores PI. Así su estudio se enfoca en el desarrollo de un controlador de proceso de nivel PI de estructura variable. El principal objetivo del regulador es atenuar las posibles perturbaciones del sistema, en segundo lugar la única perturbación posible es el cambio de caudal de salida debido al cambio abrupto en el consumo, tercero es minimizar el efecto de las perturbaciones que se manifiestan en una disminución o incremento del nivel. Y cuarto asegurar una suave y una posibilidad de no oscilación en el transitorio. La dinámica del actuador de la válvula y del flujo de acumulación (debido al cambio de posición de la válvula) resultara en un retraso en el caudal de entrada con respecto al controlador, este retraso puede ser relativamente modelado, precisamente por un sistema de primer orden más un tiempo muerto. Sin embargo debido a la presencia de la dinámica actuador – válvula el caudal de entrada siempre se retrasara con respecto a la orden del controlador, de hecho cuando la orden del controlador disminuya, la válvula aun continua incrementando la apertura; debido a tal retraso este efecto distorsiona el ajuste optimo del controlador.

1.2 Allievi

Este programa ha sido elaborado por el Grupo ITA y simula el comportamiento en régimen transitorio de una instalación hidráulica a presión, la cual puede estar constituida por una tubería simple o por una red de tuberías, tanto ramificada como mallada.

La aplicación Allievi en algunas de sus funciones importantes, intenta representar de manera fiable la simulación del comportamiento de válvulas de control, con control mediante PID, simulación de instalaciones hidroeléctricas, incluyendo regulación PID en las condiciones de variación de carga en las turbinas. El transitorio hidráulico se modela aplicando las ecuaciones de conservación de masa y de cantidad de movimiento a un volumen de control que incluye la onda de presión que se mueve a lo largo de la conducción. De aquí se obtiene un sistema de dos ecuaciones diferenciales no lineales las cuales no tiene solución analítica; para su integración el procedimiento habitual es admitir que la solución “solo” se obtendrá en instantes de tiempo determinados (separados entre sí un Δt) y en puntos concretos sobre la conducción (separados entre sí un Δx), de manera que una onda de presión recorra en el interior de la conducción una distancia Δx en un tiempo Δt . Con estas hipótesis, las ecuaciones diferenciales que definen el fenómeno transitorio se transforman en un sistema de dos ecuaciones algebraicas, lineales, con dos incógnitas, las cuales permiten calcular la altura piezométrica H y la velocidad V en el punto i de la tubería y en el instante de cálculo $n+1$, a partir de los valores de H y V de los puntos $i-1$ e $i+1$ en el instante n . La aplicación de las expresiones es lo que se conoce como método de las características, y es el fundamento de cálculo del programa Allievi.

Así, el programa Allievi permite simular el funcionamiento en régimen transitorio de un sistema hidráulico a presión incluyendo los siguientes elementos, conectados entre sí a través del correspondiente sistema de tuberías:

- Depósitos, con o sin vertederos o aliviaderos
- Estaciones de bombeo
- Turbinas
- Sistemas de regulación de caudal, constituidos por válvulas o pérdidas de carga localizadas
- Sistemas de protección, constituidos por chimeneas, tanques unidireccionales o calderines
- Ventosas
- Imposición de leyes de caudal o de altura piezométrica en puntos extremos de tuberías.

Finalmente en un sistema hidráulico, el régimen transitorio se inicia a partir del régimen permanente cuando se produce una maniobra en alguno de los elementos del sistema. En el programa Allievi el régimen permanente se obtiene procesando el cálculo del régimen transitorio a partir de unas condiciones de funcionamiento cualquiera, con los elementos del sistema en las posiciones iniciales y sin efectuar maniobras. Cuando en este cálculo se obtiene unas condiciones de funcionamiento que no cambian con el tiempo, estas condiciones se adoptan como valores de partida para iniciar el cálculo del régimen transitorio [1].

La formulación teórica de las expresiones de todos sus términos físicos del sistema hidráulico depósito, tubería y válvula que están presentes en aducciones de gran longitud, nos permitirá entender su comportamiento total del sistema; de esta manera nuestro planteamiento se enfocará en la obtención de los coeficientes del regulador PID el cual

controlará el nivel del depósito, mediante una válvula de regulación independientemente de las perturbaciones (caudal de entrada), el mismo que puede provocar un vaciado o desbordamiento del depósito, para ello cuando su nivel sea superior o inferior este regulador PID actuará enviando una acción a la variable manipulable, que en nuestro caso será un grado de apertura en tanto por ciento de aumento o disminución; con el fin de mantener la referencia o consigna en el valor pre-establecido; además este procedimiento de sintonización o ajuste del regulador se desea obtener previo a la simulación en el programa Allievi; para cuando sean introducidos en el programa estos coeficientes K_p y K_i lleguen a equilibrar el sistema en estudio en un punto de referencia satisfaciendo el objetivo principal de mantener un nivel constante en el depósito, frente a las perturbaciones que puedan existir en la instalación. Y del mismo modo hacer una comparación entre, la solución obtenida mediante el cálculo analítico como el numérico (Allievi), y así ver posibles variaciones o semejanzas entre los dos métodos establecidos, tanto en las representaciones de nivel como en el grado de apertura de la válvula.

1.3 Objetivos

Razones principales para el control del proceso

Anteriormente se definió el control automático del proceso como una manera de mantener la variable controlable (altura) en el punto de control a pesar de las perturbaciones, por lo que es conveniente enumerar algunas de las razones por las cuales esto es importante, tal vez no sean las únicas pero si las más importantes:

- Evitar el vaciado del depósito con el fin de impedir el ingreso de aire en la instalación, ya que su presencia en el funcionamiento normal del sistema puede causar oscilaciones de presión que alcanzarían valores excesivos no deseados.
- Prevenir desbordamientos por la superación de cota de referencia en el depósito, evitando de esta manera vertidos de agua (pérdida) y producir daños considerables en sitios cercanos al mismo.
- Obtener los coeficientes del regulador PID por el método analítico, para luego ser introducidos en el programa Allievi, intentando obtener soluciones semejantes entre el un caso (analítico) y el otro (numérico).
- Generación del modelo de las ecuaciones completas del sistema en estudio, que permitan ajustar los coeficientes para ser aplicados al programa Allievi.

Capítulo 2.

Marco teórico

2.1 Sistemas de control

En nuestra vida cotidiana existen numerosos objetivos que necesitan cumplirse (doméstico, transportación, industria, salud, etc.). Por ejemplo un ser humano es capaz de realizar una gran cantidad de tareas, incluyendo tomar decisiones algunas de estas tareas tales como coger objetos, caminar de un punto a otro y el enfriamiento del cuerpo humano se realizan en una forma rutinaria, bajo ciertas condiciones algunas de estas tareas se realizan de la mejor forma posible. Por ejemplo el páncreas que regula la cantidad de azúcar en la sangre; en situaciones de vida o muerte, nuestra adrenalina aumenta junto con el ritmo cardiaco, llevando más oxígeno a nuestras células, etc. La búsqueda para alcanzar tales objetivos requiere normalmente utilizar un sistema de control que implante ciertas estrategias de control. [2]

Incluso el mundo no físico parece estar regulado automáticamente, se han sugerido modelos que muestran el control automático del desempeño de un estudiante, la entrada al modelo es el tiempo de estudio de que dispone el estudiante y la salida, la calificación, el modelo se puede emplear para pronosticar el tiempo necesario para que la calificación aumente si de manera repentina se incrementa el tiempo disponible para estudiar. Con el uso de este modelo es posible determinar si vale la pena estudiar más durante la última semana del período escolar. [3]

En años recientes los sistemas de control han asumido un papel cada vez más importante en el desarrollo y avance de la civilización moderna y la tecnología, además los sistemas de control se encuentran en gran cantidad en todos los sectores de la industria tales como: control de calidad de los productos manufacturados líneas de ensamble automático, tecnología espacial y sistemas de armas, control por computadora, sistemas de transporte, sistemas de potencia, robótica y muchos otros. [2]

El funcionamiento de un sistema depende de las características e interacciones entre sus elementos. Se denomina sistema de control aquel constituido por un conjunto de elementos conectados de forma que permiten regular o gobernar otro sistema denominado planta o proceso. [4]

2.2 Componentes básicos de un sistema de control

Los componentes básicos de un sistema de control se puede describir mediante:

1. Objetivos de control
2. Componentes del sistema de control
3. Resultados o salidas

En la fig. 2-1 se da la relación básica entre estos tres componentes, de tal manera que los objetivos se pueden identificar como entradas, o señales actuantes x , y los resultados también se llaman salidas o variables controladas y . En general el objetivo de un sistema de control es controlar las salidas en alguna forma prescrita mediante las entradas a través de los elementos del sistema de control. [2]



fig. 2-1 Relación básica de los componentes

2.2.1 Elementos de un sistema de control

En todo sistema de control aparecen claramente diferenciados una serie de elementos característicos al mismo que es necesario clarificar [4].

Planta o Sistema $G(s)$.- Son los componentes del sistema que hay que controlar, también se denomina proceso. En la planta se produce la transformación de la energía suministrada que se desea controlar, en general la energía eléctrica suministrada al actuador se transforma en energía mecánica –motor-, en energía potencial –depósito de líquido-, cinética –caudal impulsado por una tubería-, etc.

Controlador $G_c(s)$.- Proporciona la excitación al proceso para alcanzar la salida deseada. Es diseñado para controlar el comportamiento global del proceso y también recibe los nombres de regulador, corrector o compensador y regulador.

Sensor $H(s)$.- Es el elemento que permite sensar la salida de la planta, en el lazo de control se suele situar en la realimentación. En ocasiones su función de transferencia se incluye en la transmitancia del proceso, $G(s)$. Los sensores se caracterizan porque transforman una observación física –nivel, caudal, velocidad, temperatura- en una señal eléctrica, consta de dos partes el detector y un transductor o transmisor. El detector transforma la observación física en una señal eléctrica –mA

Actuador.- Es elemento final de control, la parte de proceso que provoca físicamente la dinámica de todo el sistema. Su transmitancia se incluye generalmente en la función de transferencia del proceso $G(s)$, aunque en ocasiones se integra en la función de transferencia del controlador $G_c(s)$.

Habitualmente consta de un adaptador de potencia y del elemento de actuación la adaptación de potencia es necesaria porque el generador de consignas suele ser de baja potencia y por lo tanto, insuficiente para alimentar directamente al actuador.

Transmisor.- Es la parte del sistema encargada de recoger la señal del sensor acondicionarla y compararla con la señal de consigna, para producir una señal de error que

significará la entrada al regulador; en general son elementos que no aportan dinámica al proceso, ni alteran la ganancia estática solo se tendrá en consideración de forma independiente en el caso de sistemas digitales para calcular el periodo de muestreo, o en sistemas analógicos cuando la transmisión introduzca un retardo puro en el sistema.

2.2.2 Señales principales

Las señales de entrada y salida de los componentes básicos de un sistema suelen recibir un nombre más o menos estandarizado en el ámbito de la automática, para normalizar las notaciones se denominaran siempre que sea posible los componentes, y las señales de actuación principales del diagrama de bloques de un lazo cerrado simple de control [4].

Variable de proceso $y(t)$.- Es la señal de salida de la planta; otro nombre utilizado es proceso variable –PV- o simplemente salida. Si el sensor de medida se considera dentro de la planta esta señal es idéntica a la señal de salida medida.

Variable medida $y_m(t)$.- Es la señal enviada por el sensor al medir la variable de proceso, también recibe el nombre de señal de salida medida –MV- por sus siglas en ingles

Señal de control $u(t)$.- Indica la acción correctora determinada por el elemento controlador. También recibe el nombre industrial de variable de control o variable manipulada.

Consigna $y_{sp}(t)$.- Es la señal de referencia de la variable de proceso, también recibe el nombre de variable de referencia –r(t)- setpoint, variable de proceso deseada –c(t)-

Error $e(t)$.- Indica la discrepancia entre la consigna que se quiere alcanzar o mantener, y la variable de proceso $e(t) = y_{sp}(t) - y(t)$, en el ámbito industrial se representa por E.

Perturbación $p(t)$.- Es una señal no propia del comportamiento normal de la planta. Según las fuentes documentales que se consulten se distinguen entre perturbaciones, ruido –n(t) o error de medida y su inserción como señal en un diagrama de bloques; puede realizarse en diversos puntos pero siempre alterando el comportamiento genuino del sistema. En general se habla de un cambio de carga en el proceso.

En la figura 2-2 están los elementos y señales de un sistema de control analizados, sin considerar perturbación; la misma que puede entrar en cualquier fase del proceso.

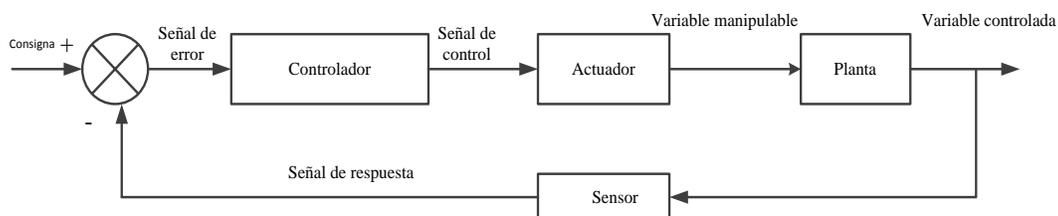


fig. 2-2 Elementos y señales de un sistema de Control

El sistema queda completamente especificado si es posible conocer la función de salida que corresponde a cada posible función de entrada. Normalmente este proceso de análisis del sistema, desemboca en la construcción, testeo y validación de un modelo, los modelos pueden integrarse en dos grupos: los axiomáticos y los empíricos, los primeros están basados en ecuaciones físicas (matemáticas explican las interioridades dinámicas del sistema), mientras que los segundos emplean relaciones de entrada y salida utilizando el conocido concepto de caja negra. En ambos casos el objetivo es el mismo obtener una expresión matemática llamada función de transferencia del sistema, tal que, explique cuantitativamente el comportamiento dinámico del sistema ante cualquier tipo de excitación temporal. [5]

2.3 Ventajas de los sistemas de control

Con sistemas de control podemos mover equipos grandes, con una precisión, que de otra forma sería imposible; es posible dirigir enormes antenas hacia las regiones más alejadas del universo para captar señales de radio débiles, controlar estas antenas en forma manual sería imposible [2].

Construimos sistemas de control por cuatro razones básicas:

1. Amplificación de potencia
2. Control remoto
3. Comodidad de forma de entrada
4. Compensación por perturbaciones

Por ejemplo una antena de radar colocada en su posición, por medio de la rotación a baja potencia de una perilla en la entrada, requiere una gran cantidad de potencia para su rotación de salida. Los sistemas de control pueden producir la amplificación o ganancia necesaria de potencia. Estos sistemas de control también son útiles en lugares remotos y peligrosos; ejemplo se puede usar un brazo de robot a control remoto para recoger material en un ambiente radioactivo.

Otra ventaja de un sistema de control, es la capacidad de compensación debido a las perturbaciones, el sistema debe ser capaz de dar la salida correcta incluso con una perturbación, por ejemplo considere un sistema de antena que apunta en la dirección que se le indica, si un viento obliga a la antena a moverse de la posición que se le ha indicado o si internamente entra ruido; el sistema debe detectar la perturbación y corregir la posición de la antena, obviamente la entrada del sistema no cambiara para hacer la corrección. En consecuencia el sistema debe 1) medir la cantidad en que esta perturbación ha cambiado la posición de la antena y 2) regresar la antena a la posición indicada por la entrada.

2.4 Tipos y clasificación de los sistemas de control

Los sistemas de control manipularan de alguna manera, una o varias entradas (acción de control) para influenciar en el comportamiento de una o más salidas, y así poder controlarlo y predecirlo con independencia de las perturbaciones que ataque al sistema [5].

Los sistemas de control automático se clasifican dependiendo del criterio elegido, como puede ser la forma en la que procesan la información, la dependencia con el tiempo, la linealidad de los componentes, las señales que tratan, etc.

2.4.1 Sistemas de control en lazo abierto

Los sistemas en los cuales la salida no tiene efecto sobre la acción de control se denomina sistemas de control de lazo abierto, en otras palabras en un sistema de control de lazo abierto no se mide la salida, ni se realimenta para compararla con la entrada, un ejemplo práctico es la lavadora el remojo, el lavado y centrifugado en la lavadora operan con una base de tiempo, la maquina no mide la señal de salida que es la limpieza de la ropa. En cualquier sistema de control de lazo abierto la salida no se compara con la entrada de referencia, así a cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fija; como resultado de ello la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones un sistema de control de lazo abierto no realiza la tarea deseada. La figura 2-3 es de un sistema de control de lazo abierto, la precisión del sistema depende de una adecuada calibración y se basa en temporizaciones y el conocimiento exacto entre la entrada y la salida [5] [6].



fig. 2-3 Sistema de Control de lazo abierto

2.4.2 Sistemas de control en lazo cerrado o realimentados

En la práctica los términos control realimentado y control en lazo cerrado se usan indistintamente, en un sistema de control de lazo cerrado figura 2-4, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la propia señal de salida o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales) con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado, el termino control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema.

Por ejemplo si en una casa el sistema de calefacción depende solo del encendido o apagado manual, esto es control en lazo abierto; la temperatura de las habitaciones dependerá del tiempo de conexión de la caldera y las pérdidas producidas por la transmisión del calor alcanzando valores quizá no deseados. En cambio al emplear un termostato (controlador) el sistema de control realimentado compara la temperatura deseada con la temperatura de las

habitaciones, para generar una señal de error que actúe corrigiendo la desviación cuando se alcance la temperatura deseada; el error será cero y el controlador apagará la calefacción y volverá a encenderla cuando descienda la temperatura atendiendo las posibles perturbaciones (aperturas de ventanas o puertas, etc.)

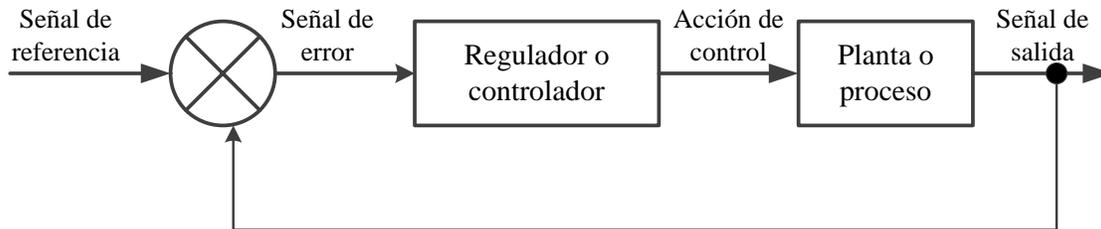


fig. 2-4 Sistema de control en lazo cerrado

Características de lazo cerrado [7]

Aumento de exactitud en el control del proceso

La retroalimentación atenúa el error para lograr el objetivo de control

Sensibilidad reducida en las variaciones de las características del sistema

Se refiere a que dentro de ciertos límites, uno o varios componentes del sistema pueden sustituir por elementos semejantes al componente original, sin que se aprecien resultados significativos en el desempeño del sistema resultante

Efectos reducidos de la no linealidad y la distorsión

Los efectos de la no linealidad y de la distorsión, dentro de ciertos rangos pueden ser no significativos debido a la retroalimentación ya que este tiende a ajustar la respuesta del sistema.

Aumento de ancho de banda del sistema

Con la retroalimentación el rango de operación del sistema en el dominio de la frecuencia ω se incrementa

Tendencia a la inestabilidad

Salvo las anteriores características, el único problema, pero grave que causa la retroalimentación es la tendencia del sistema a la inestabilidad.

2.4.3 Comparación entre sistemas en lazo abierto y lazo cerrado

Una ventaja del sistema de control en lazo cerrado es que el uso de la realimentación vuelve la respuesta del sistema relativamente insensible a las perturbaciones externas, y a las variaciones internas en los parámetros del sistema. Es así posible usar componentes

relativamente poco precisos y baratos para obtener el control adecuado de una planta determinada, mientras que hacer eso es imposible en el caso de un sistema en lazo abierto [6].

Desde el punto de vista de la estabilidad el sistema de control de lazo abierto es más fácil desarrollar porque la estabilidad del sistema no es un problema importante, por otra parte la estabilidad es un gran problema en el sistema de control de lazo cerrado ya que puede conducir a corregir en exceso, a errores que producen oscilaciones de amplitud constante o cambiante. Debe señalarse que para los sistemas en los que se conocen con anticipación las entradas y en los cuales no hay perturbaciones es aconsejable emplear un sistema en control de lazo abierto, los sistemas de control en lazo cerrado solo tienen ventajas cuando se presentan perturbaciones y/o variaciones impredecibles de los componentes del sistema. Obsérvese que la potencia nominal de salida determina en forma parcial el coste, peso y tamaño de un sistema de control. El número de componentes usados en un sistema de control de lazo cerrado es mayor que el que se emplee para un sistema de control equivalente en lazo abierto, de esta forma el sistema de lazo cerrado suele tener costos y potencias más grandes.

2.5 Que es realimentación y cuáles son sus efectos

El motivo de utilizar la realimentación es para reducir el error entre la entrada de referencia y la salida del sistema, sin embargo el significado de los efectos de realimentación en los sistemas de control es más complejo, la reducción del error es solo uno de los efectos más importantes que la realimentación realiza sobre el sistema. La realimentación también tiene efectos en las características del desempeño del sistema como la estabilidad, ancho de banda, ganancia global, perturbaciones y sensibilidad. En general se puede establecer que cuando una secuencia cerrada de relaciones causa-efecto existe entre las variables de un sistema se dice que existe realimentación. Este punto de vista admitirá inevitablemente realimentación en un gran número de sistemas que normalmente se identificaron como sistemas no realimentados [2]

2.5.1 Efecto de la realimentación en la ganancia global

La realimentación puede incrementar la ganancia de un sistema en un intervalo de frecuencia pero reducirlo en otro.

2.5.2 Efecto de la realimentación en la estabilidad

La estabilidad es una noción que describe si un sistema es capaz de seguir el comando de entrada o en general si dicho sistema es útil, en una forma rigurosa un sistema se dice inestable si sus salidas salen de control.

2.5.3 Efecto de la realimentación en la sensibilidad

Las consideraciones sobre la sensibilidad son importantes en el diseño de sistemas de control, ya que todos los elementos físicos tienen propiedades que cambian con el ambiente

y la edad, no se puede considerar a los parámetros de un sistema de control como completamente estacionarios durante la vida de operación del sistema, por ejemplo la resistencia del embobinado de un motor eléctrico cambia a medida que la temperatura del motor se eleva. En general un buen sistema de control debe ser insensible a la variación de los parámetros pero sensibles a comandos de entrada. De esta manera la realimentación puede incrementar o reducir la sensibilidad de un sistema.

2.5.4 Efecto de la realimentación sobre perturbaciones externas o ruido

Todos los sistemas están sujetos a algunos tipos de señales exógenas o ruidos durante su operación, ejemplo de estas señales es el ruido de comunicación en motores eléctricos. Las perturbaciones externas tales como el viento, caudal de entrada hacia un depósito son también muy comunes en sistemas de control pudiendo entrar en cualquier fase del proceso en estudio; por tanto en el diseño de sistemas de control se debe dar consideraciones para que el sistema sea insensible a ruido y perturbaciones externas y sensibles a comandos de entrada.

El efecto de la realimentación sobre el ruido y perturbaciones depende grandemente de en qué parte del sistema ocurren las señales exógenas. En muchas ocasiones la realimentación puede reducir los efectos del ruido y las perturbaciones en el desempeño del sistema.

2.6 Sistemas de control lineal y no lineal

Sistemas de control no-lineal

Un componente es no-lineal si no cumple con las propiedades de homogeneidad o superposición, los sistemas de control prácticamente siempre presentan no-linealidades inevitables llamadas inherentes, la mayoría de los sistemas físicos son no-lineales.

Considere el siguiente conjunto de ecuaciones que representa un sistema no lineal con una sola entrada y una sola salida:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t)) & x(t_0) &= x_0 \\ y(t) &= h(x(t)) \end{aligned}$$

Donde $x(t)$ es una función vectorial del tiempo la cual toma valores en el espacio de n -dimensiones, y representa el estado del sistema $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $u(t)$ es una función escalar del tiempo y toma valores en la recta real, $u(t) \in \mathbb{R}$. La variable $y(t)$ es también una función escalar del tiempo y representa la salida del sistema, $y(t) \in \mathbb{R}$. Las funciones $f(\cdot)$ y $h(\cdot)$ son funciones continuas diferenciables al menos una vez con respecto a cada uno de sus argumentos definidos de tal forma que, $f: \mathbb{R}^n * \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ y $h: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, representado en un diagrama de bloques figura 2-5, y recordando que $\dot{x} = dx/dt$ representa la tasa de variación de la variable x con respecto al tiempo.

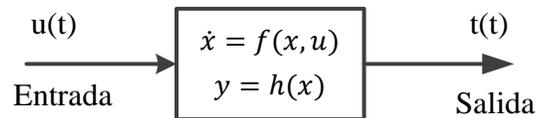


fig. 2-5 Diagrama de bloques de un Sistema no Lineal

Los sistemas de control no-lineales más frecuentes son la saturación, zona muerta, histéresis, todo o nada, producto de variables, raíz, polinomio, función trigonométrica, etc. La presencia de estas no linealidades puede afectar muy adversamente el comportamiento del sistema; así la zona muerta puede producir error de régimen estable, y la saturación a su vez puede llevarlo a la inestabilidad, se describirá algunas de ellas:

Saturación.- Para señales de entrada pequeñas la salida de un elemento de saturación es proporcional a la entrada. Para señales mayores de entrada, la salida no se incrementa proporcionalmente y finalmente para valores muy elevados de las señales de entrada la salida se mantiene constante.

Zona muerta.- En un elemento de zona muerta o no linealidad de umbral, no hay salidas para entradas que caen dentro de la amplitud de zona muerta.

También las características no lineales son introducidas en forma intencional en un sistema de control para mejorar su desempeño o proveer un control más efectivo por ejemplo un tipo de controlador prendido-apagado se emplea en muchos misiles o sistemas de control de naves espaciales

Justificación del estudio de los sistemas no- lineales

- Los sistemas de control no lineales presentan mejoras sobre los métodos lineales, particularmente porque son válidos en todo el rango de variación de las variables y no solo en pequeña señal.
- Permite el análisis para sistemas con alinealidades no-diferenciables continuas (fuertes), tales como la saturación, zona muerta, histéresis, fricción de Colomb, etc. El considerarlas permiten concebir estrategias de control que reduzcan sus efectos indeseables.
- Permite tratar las incertidumbres paramétricas del modelo mediante estrategias de adaptación del control.
- El análisis y diseño puede ser más simple particularmente con estrategias basadas en la física del proceso.
- El control puede ser menos costoso si se evitan sensores actuadores lineales en todo el rango de las variables.
- El mundo real es inherentemente no-lineal.

Por otro lado los sistemas no lineales son difíciles de tratar en forma matemática y no existen métodos generales disponibles para resolver una gran variedad de clases de sistemas no lineales, por lo que se citara más adelante una de las técnicas para resolver este tipo de sistemas.

Sistemas de control lineal [8]

Los sistemas lineales son la base para el desarrollo de la teoría de sistemas dinámicos; la razón es que estos sistemas poseen solución analítica por lo que su comportamiento puede ser determinado de manera exacta. Se dice que un sistema es lineal si cumple con el llamado principio de superposición el cual a su vez se compone de dos partes:

Homogeneidad: $\text{Si } x(t) \rightarrow y(t) \Rightarrow kx(t) \rightarrow ky(t)$

Aditividad: $\text{Si } x_1(t) \rightarrow y_1(t) \wedge x_2(t) \rightarrow y_2(t) \Rightarrow x_1(t) + x_2(t) \rightarrow y_1(t) + y_2(t)$

Combinando estas dos partes $k_1x_1(t) + k_2x_2(t) \Rightarrow k_1y_1(t) + k_2y_2(t)$

Evidentemente esto se cumplirá si el sistema para obtener la salida efectúa sobre la señal de entrada operaciones que son matemáticamente lineales.

2.7 Consideraciones sobre el diseño y acciones básicas de control

La motivación fundamental de la teoría de los sistemas de control es el diseño de sistemas que sean capaces de conseguir que el proceso a controlar cumpla las especificaciones de estabilidad, precisión y respuesta transitoria que deseen. Entenderemos por diseño de sistema de control el proceso a seguir para determinar las modificaciones básicas que deben introducirse en el sistema para que cumplan estas especificaciones [9] [10].

Antes de plantearnos métodos de diseño resulta necesario plantearse los datos de los que normalmente parte un ingeniero para el diseño de un sistema automático de control, estos datos son los siguientes (ver figura 2-8):

1. El primer dato es evidente la planta o proceso (figura 2-6) que se desea controlar cuyo comportamiento es conocido. Este conocimiento de la planta se expresa como un modelo matemático de la misma que en el caso de sistemas continuos es una función de transferencia en el dominio de Laplace.
2. Cuál es la variable que se desea controlar, es decir la magnitud física cuya variable en función del tiempo deba seguir una referencia.
3. Los requerimientos o especificaciones que se exigen a la variable o magnitud a controlar
4. Puntos del sistema donde es posible que se produzcan perturbaciones

La misión del diseñador de un sistema de control automático puede dividirse en dos etapas:

- Primero debe definirse una estructura adecuada para el sistema de control en esta estructura debe seleccionarse los siguientes elementos para el dispositivo regulador
 - Un dispositivo accionador para actuar sobre el proceso ($G_a(s)$)
 - Un dispositivo de medida o sensor para medir la señal de salida del proceso ($H_m(s)$)
 - Un detector de error para comparar la variable realimentada (salida del sensor) con la referencia

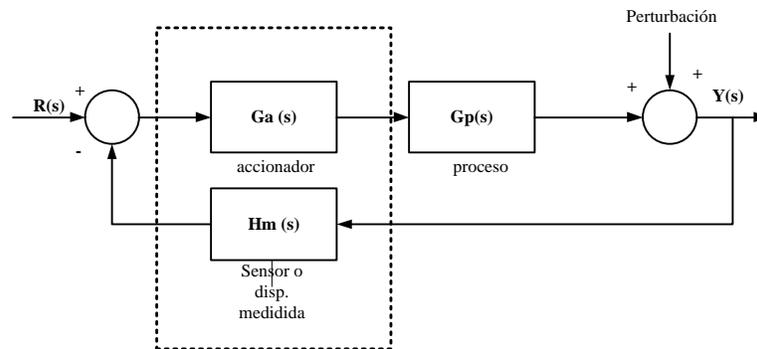


fig. 2-6 Estructura para el control de un proceso

- Una vez diseñada la estructura y elegidos y modelados todos sus componentes el diseñador debe analizar el sistema, y si se concluye que no cumple las especificaciones de diseño se estudia la forma de modificar o compensar el mismo para que se cumplan estas especificaciones.

El método más habitual para conseguir que un sistema de regulación cumpla las especificaciones es modificar la estructura del mismo incorporando al dispositivo de regulación un elemento adicional, que atrae el comportamiento del conjunto de forma que la respuesta del sistema modificado sea satisfactoria. En la figura 2-7 se ha incluido dicho elemento denominado regulador y modelado como $G_R(s)$

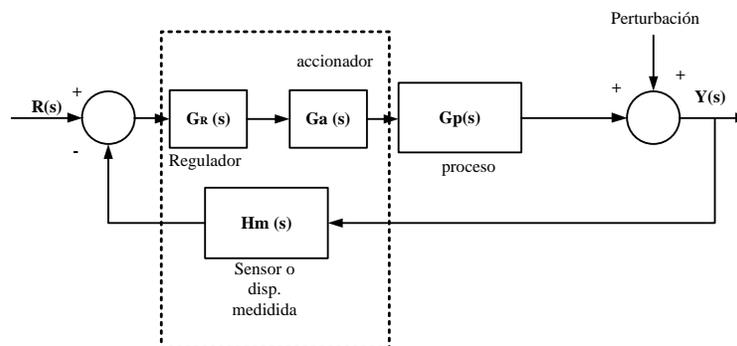


fig. 2-7 Estructura para el control de un proceso con la inclusión de un regulador

Los motivos por los que un sistema como el de la figura anterior pueden necesitar compensación, estos suelen ser muy diversos los más habituales son los siguientes:

1. Reducción del error en régimen permanente sin afectar a la respuesta transitoria que se considera satisfactoria.
2. Mejora de la respuesta dinámica sin alterar la precisión estática.
3. Establecimiento mediante el ajuste de la ganancia de un compromiso entre los regímenes transitorio y permanente.
4. Estabilización de un sistema que sea inestable con cualquier valor de la ganancia.

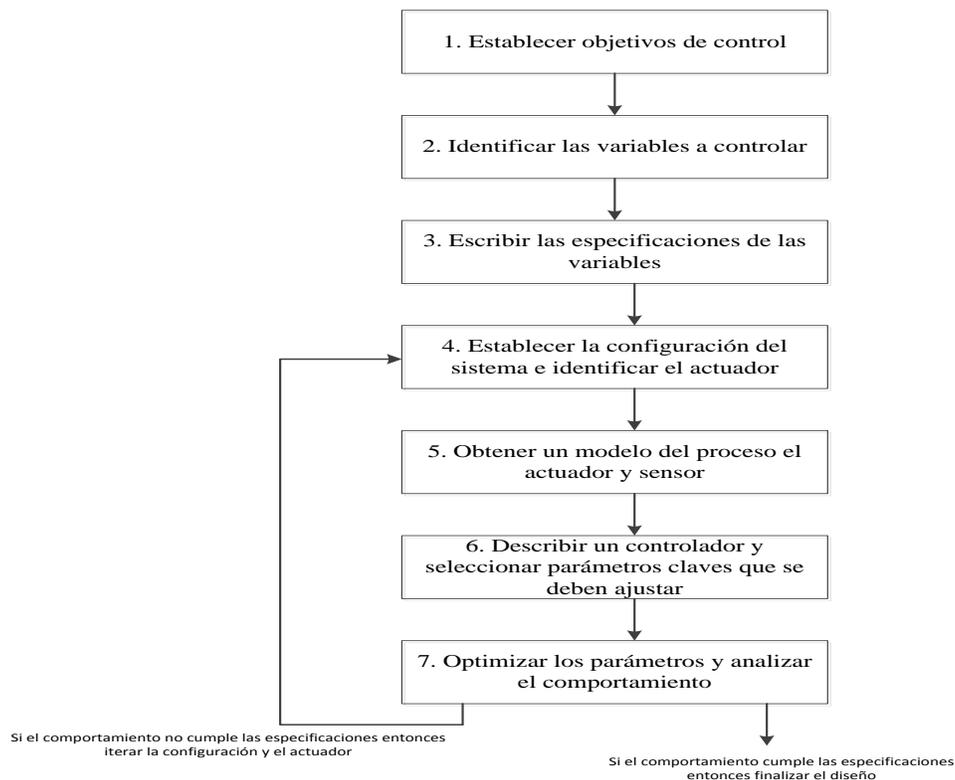


fig. 2-8 Proceso de diseño de un sistema de control

2.7.1 Ondas de prueba empleadas en los sistemas de control

Se utilizan señales de entrada analíticamente y durante la prueba para verificar el diseño no es necesariamente práctico o ilustrativo escoger señales de entrada complicadas para analizar la operación de un sistema. Por lo tanto el ingeniero suele seleccionar entradas de prueba estándar. Estas entradas son pulsos, escalones, rampas, parábolas, y senoides (ver figura resumen 2-9).

Un impulso.- Es infinito en $t = 0$ y cero en otros tiempos. El área bajo el impulso unitario es 1 se emplea una aproximación de este tipo de onda para poner energía inicial en el sistema, de modo que, la respuesta debido a esa energía inicial sea solo la respuesta

transitoria de un sistema, a partir de esta respuesta el diseñador puede reducir un modelo matemático del sistema.

Una entrada de escalón.- Representa una señal de comando constante por ejemplo, posición, velocidad o aceleración por lo general un comando de entrada de escalón es de la misma forma que la salida; por ejemplo si la salida del sistema es posición, como lo es para el sistema de control de posición acimutal de antena la entrada de escalón representa una posición deseada y la salida representa la posición real, si la salida del sistema es velocidad, como es la velocidad del eje central para un reproductor de discos de video, la entrada de escalón representa una velocidad deseada constante y la salida representa la velocidad real, el diseñador emplea entradas de escalón porque la respuesta transitoria y la respuesta en estado estable son claramente visibles y se puede evaluar.

La entrada rampa.- Representa una señal de comando linealmente creciente; por ejemplo si la salida del sistema es posición la rampa de entrada representa una posición linealmente creciente, como la que se halla cuando se rastrea un satélite que se mueve en el cielo a velocidad constante, si la salida del sistema es velocidad la rampa de entrada representa una velocidad creciente linealmente, la respuesta a una señal entrada de rampa produce más información acerca del error en estado estable. El análisis anterior se puede extender a entradas parabólicas que también se usan para evaluar el error en estado estable de un sistema.

Entradas senoides.- Así mismo se pueden utilizar señales senoidales para probar un sistema físico para llegar a un modelo matemático.

Concluimos que uno de los requerimientos básicos de análisis y diseño es evaluar la respuesta en tiempo de un sistema para una entrada dada.

Entrada	Función	Descripción	Dibujo	Uso
Impulso	$\delta(t)$	$\delta(t) = \infty$ para $0- < t < 0+$ $= 0$ en otras partes $\int_{0-}^{0+} \delta(t) = 1$		Respuesta transitoria modelos
Escalón	$u(t)$	$u(t) = 1$ para $t > 0$ $= 0$ para $t < 0$		Respuesta transitoria Error en estado estable
Rampa	$u(t)$	$tu(t) = t$ para $t \geq 0$ $= 0$ para $t < 0$		Error en estado estable
Parábola	$u(t)$	$u(t) = \frac{1}{2}t^2$ para $t \geq 0$ $= 0$ para $t < 0$		Error en estado estable
Senoide	$u(t)$	$\sin \omega t$ para $t \geq 0$ para $t < 0$		Respuesta transitoria modelos error en estado estable

fig. 2-9 Ondas de prueba empleadas en los sistemas de control

2.8 Transformada de Laplace

Concepto de transformada [8] [11] [12]

A lo largo de analizar y diseñar los sistemas de control para una amplia variedad de procesos nos encontramos con la necesidad de resolver ecuaciones diferenciales o integro-diferenciales; con el fin de conocer la respuesta que el proceso nos va a dar ante determinadas entradas o acciones de control. Estas ecuaciones diferenciales pueden resolverse de forma directa o bien se puede resolver convirtiéndolas en otro tipo de

ecuaciones de más fácil resolución. Existe una serie de métodos operacionales que nos permiten transformar problemas de resolución de ecuaciones diferenciales lineales, o problemas de resolución de ecuaciones en diferencias en problemas de tipo polinómico mucho más fáciles de tratar.

Entre las transformadas mucho más frecuentes utilizadas para la solución de ecuaciones diferenciales ordinarias de tipo lineal, están las transformaciones de tipo integral y entre estas una ampliamente utilizada en control es la denominada transformada de Laplace. Para el caso de los sistemas con ecuaciones en diferencias se utiliza la denominada transformada z . En el presente apartado se estudiara la transformada de Laplace que se presenta con más frecuencia en ingeniería. Consisten, esencialmente, en tres pasos. En el primero la ecuación diferencial dada se transforma en una ecuación algebraica (ecuación subsidiaria), es decir se algebriza el problema. Entonces esta última se resuelve mediante manipulaciones puramente algebraicas. Finalmente la solución de la ecuación subsidiaria se transforma en sentido inverso obteniéndose así la solución requerida de la ecuación diferencial original. Una de las ventajas del procedimiento reside en el hecho de que durante su aplicación se toma en consideración las condiciones iniciales de modo que, en los problemas de valor inicial se obtiene directamente la solución particular, evitando así la determinación de la solución general y posterior cálculo de las constantes. La principal desventaja de los métodos operacionales es que si se emplean mecánicamente sin el conocimiento de la teoría que los establece, se producen a veces resultados erróneos, por ello aunque para la aplicación formal del método bastaría con disponer de una tabla lo más extensa posible de funciones $f(x)$ y sus transformadas $F(s)$, resulta conveniente e incluso necesario conocer los fundamentos teóricos en que se apoya.

Definición:

Sea $s = \sigma + i\omega$ una variable compleja y $f(t)$ una función definida para $t > 0$.

Si es convergente la integral:
$$\int_0^{+\infty} e^{-st} f(t) dt$$

Se dice que $f(t)$ es transformable Laplace y el resultado de la integración será una cierta función de s llamada transformada de Laplace de la función $f(t)$. Se representa:

$$\mathcal{L}[f(t)] = \int_0^{+\infty} e^{-st} f(t) dt = F(s)$$

En ocasiones se utiliza la notación:

$$\mathcal{L}[f(t)] = \hat{f}(s) \text{ o bien } F(s) \rightarrow f(t) \text{ ó } f(t) \leftarrow F(s)$$

2.8.1 Transformada de Laplace de algunas funciones

En el estudio de los servosistemas son muy empleadas las funciones escalón unitario, exponencial decreciente, senoide, rampa y parábola por lo que a continuación se relacionan sus transformadas de Laplace.

Función escalón unitario:

$$\mathcal{L}[1_+(t)] = \frac{1}{s}; \quad \text{Re}(s) = \sigma > 0$$

Donde $\text{Re}(s)$ = es número real y mayor que cero

Función exponencial:

$$\mathcal{L}[e^{\alpha t}] = \frac{1}{s - \alpha}; \quad \text{Re}(s - \alpha) > 0 \text{ ó } \text{Re}(s) > \text{Re}(\alpha)$$

Senoide:

$$\mathcal{L}[\text{sen } \omega t] = \frac{\omega}{a^2 + \omega^2}$$

Función rampa $f(t) = t$:

$$\mathcal{L}[At] = \frac{A}{s^2}; \quad \text{Re}(s) > 0$$

Función parábola $f(t) = t^2/2$

$$\mathcal{L}\left[\frac{1}{2}t^2\right] = \frac{1}{s^3}$$

2.8.2 Propiedades de la transformada de Laplace

En esta sección se presenta varios teoremas y propiedades de la transformación de Laplace.

- a) Superposición.- La transformada de Laplace es lineal, pues si $f_1(t)$ y $f_2(t)$ tienen transformada de Laplace $F_1(s)$ y $F_2(s)$ y A, B son constantes entonces:

$$\mathcal{L}[A \cdot f_1(t) + B \cdot f_2(t)] = A \cdot \mathcal{L}[f_1(t)] + B \cdot \mathcal{L}[f_2(t)] = A \cdot F_1(s) + B \cdot F_2(s)$$

- b) Derivación.- Si $f(t)$ es continua para $t \geq 0$ y de orden exponencial cuando $t \rightarrow \infty$ y si $f'(t)$ admite transformada entonces:

$$\mathcal{L}[f'(t)] = s\mathcal{L}[f(t)] - f(0) = sF(s) - f(0)$$

El término $f(0)$ es el valor del límite de la función $f(t)$ cuando t se aproxima al valor cero desde valores positivos. Esto afecta a funciones tales como la función escalón que puede ser indefinida en $t = 0$.

La transformada de la segunda derivada es:

$$\mathcal{L}[f''(t)] = s\mathcal{L}[f'(t)] - f'(0) = s[sF(s) - f(0)] - f'(0) = s^2F(s) - sf(0) - f'(0)$$

La transformada de la derivada n-sima es:

$$\mathcal{L}[f^{(n)}(t)] = s^n F(s) - s^{n-1}f(0) - s^{n-2}f'(0) \dots f^{(n-1)}(0)$$

En el caso de que $f(t)$ y sus derivadas fuese cero para $t = 0$ tendríamos lo siguiente:

$$\mathcal{L}[f^{(n)}(t)] = s^n F(s)$$

- c) Integración.- Sea $f(t)$ transformable Laplace e integrable en $[0, t]$ y siendo C la constante de integración:

$$\mathcal{L}\left[\int_0^t f(\tau)d\tau\right] = \frac{1}{s}\mathcal{L}[f(t)]$$

- d) Valor final.- Si $f(t)$ y su derivada son transformables y si el límite de $f(t)$ cuando t tiende al infinito existe entonces:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s)$$

Es decir el comportamiento de $f(t)$ en las proximidades de $t = \text{infinito}$ está ligado al comportamiento de $sF(s)$ en el entorno de $s = 0$.

- e) Valor inicial.- Si la función $f(t)$ y su derivada son transformable y existe el límite de $sF(s)$ para el tiempo tendiendo a infinito, entonces:

$$\lim_{s \rightarrow +\infty} sF(s) = \lim_{t \rightarrow 0^+} f(t)$$

2.8.3 Transformada inversa

El proceso matemático de pasar de la expresión en variable compleja $F(s)$, a la correspondiente $f(t)$ se llama transformada inversa de Laplace se expresa por:

$$\mathcal{L}^{-1}[F(s)] = f(t) \Leftrightarrow \mathcal{L}[f(t)] = F(s)$$

Matemáticamente el problema se resuelve mediante la integral:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} F(s) e^{st} ds \quad (t > 0; \text{Re}(s) > 0)$$

Siendo el camino de integración cualquier recta paralela al eje imaginario situada a la derecha de la abscisa de convergencia. Esta fórmula es conocida como Fórmula de Mellín y

es válida en los puntos de continuidad de $f(t)$; en los puntos de discontinuidad de tipo finito la integral nos daría el promedio de los límites laterales.

Esta integración resulta generalmente complicada, por suerte hay procedimientos más simples deducidos de la formula anterior para hallar $f(t)$; como es el empleo de tablas y el desarrollo de fracciones simples.

Puesto que $\mathcal{L}^{-1}[F(s)] = f(t)$ significa que:

$$\int_0^{+\infty} e^{-st} f(t) dt = F(s)$$

Inmediatamente se ve que la transformada inversa no es necesariamente única, por ejemplo $f_1(t)$ y $f_2(t)$ son idénticas salvo en un conjunto discreto de puntos, las integrales de ambas funciones serán iguales es decir tendrán la misma transformada.

2.9 Linealización y variables de desviación

Al analizar la respuesta dinámica de los procesos industriales, una de las mayores dificultades es el hecho de que no es lineal, es decir no se puede representar mediante ecuaciones lineales. Para que una ecuación sea lineal cada uno de sus términos no deben contener más de una derivada o variable, y esta debe estar a la primera potencia desafortunadamente con la transformada de Laplace poderosa herramienta que se estudió anteriormente, únicamente se puede analizar sistemas lineales, otra dificultad es que no existe una técnica conveniente para analizar un sistema no lineal [13].

Aquí se estudiara la técnica de linealización mediante la cual es posible aproximar las ecuaciones no lineales que representan un proceso a ecuaciones lineales que se puede analizar mediante transformada de Laplace, la suposición básica es que la respuesta de la aproximación lineal representa la respuesta del proceso en la región cercana al punto de operación, alrededor del cual se realiza la linealización. El manejo de las ecuaciones linealizadas se facilita en gran medida con la utilización de las variables de desviación o perturbación que se definen a continuación.

Variables de desviación.- Se define como la diferencia entre el valor de la variable o señal y su valor en el punto de operación:

$$X(t) = x(t) - \bar{x} \quad \text{Ec. 2-1}$$

Dónde:

$X(t)$ = Es la variable de desviación.

$x(t)$ = Es la variable absoluta correspondiente.

\bar{x} = Es el valor de x en el punto de operación.

En otras palabras la variable de desviación es la desviación de una variable respecto a su valor de operación o base. Como se observa en la fig. 2-10; la transformación del valor absoluto de una variable al de desviación equivale a mover el cero sobre el eje de esa variable hasta el valor base.

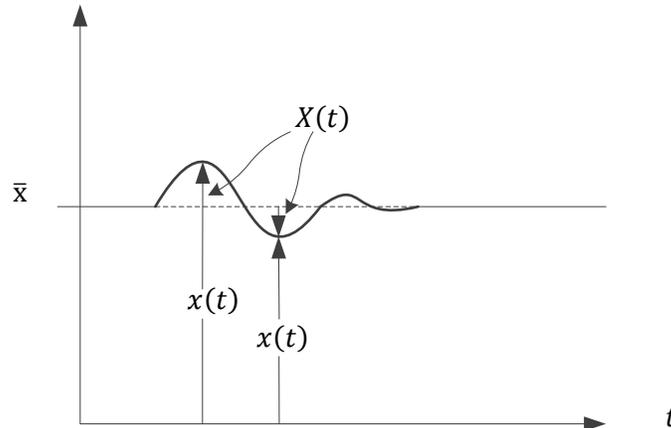


fig. 2-10 Definición de la variable de desviación

Puesto que el valor base de la variable es una constante, las derivadas de las variables de desviación son siempre iguales a las derivadas correspondientes de las variables:

$$\frac{d^n X(t)}{dt^n} = \frac{d^n x(t)}{dt^n} \quad \text{para } n = 1, 2, \text{ etc.}$$

La ventaja principal en la utilización de variables de desviación se deriva del hecho de que el valor base \bar{x} es generalmente, el valor inicial de la variable. Además el punto de operación esta generalmente en estado estacionario es decir las condiciones iniciales de las variables de desviación y sus derivadas son todas cero:

$$x(0) = \bar{x} \quad X(0) = 0$$

También

$$\frac{d^n X}{dt^n}(0) = 0 \quad \text{para } n = 1, 2, \text{ etc.}$$

Entonces para obtener la transformada de Laplace de cualquier de las derivadas de las variables de desviación se aplica la ecuación (2-5)

$$\mathcal{L} \left[\frac{d^n X(t)}{dt^n} \right] = s^n X(s)$$

Donde $X(s)$ es la transformada de Laplace de la variable de desviación. Otra característica importante del caso en que todas las variables de desviación son condiciones de las desviaciones de las condiciones iniciales de estado estacionario, es que en las ecuaciones diferenciales linealizadas se excluyen los términos constantes, se demuestra a continuación brevemente.

Linealización de funciones con una variable.- Considérese la ecuación diferencial de primer orden

$$\frac{dx(t)}{dt} = f[x(t)] + k \quad \text{Ec. 2-2}$$

Donde $f[x(t)]$ es una función no lineal de x y k es una constante. La expresión por series de Taylor de $f[x(t)]$, alrededor del valor \bar{x} , está dada por

$$f[x(t)] = f(\bar{x}) + \frac{df}{dx}(\bar{x})[x(t) - \bar{x}] + \frac{1}{2!} \frac{d^2f}{dx^2}(\bar{x})[x(t) - \bar{x}]^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3f}{dx^3}(\bar{x})[x(t) - \bar{x}]^3 + \dots$$

La aproximación lineal consiste en eliminar todos los términos de la serie con excepción de los dos primeros

$$f[x(t)] \doteq f(\bar{x}) + \frac{df}{dx}(\bar{x})[x(t) - \bar{x}] \quad \text{Ec. 2-3}$$

Y al substituir la definición de la variable de desviación $X(t)$ de la ecuación (2-1)

$$f[x(t)] \doteq f(\bar{x}) + \frac{df}{dx}(\bar{x})X(t) \quad \text{Ec. 2-4}$$

En la figura 2-11 se da la interpretación gráfica de esta. La aproximación es una línea recta que pasa por el punto $[\bar{x}, f(\bar{x})]$, con pendiente $df/dx(\bar{x})$; esta línea es por definición, tangente a la curva $f(x)$ en (\bar{x}) . Nótese que la diferencia entre la aproximación lineal y la función real es menor en las cercanías del punto de operación (\bar{x}) , y mayor cuando se aleja de este. Es difícil definir la región en la que la aproximación lineal es lo suficientemente precisa como para representar la función no lineal; tanto más a lineal es una función cuanto menor es la región sobre la que la aproximación lineal es precisa. De la sustitución de la ecuación (2-4) de aproximación lineal en la ecuación (2-2) resulta.

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(\bar{x}) + \frac{df}{dx}(\bar{x})X(t) + k \quad \text{Ec. 2-5}$$

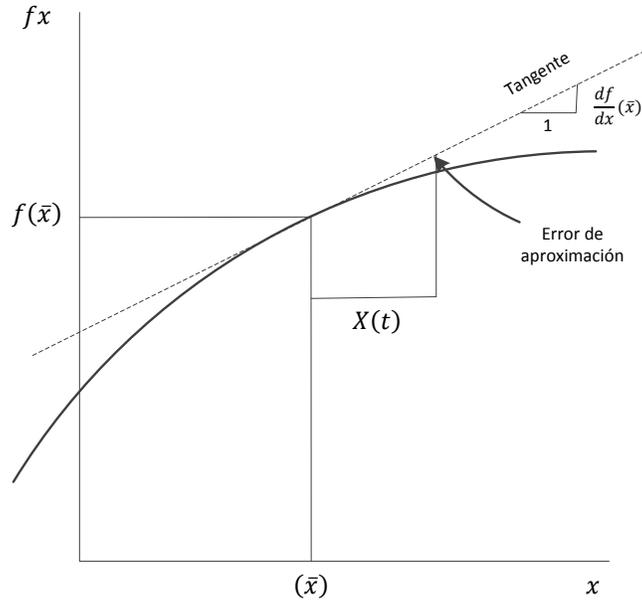


fig. 2-11 La aproximación lineal es tangente a la función en el punto de operación

Si las condiciones iniciales son

$$x(0) = \bar{x} \quad \frac{dx}{dt}(0) = 0 \quad X(0) = 0$$

Entonces

$$0 = f(\bar{x}) + \frac{df}{dx}(\bar{x})(0) + k$$

O

$$f(\bar{x}) + k = 0$$

Al sustituir en la ecuación en la ecuación (2-4), se tiene

$$\frac{dX(t)}{dt} = \frac{df}{dx}(\bar{x})X(t) \quad \text{Ec. 2-6}$$

Con esto se demuestra cómo se eliminan los términos constantes de la ecuación linealizada cuando el valor base es la condición inicial de estado estacionario, nótese que es posible omitir todos los pasos intermedios y llegar directamente de la ecuación (2-2) a la ecuación (2-6).

Linealización de funciones con dos o más variables.- Considérese la función no lineal de dos variables $f[x(t), y(t)]$; la expansión por series de Taylor alrededor de un punto (\bar{x}, \bar{y}) está dado por

$$f[x(t), y(t)] = f(\bar{x}, \bar{y}) + \frac{\partial f}{\partial x}(\bar{x}, \bar{y})[x(t) - \bar{x}] + \frac{\partial f}{\partial y}(\bar{x}, \bar{y})[y(t) - \bar{y}] + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(\bar{x}, \bar{y})[x(t) - \bar{x}]^2 + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}(\bar{x}, \bar{y})[y(t) - \bar{y}]^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}(\bar{x}, \bar{y})[x(t) - \bar{x}][y(t) - \bar{y}] + \dots \quad \text{Ec. 2-7}$$

La aproximación lineal consiste en eliminar los términos de segundo orden o superior, para obtener

$$f[x(t), y(t)] \doteq f(\bar{x}, \bar{y}) + \frac{\partial f}{\partial x}(\bar{x}, \bar{y})[x(t) - \bar{x}] + \frac{\partial f}{\partial y}(\bar{x}, \bar{y})[y(t) - \bar{y}] \quad \text{Ec. 2-8}$$

El error de esta aproximación lineal es pequeña para x y y en la vecindad de \bar{x} y \bar{y} .

2.10 Función de transferencia

Se define como una función de transferencias de un sistema lineal e invariante en el tiempo la transformada de Laplace de la respuesta impulsional del sistema, supuestas condiciones iniciales nulas [8].

Es decir en tiempo continuo sería

$$G(s) = \mathcal{L}[g(t)]$$

Y en tiempo discreto

$$G(s) = Z[g(k)]$$

El concepto de función de transferencia de un sistema descrito mediante una ecuación diferencial lineal e invariante en el tiempo se define como el cociente entre la transformada de Laplace de salida (función de respuesta) y la transformada de Laplace de la entrada (función de excitación); bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero. Considérese el sistema lineal e invariante en el tiempo descrito mediante la siguiente ecuación diferencial [6]:

$$\frac{d^n}{dt^n} y(t) + a_{n-1} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} y(t) + \dots + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m}{dt^m} u(t) + b_{m-1} \frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}} u(t) + \dots + b_0 u(t) \quad \text{Ec. 2-9}$$

Donde $u(t)$ es la entrada al sistema, $y(t)$ la salida del mismo si suponemos condiciones iniciales nulas y tomamos transformadas de Laplace en ambos lados de la ecuación el resultado es:

$$(s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_0)Y(s) = (b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_0)U(s)$$

Despejando $Y(s)$ obtenemos que

$$Y(s) = \frac{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_0}{b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_0} U(s)$$

Y de aquí que la forma general de la función de transferencia $G(s)$ para un sistema físico descrito por una ecuación diferencial ordinaria de la forma (2-9) sea una función racional de s del tipo.

$$G(s) = \frac{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_0}{b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_0}$$

A partir del concepto de función de transferencia es posible representar la dinámica de un sistema mediante ecuaciones algebraicas en s . Si la potencia más de s en el denominador de la función de transferencia es igual a n , el sistema se denomina sistema de orden n -ésimo.

El concepto de función de transferencia se utilizara en adelante y resulta conveniente el hacer algunas matizaciones al respecto [8]:

- La función de transferencia se ha definido para sistemas lineales e invariantes en el tiempo, por lo que no está definida en el caso de sistemas no lineales.
- Para obtener la función de transferencia se han puesto condiciones iniciales nulas
- La función de transferencia expresa la relación que existe entre una señal de entrada y una señal de salida, por lo que solo permite expresar de forma completa la dinámica de un sistema con una entrada y una salida; si el sistema tuviese más de una entrada y salida serían necesarias varias funciones de transferencia para expresar todas las posibles relaciones entre cada entrada y cada salida. En este caso estaríamos ante sistemas multi-variantes MIMO (Múltiple Input- Múltiple Output).
- La función de transferencia es independiente de la entrada al sistema.
- La función de transferencia de un sistema es únicamente función racional únicamente de s , y además con un denominador de grado mayor o igual que el numerador para que sea físicamente realizable.

2.10.1 Polos y ceros

Los polos de una función de transferencia son 1) los valores de la variable de la transformada de Laplace, s , que ocasionan que la función de transferencia se vuelva infinita o 2) cualesquiera raíces del denominador de la función de transferencia que son comunes a las raíces del numerador.

Los ceros de una función de transferencia son 1) los valores de la variable de transferencia de la transformada de Laplace s , que ocasiona que la función de transferencia se convierta en cero, o 2) cualesquiera raíces del numerador de la función de transferencia que sean comunes a las raíces del denominador [3].

2.11 Controlador o regulador

Definición de Controlador [14]

La misión de un controlador consiste en comparar el valor de consigna con el valor real de la magnitud de salida de la planta, y generar la señal de control más adecuada para minimizar los errores y obtener una respuesta lo más rápida posible ante variaciones de consigna o ante perturbaciones exteriores.

La acción de control que deberá ejercer el controlador para conseguir las prestaciones antes mencionadas depende del tipo de planta a controlar. Dicho de otra manera la función de transferencia del controlador debe escoger según la planta a controlar. Sin embargo la función de transferencia de los controladores suelen obedecer todas ellas a unos pocos modelos básicos de comportamiento o a combinaciones simples entre ellos. Dichos modelos básicos de comportamiento se denominan también acciones básicas de control.

Elección del algoritmo de control [15]

Para facilitar al diseñador de sistemas de control la elección del algoritmo de control más adecuado para implantar un regulador PID, diversos autores han establecido reglas prácticas en relación con las acciones de control que se deben utilizar para obtener un adecuado comportamiento. Dichas reglas pueden hacer referencia a la naturaleza de la variable que se controla o al tipo de respuesta del proceso cuando se le aplica una entrada en escalón.

Reglas relativas a la naturaleza de la variable que se controla

Para establecer estas reglas se tiene en cuenta el tipo de variable controlada, los casos más habituales son:

Control de caudal o de presión

Se trata de sistemas de respuesta rápida que en general incluye retardos despreciables y en los que puedan aparecer perturbaciones de alta frecuencia. El regulador más adecuado es el PI.

Control de nivel

Se trata de sistemas cuya respuesta puede ser más o menos rápida con retardos en general despreciables y en los que pueden aparecer perturbaciones de media frecuencia. El regulador más adecuado es el PI o el PID.

Control de temperatura

Se trata de sistemas de respuesta lenta que pueden o no tener retardos y en los que pueden aparecer perturbaciones de baja frecuencia. El regulador más adecuado es el PI o el PID.

Control de composición de líquidos

Se trata de sistemas en los que predomina el retardo debido al análisis de la mezcla. El regulador más adecuado es el PI, aunque también se puede utilizar otros tipos de controladores como por ejemplo el Predictor de Smith

Control de procesos con integradores

Se trata de procesos que integran algún elemento integrador que les proporciona un comportamiento adecuado en régimen permanente tal como el control de procesos térmicos o ciertos controles de nivel el regulador más adecuado es el regulador PD o PID.

Control en cascada

Se trata de procesos en los que el efecto de una perturbación medible (variable secundaria) puede ser corregido (controlado) antes que de afecte significativamente a la variable del proceso (variable primaria). Para ello se necesitan de dos bucles de control anidados, uno exterior o primario y otro interior o secundario para que se pueda aplicar este tipo de control la dinámica variable secundaria debe ser más rápida que la variable primaria. En el bucle primario el regulador más adecuado es el PI o PID. En el bucle secundario el regulador más adecuado es el P o PI cuando la variable secundaria es significativamente más rápida que la primaria. Cuando no se consigue un regulador del tipo PI o PD un compromiso aceptable entre el comportamiento dinámico y el comportamiento estático de un sistema, han de utilizarse las dos acciones simultáneamente integrándolas en un regulador único que permita combinar las ventajas de ambas aproximaciones; se llega así al regulador proporcional integral diferencial que es un regulador realimentado continuo, que se vera de una forma breve a continuación.

2.11.1 Regulador o regulador PID

Un refinamiento adicional consiste dotar al controlador de una capacidad anticipativa utilizando una predicción de la salida basada en una extrapolación lineal (ver fig.2-12). [16]

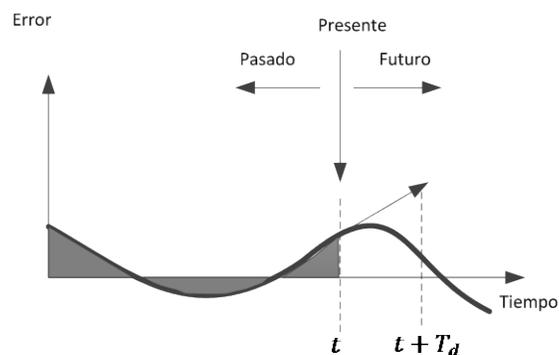


fig. 2-12 Un PID calcula su acción de control basándose en los errores de control pasado, presentes y futuros

Los miembros de la familia de controladores PID, incluyen tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D) y la diferencia entre la señal de entrada y la señal de salida se considera como señal de error $R(s) - Y(s) = e(t)$, se expresa como [17]

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

La acción de control es así una suma de tres términos que representa el pasado por la acción integral de error (el termino-I), el presente (el termino-P) y el futuro por una extrapolación lineal del error (el termino-D). Los parámetros del controlador se llaman: ganancia proporcional K_p , tiempo integral T_i y tiempo derivativo T_d .

Haciendo la transformada de Laplace y obteniendo la función de transferencia de la etapa se tiene:

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad \text{Ec. 2-10}$$

La acción proporcional [18]

Corrige la posición de la válvula en una cuantía proporcional a la desviación. Es de efecto instantáneo y enérgico, pero suele presentar desviación permanente.

Acción integral

Mueve la válvula a una velocidad proporcional a la acumulación del error o desviación. Es de efecto lento y progresivo pero sigue actuando hasta anular la desviación permanente.

Es decir su función principal es de asegurar de que la salida del proceso coincide con el punto de consigna en estado estacionario. Con control proporcional, hay normalmente un error de control en estado estacionario. Con acción integral una acumulación positiva conducirá siempre a una señal de control creciente, y una acumulación negativo dará una señal de control decreciente sin tener en cuenta lo pequeño que sea el error

Acción derivativa

Corrige la posición de la válvula en una cantidad proporcional a la velocidad de cambio de la desviación. Ello produce un efecto anticipativo al tener en cuenta la tendencia de la variable controlada, independiente de su valor actual, esta acción mejora la estabilidad en lazo cerrado.

En la fig.2-13, se muestra la estructura del controlador en forma de diagrama de bloques. El controlador dada por la ecuación (2-10) se llama no interactuante la razón para esta

nomenclatura es que el tiempo integral T_i no influye sobre la parte derivativa, y el tiempo derivativo T_d no influye sobre la parte integral.

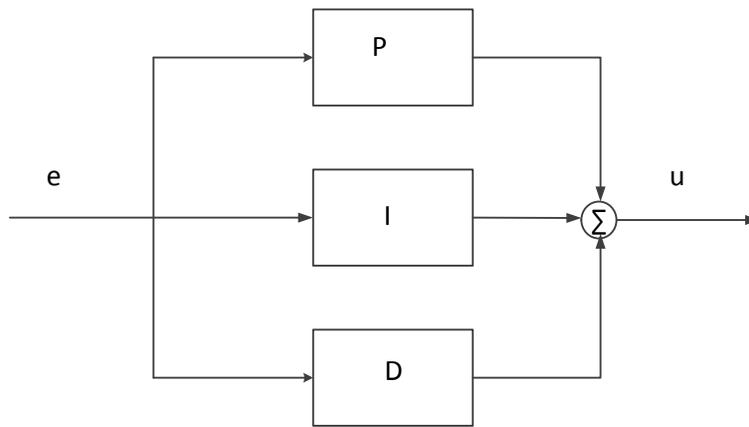


fig. 2-13 Forma no interactuante

Los controladores PID se utilizan en el 95% de los sistemas de control continuo que existe en la industria debido a gran parte a su simplicidad y a que es posible utilizar un procedimiento de prueba y error, para seleccionar la proporción en que se combinan las tres acciones PID sin que el usuario tenga que tener un dominio profundo de la teoría de control. El controlador PID es una implementación simple de la idea de realimentación; tiene la capacidad de eliminar errores en estado estacionario mediante la acción integral, y puede anticipar el futuro con la acción derivativa. Los controladores PID o incluso los controladores PI son suficientes para muchos problemas de control particularmente cuando las dinámicas del proceso son benignas y los requisitos de comportamiento son modestos. El control PID se combina con cierta capacidad lógica, funciones secuenciales, selectores y bloques de funciones sencillos para construir así los complicados sistemas de automatización utilizados en la producción de energía transporte y procesos de fabricación. Se ha comprobado empíricamente que el controlador PID es capaz de resolver un amplio espectro de problemas de control.

2.12 Nota sobre la señal de error o desviación

Hasta aquí hemos asignado a la señal de error o desviación la diferencia [18]

$$e = c - m$$

c = valor de consigna

m = Señal de medida

$e = c - m$ = Señal de error o desviación

De este modo tendremos que según hemos visto, la ecuación de un controlador que contenga las tres acciones posibles es

$$y = y_0 + G \left[e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + T_d \frac{de}{dt} \right]$$

Esto es,

$$y = y_0 + G \left[(c - m) + \frac{1}{T_i} \int_0^t (c - m) dt + T_d \frac{d}{dt} (c - m) \right]$$

Que también podríamos escribir como

$$\Delta y = G \left[e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + T_d \frac{de}{dt} \right]$$

En donde se ha hecho $\Delta y = y - y_0$

Donde

y = Salida del controlador

G = Ganancia

T_i = Tiempo integral

T_d = Tiempo derivativo

Es decir que un incremento en la desviación implica un aumento en la señal de salida pero tal incremento puede ser interpretado como un decremento en la medida. Entonces el controlador reacciona aumentando la salida para que, a su vez, lo haga la variable controlada (a través de los componentes intermedios) teniendo así a recuperar las condiciones previas. Obviamente si uno de estos componentes (o un número impar de ellos) tiene una ganancia negativa, habrá que asignar una ganancia negativa al controlador, pues los componentes de lazo cerrado deben mostrar globalmente una ganancia positiva, para que con la inversión de signo que aporta el comparador se obtenga una realimentación negativa.

No obstante nada impide considerar la señal de error en la forma:

$$e = m - c$$

Entonces la ecuación del controlador se convierte en

$$\Delta y = -G (e + \dots)$$

O bien

$$-\Delta y = G (e + \dots)$$

Ahora en el sumatorio de entrada al controlador, esto es, en el dispositivo que llamamos comparador, el punto de consigna entra restando, mientras que la medida actúa sumando este cambio de signos lo compensamos invirtiendo el signo de la ganancia del controlador.

Todo esto tiene la siguiente importancia conceptual: al asumir esta filosofía se tiene que la señal de error o desviación es positiva cuando la medida supera el valor de la consigna, y por consiguiente es negativa cuando la medida es inferior a la consigna lo cual parece más intuitiva desde el punto de vista práctico.

2.13 Modelos mediante diagrama de bloques

Establecer modelos para sistemas complicados es el resultado de entrelazar algunos subsistemas o elementos, cada uno de los cuales tiene su propia función de transferencia. Los diagramas de bloques se pueden utilizar para representar cada uno de estos subsistemas y, el agrupamiento del arreglo enlazado, el sistema como un todo. [19] [20] .

Las funciones de transferencia y diagrama de bloques tienen ciertas características y propiedades que debemos tomar en cuenta al momento de trabajar con ellas. La primera es su uni-direccionalidad esto es que la información fluye solamente en una dirección. Una entrada produce una salida y no viceversa. La segunda propiedad es que el diagrama de bloque no comunica la energía asociada en mantener la operación o la energía asociada con la variable; de hecho si un diagrama de bloque tiene una corriente de entrada este no comunica el voltaje necesario para producir esa corriente. Tercero el diagrama de bloque no comunica el tipo de sistema involucrado es decir no indica si el componente que está describiendo es mecánico, eléctrico o fluido, por esta razón deberemos escoger los nombres de las variables apropiadas para etiquetar a la salida del bloque. Una cuarta propiedad está asociada con los bloques que hace referencia a que las condiciones de carga no pueden ser descritas por medio de diagrama de bloques.

2.13.1 El diagrama de bloques

En la figura 2-14 se muestra como representar los elementos en un diagrama de bloques, las flechas se usan para representar las direcciones de flujo de la señal. Cuando las señales son funciones del tiempo se representan con letras minúsculas seguidas por (t) por ejemplo $i(t)$, aunque con frecuencia (t) se omite cuando es obvio que las señales son funciones del tiempo. Cuando las señales están en el dominio s se representan con letras mayúsculas seguidas por (s), por ejemplo $I(s)$. Un punto de suma es en el que las señales se suman algebraicamente si una de las señales que entran a dicho punto se indica como positiva y la otra como negativa, entonces dicha suma es la diferencia entre las dos señales, si ambas señales se indican como positivas entonces la suma es la adición de las dos señales a este punto de suma se le denomina comparador.

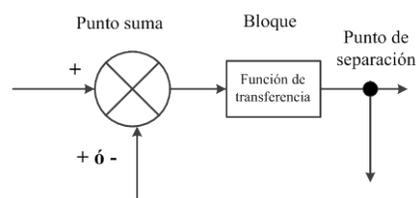


fig. 2-14

La señal de realimentación se sustrae del valor deseado para obtener la señal de error. Cuando de algún punto de la trayectoria de la señal, se toma la señal, el punto de separación se representa de la misma forma que en un circuito eléctrico, donde la unión de dos conductores permite que la corriente se separe, es decir la unión se representa mediante el encuentro de dos líneas y la unión se indica con “.” En general el bloque se dibuja con la función de transferencia escrita dentro de él.

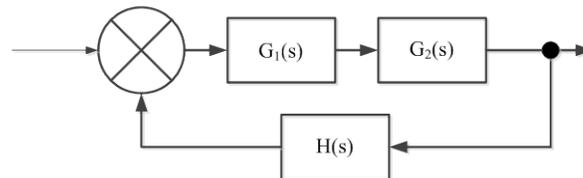


fig. 2-15a

El termino trayectoria directa se usa para los elementos a través de los cuales pasa la señal en la dirección entrada-salida a lo largo del sistema (fig. 2-16a). Las funciones de transferencia para los elementos en esta trayectoria directa en general se designan mediante G o $G(s)$ el termino trayectoria de realimentación se usa para los elementos por los cuales pasa la señal cuando se alimenta de regreso desde la salida hacia la entrada (fig. 2-16a); las funciones de transferencia para los elementos en esta trayectoria de realimentación por lo común se designan por H o $H(s)$. El termino trayectoria de pre-alimentación se usan para los elementos que están en paralelo con la trayectoria directa, y a través de los cuales la señal se mueve en la misma dirección es decir entrada salida (fig.2-17b) [19]

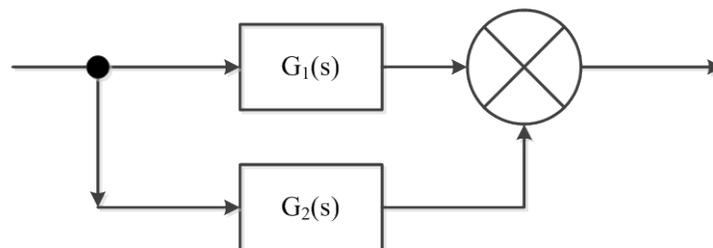


fig. 2-16b

2.13.2 Reducción de diagramas de bloques

Esta operación ayuda a condensar una serie de bloques y funciones de transferencia en un diagrama de bloque dentro de una sola función de transferencia; aunque a través de este proceso se elimina la accesibilidad a variables intermedias y excluye la posibilidad de introducir condiciones iniciales, tenga en cuenta que las características de estabilidad de un sistema lineal dependen de la estructura del sistema que puede ser evaluado desde los coeficientes de la función de transferencia y no de las condiciones iniciales o tipo de entrada.

Las reglas aquí indicadas son válidas siempre que se trate de elementos lineales. Si la transmitancia de un bloque no es lineal es posible en general linealizar su función en el punto de trabajo lo que representa una buena aproximación a efectos de llevar a cabo cualquier análisis del sistema. Las variables se representaran con letras minúsculas, mientras que las mayúsculas representaran las transmitancias de los bloques.

Debe recordarse que la transmitancia de un bloque es siempre la relación entre las señales de salida y entrada, por lo que si llamamos G a la transmitancia de los bloques, x a su entrada e y a su salida podría escribirse

$$y = Gx;$$

$$G = \frac{y}{x}$$

En todo momento podrán aplicarse las leyes conmutativas, asociativas y distributivas, igualmente válidas en algebra de bloques. De hecho las reglas del algebra de bloques se basan en estas leyes que podemos resumir así:

$$GF = FG$$

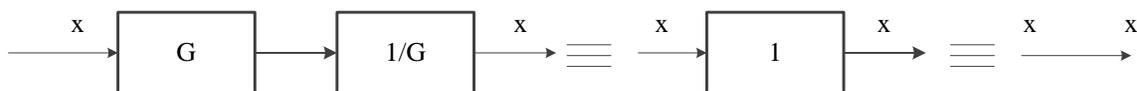
$$G + F = F + G$$

$$Gx + Gy = G(x + y)$$

$$Gx + Fx = (G + F)x$$

$$x - y = x + (-y) = x - (+y)$$

Por otra parte un bloque con ganancia unitaria puede ser siempre suprimido dejando solamente la línea de flujo se podría efectuar la siguiente simplificación:



2.13.3 Reglas algebraicas

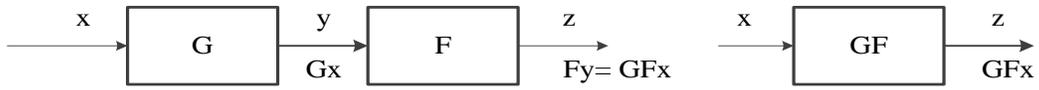
Además de las ya citadas mencionaremos algunas otras ya que en su momento lo utilizares para ello solo planteamos las que nos sirve para nuestro caso actual.

- a) Bloques en serie.- Pueden ser sustituidos por un único bloque, cuya transmitancia sea el producto de las transmitancias de cada bloque.

$$y = Gx$$

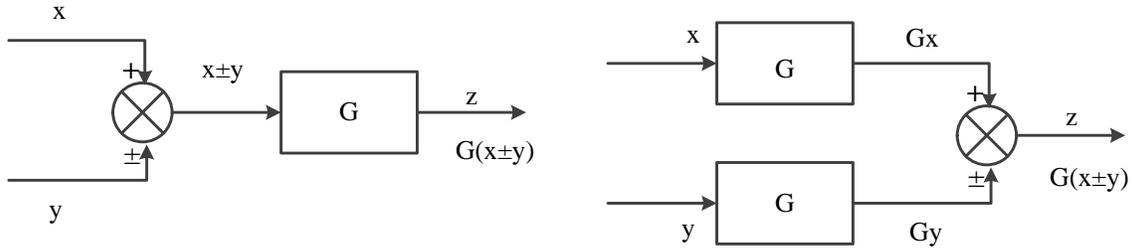
$$z = Fy$$

$$z = GFx$$

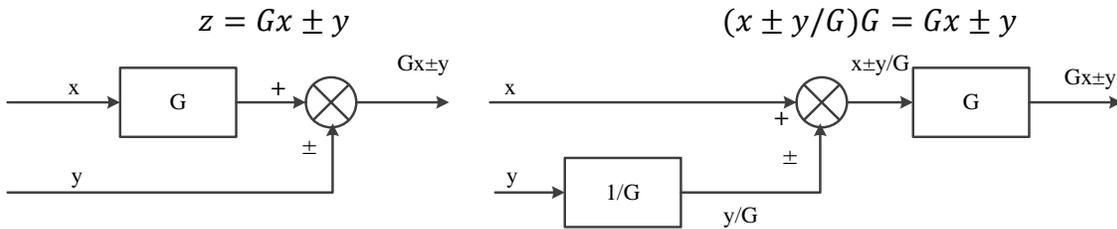


b) Desplazamiento de un punto de suma detrás de un bloque

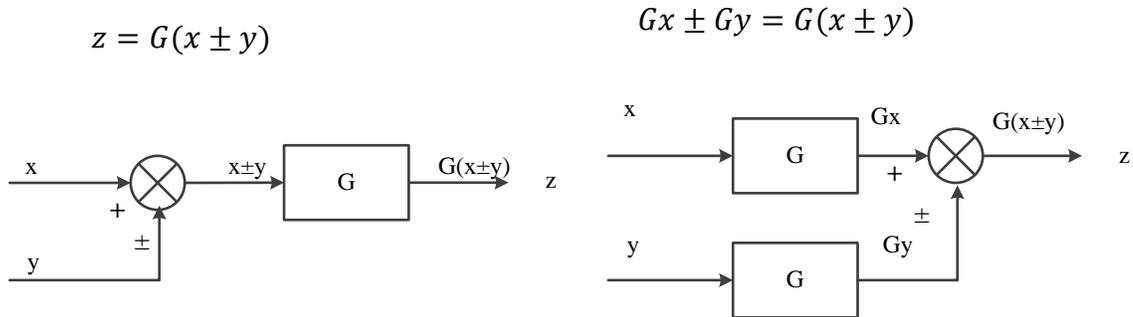
$$z = (x \pm y)G = Gx \pm Gy$$



c) (a) Desplazamiento de un bloque detrás de un punto de suma

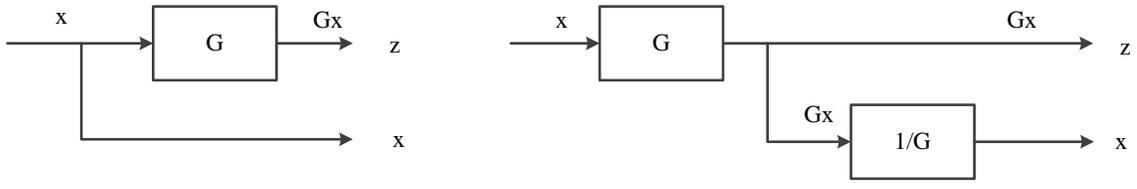


(b) Desplazamiento de un bloque delante de un punto de suma

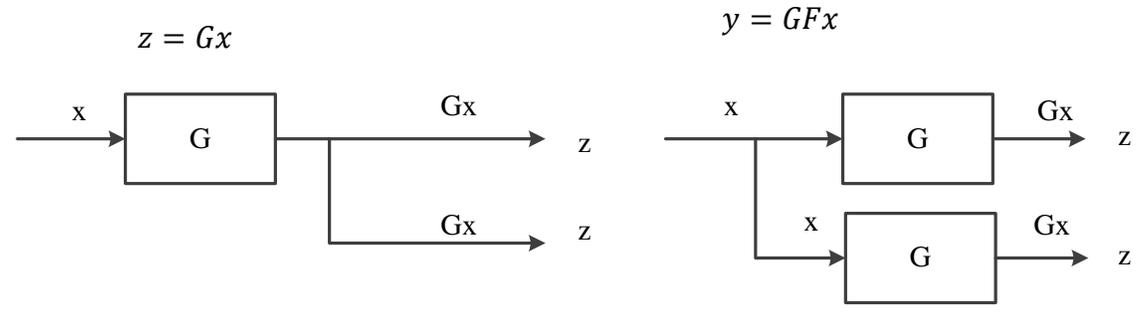


d) (a1/a2) Desplazamiento de un punto de derivación detrás de un bloque

$$z = Gx \quad Gx(1/G) = x \quad y = Fx \quad Gx(F/G) = y$$



(b1/b2) Desplazamiento de un punto de derivación delante de un bloque



Capítulo 3.
METODOLOGÍA

3.1 El proceso de diseño

Aquí establecemos una secuencia ordenada para el diseño de sistemas de control realimentados en la figura 3-1 se muestra el proceso descrito. El sistema de control de posición acimutal de la antena, es representativo de los sistemas de control que deben ser analizados y diseñados. Inherente en la figura 3-1 es la realimentación y comunicación durante cada fase, por ejemplo si la prueba (paso 6) muestra que no se han cumplido los requisitos, el sistema debe ser rediseñado y probado nuevamente. A veces los requerimientos son incompatibles y el diseño no se puede lograr. En estos casos se tiene que especificar los requerimientos y repetir el proceso de diseño [3].

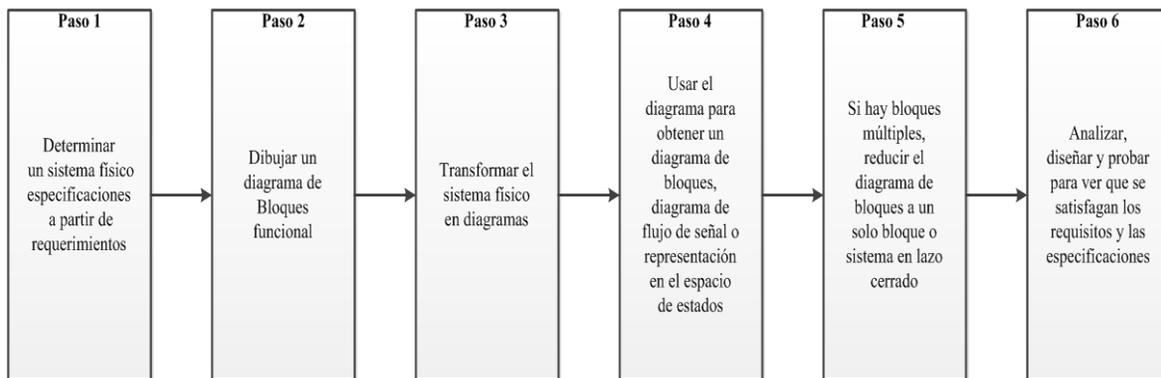


fig. 3-1 Proceso de diseño de un sistema de control

Paso 1. Transformar los requerimientos en un sistema físico

Comencemos por transformar los requerimientos en un sistema físico. Por ejemplo en el sistema de posición de control acimutal los requerimientos expresarían el deseo de colocar la antena en su posición desde un lugar remoto, y describir características como el peso y dimensiones físicas. Con el uso de los requerimientos se determinan las especificaciones de diseño como la respuesta transitoria deseada y la precisión en estado estable.

En la figura 3- 2 se detalla nuestro estudio, de la planta se obtiene un valor de altura en función del tiempo $h(t)$, este valor se realimenta y se compara con el valor de consigna fijado, esta diferencia es conocida como el error del sistema, la misma que ingresa al regulador en donde se toma una decisión para actuar sobre la variable manipulable. Si $h(t) > h_0$ el regulador dará una señal con la cual amplíe el grado de apertura de la válvula motorizada y si $h(t) < h_0$, la señal del regulador sobre el grado de apertura será de cierre; todo ello para que el sistema funcione en equilibrio, o lo que es lo mismo que $q_e(t) = q_s(t)$, donde se produciría que $\tau_0 = \tau(t)$, y así lograr que $h_{Real} \rightarrow h_0 = cte$ controlando de esta manera el nivel del tanque ante una entrada de caudal variante con el tiempo, con un grado de apertura inicial dado.

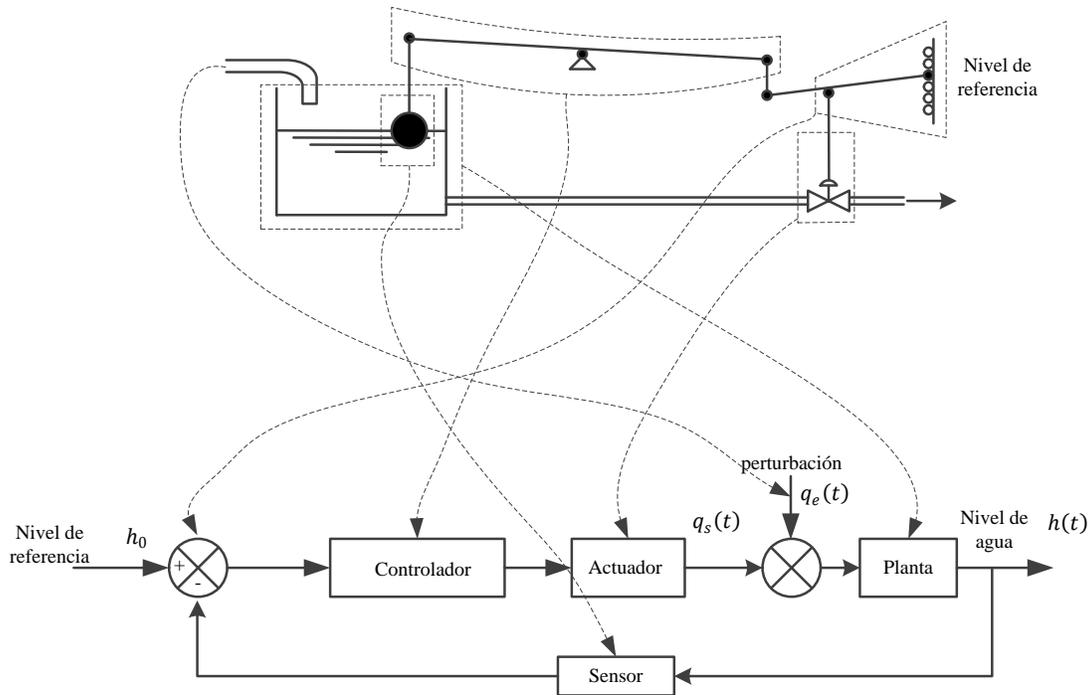


fig. 3-2 Sistema de control de nivel

Paso 2. Trazar un diagrama de bloques funcional

El diseñador ahora traduce una descripción cualitativa del sistema en un diagrama de bloques funcional; que describe los componentes del sistema (es decir función o hardware) y muestra sus interconexiones, aquí se indica por ejemplo el transductor de entrada y controlador así como posibles descripciones del hardware como amplificadores y motores (ver figura 3-3). En este punto el diseñador puede elaborar una distribución detallada del sistema de la cual se puede iniciar la siguiente fase de la secuencia de análisis y diseño, mediante la creación de un diagrama esquemático.

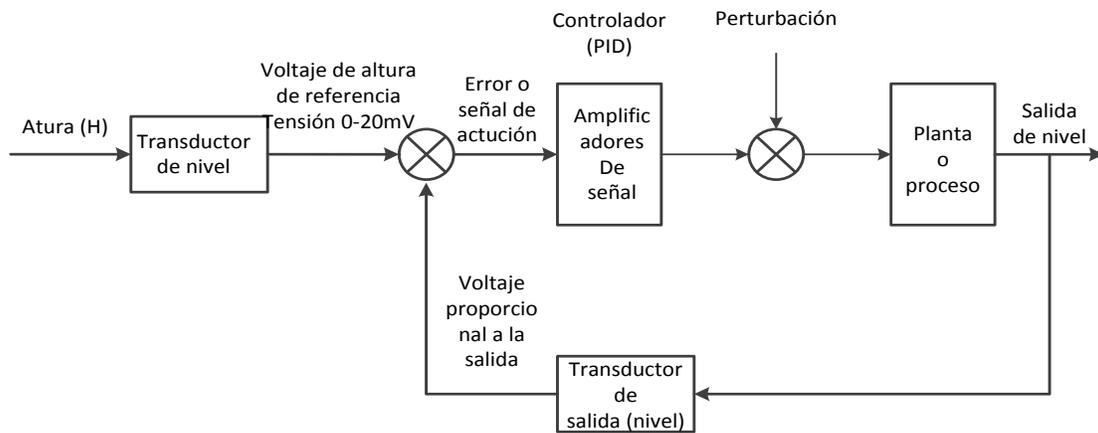


fig. 3-3 Diagrama funcional del Nivel en un Depósito

Paso 3. Crear un diagrama esquemático

Como ya hemos visto un sistema de control está formado por componentes eléctricos, mecánicos, etc. Una vez elaborado la descripción de un sistema debemos transformar el sistema físico en un diagrama esquemático (figura 3-4); podemos empezar con la descripción física contenida en el sistema del diagrama de bloques funcional y deducir un diagrama esquemático. Para ello haremos aproximaciones acerca del sistema y despreciar ciertos fenómenos porque de otro modo el diagrama esquemático no se puede manejar, y es difícil que de él se obtenga un modelo matemático útil, durante la siguiente fase de la secuencia de análisis y diseño.

Aquí se empieza con una representación sencilla del diagrama esquemático y en fases subsiguientes de la secuencia de análisis y diseño se verifica las suposiciones hechas acerca del sistema físico, por medio de análisis y simulación por computadora. Si el diagrama esquemático es demasiado sencillo y no toma en cuenta de manera adecuada el comportamiento observado; deberemos agregar fenómenos al diagrama esquemático que antes se consideraban insignificantes, por ejemplo la simplificación que se va hacer en el sistema de control de nivel de nuestro caso es:

- La dinámica que existe entre válvula – controlador (retraso) [21]
- La realimentación es unitaria; porque se traduce directamente la señal de altura. [19]
- Las presiones P_0 y P_2 son atmosféricas e igual a cero.
- $q_{e0} = q_{s0}$, por estar en régimen permanente (condiciones iniciales)
- Las pérdidas menores por accesorios son despreciables.

Las decisiones tomadas al crear el diagrama esquemático surgieron del conocimiento del sistema físico, de las leyes físicas que gobiernan el comportamiento del sistema y la experiencia práctica.

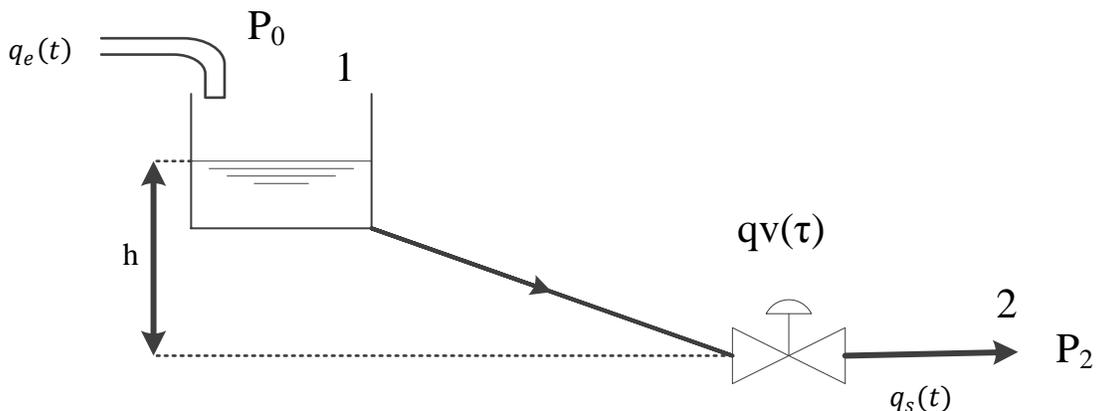


fig. 3-4 Diagrama esquemático

Paso 4. Crear un modelo matemático (diagrama de bloques)

Una vez trazado el diagrama esquemático se utiliza las leyes físicas (por ejemplo las leyes de Kirchhoff para redes eléctricas y la ley de Newton para sistemas mecánicos) junto con suposiciones de simplificación, para hacer un modelo matemático del sistema.

Las leyes de Newton y Kirchhoff llevan a modelos matemáticos que describen la relación entre la entrada y salida de sistemas dinámicos, uno de estos modelos es la ecuación diferencial lineal anteriormente vista (ecuación 2-9).

Las suposiciones de simplificación hechas en el proceso de obtener un modelo matemático suele llevar a una forma de bajo orden de la ecuación 2-9, sin las suposiciones el modelo del sistema podría ser de orden superior o descrito con ecuaciones diferenciales no lineales variantes con el tiempo, o en derivadas parciales (como resultara en nuestro caso). Lo cual estas ecuaciones complican el proceso de diseño, desde luego todas las suposiciones deben verificarse y todas las simplificaciones justificarse por medio de análisis y prueba. Si las hipótesis no se pueden justificar, entonces el modelo no se puede simplificar.

Para crear nuestro modelo matemático nosotros utilizaremos la función de transferencia. Este modelo como ya se vio se deduce de la ecuación diferencial lineal e invariante en el tiempo si se usa lo que llamamos la transformada de Laplace, debido a que produce una información más intuitiva que la ecuación diferencial, y porque estaremos en capacidad de cambiar parámetros del sistema y rápidamente captar el efecto de estos cambios en la respuesta del sistema. También se utilizará la función de transferencia ya que es útil para hacer un modelo de la interconexión de subsistemas (controlador, perturbación y planta) al formar un diagrama de bloques semejantes al diagrama de bloques funcional, pero con una función matemática dentro de cada bloque; además de esta función de transferencia obtendremos la ecuación característica clave para conocer donde está ubicado nuestro sistemas (estable, inestable), así como para diseñar nuestro regulador.

A continuación obtendremos las funciones de transferencia de cada uno de estos subsistemas.

3.2 Funciones de transferencia en el control de nivel del tanque frente a los cambios de entrada y los cambios en la apertura de la válvula

Para ello partiremos identificando cada uno de las variables del diagrama esquemático representado anteriormente, para luego hacer el balance general del sistema y obtener las funciones de transferencias respectivas.

$q_e(t)$ =Caudal de entrada al depósito, m^3/s .

$q_s(t)$ = Caudal de salida del depósito, m^3/s .

q_{e0} = Caudal en régimen permanente a la entrada del depósito (antes de que haya ocurrido un cambio), m^3/s

q_{s0} = Caudal en régimen permanente a la salida del depósito (antes de que haya ocurrido un cambio), m^3/s .

h_0 = Nivel de agua en el depósito en régimen permanente (antes de que haya ocurrido un cambio), m

$\Delta h(t)$ = Variación del nivel de agua en el depósito a partir de su valor en régimen permanente en función del caudal de entrada y grado de apertura (de la válvula de regulación), m

h = Nivel del agua en el depósito, m

K_v = coeficiente de la válvula $m^3/h(bar)^{1/2}$

$\tau(t)$ = Grado de apertura de la válvula este término representa la fracción de apertura de la válvula; si su valor es 0, indica que la válvula está cerrada, si su valor es 100 indica que está completamente abierta.

$\Delta P(t)$ caída de presión a través de la válvula (Pa).

A_d = Área del depósito.

q_v = Caudal de la válvula.

$\Delta q(t)$ = variación de caudal.

Con Bernoulli entre el punto 1 y 2 en estado no permanente se tiene:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_f + h_v + h_m + \frac{L_t}{g} \frac{dV_t}{dt}$$

Teniendo en cuenta que las presiones son atmosféricas y z_2 está en la referencia se tiene:

$$z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + h_f + h_v + h_m + \frac{L_t}{g} \frac{dV_t}{dt} \quad \text{Ec. 3-1}$$

Sabiendo que $z_1 = h$. De esta manera se comenzara a calcular las pérdidas de carga en la válvula, término cinético a la salida (punto 2) pérdidas de carga en la tubería y finalmente pérdidas menores debido a los accesorios en la instalación.

Función de transferencia del actuador

$$h_v = \frac{\Delta P_v}{\gamma} \quad \text{Ec. 3-2}$$

Dónde:

$$\gamma = 9810 \frac{N}{m^3}, \Delta P_v = \text{Pa}$$

$$q_t = K_v(\tau) \sqrt{\Delta P_v / 10^5} \quad \text{Ec. 3-3}$$

Reemplazando 3-2 en 3-3 se tiene

$$q_t = K_v(\tau) \sqrt{h_v \gamma / 10^5}$$

Como el $K_v = (m^3/h/Bar^{1/2})$, y despejando h_v :

$$h_v = q_t^2 \left(\frac{3600}{K_v(\tau)} \right)^2 \frac{10^5}{\gamma}$$

Para conocer la pérdida real del actuador en base a su grado de apertura (k y/o K_v) se ajustara una válvula, que en nuestro caso será de guillotina, a una función potencial en base a su coeficiente de caudal o factor de flujo $K_v(\tau)$, de manera que su curva de coeficientes de pérdida ajustada tomara la siguiente forma (ver figura 3-5):

$$K_v(\tau) = C_v * \tau^n$$

Donde:

Válvula de guillotina	Valor
Diámetro	1500mm
C_v =	7.1942
τ =	0 – 100%
n =	1.8551

Tabla 3-1 Características de la válvula

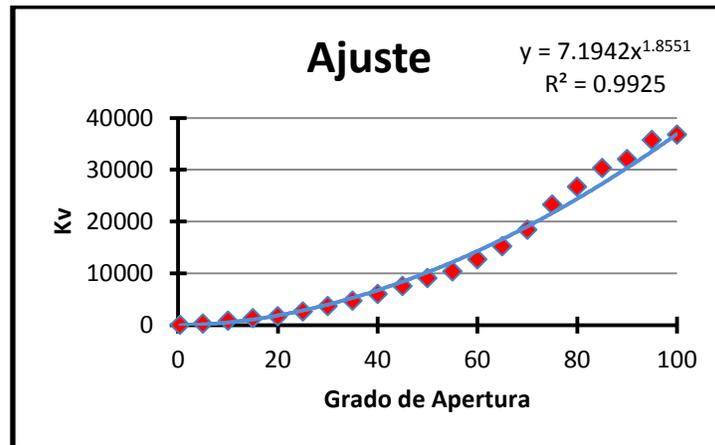


fig. 3-5 Ajuste válvula de guillotina

Así de esta manera la ecuación anterior quedara de la forma.

$$h_v = q_t^2 \frac{3600^2}{C_v^2 \tau^{2n}} * \frac{10^5}{\gamma}$$

Pero si llamamos $A = \frac{3600^2}{C_v^2} \frac{10^5}{\gamma}$

$$h_v = q_t^2 \frac{A}{\tau^{2n}}$$

Ec. 3-4

Función de transferencia del término cinético

$$\frac{V_2^2}{2g} = \frac{8q_t^2}{\pi^2 D_s^4 g} \quad \text{Ec. 3-5}$$

Donde D_s es el diámetro de salida en el punto 2

Función de transferencia de las pérdidas de carga en la tubería

$$h_f(m) = \frac{8f_t L_t q_t^2}{\pi^2 D_t^5 g} \quad \text{Ec. 3-6}$$

f_t = Factor de fricción.

L_t = Longitud de la tubería.

D_t = Diámetro de la tubería.

Función de transferencia de las pérdidas de carga menores

$$h_m(m) = \frac{8k_t q_t^2}{\pi^2 D_t^4 g} \quad \text{Ec. 3-7}$$

Dónde:

k_t = Pérdidas menores debido a los accesorios en la tubería.

Función de transferencia del término de inercia en función del caudal

$$\frac{L_t}{g} \frac{dV_t}{dt} = \frac{L_t}{gA_t} * \frac{dq_t}{dt}$$

$$\text{Pero } C = \frac{L_t}{gA_t}$$

$$\frac{L_t}{g} \frac{dV_t}{dt} = C \frac{dq_t}{dt} \quad \text{Ec. 3-8}$$

Reemplazando las ecuaciones (3-4 a 3-8) en la ecuación (3-1) y haciendo que:

$$B = \frac{8}{\pi^2 D_s^4 g} + \frac{8f_t L_t}{\pi^2 D_t^5 g} + \frac{8k_t}{\pi^2 D_t^4 g}$$

Se obtiene lo siguiente:

$$h = \left(\frac{A}{\tau^{2n}} + B \right) q_t^2 + C \frac{dq_t}{dt} \quad \text{Ec. 3-9}$$

El sistema en condiciones iniciales de la ecuación 3-9 tendremos lo siguiente:

$$\begin{aligned} h_o &= \left(\frac{A}{\tau_o^{2n}} + B \right) q_{to}^2 \\ q_{eo} &= q_{to} \\ \left. \frac{dq_t}{dt} \right|_o &= 0 \end{aligned}$$

De esta ecuación se despeja q_{to} que es el caudal de salida en (m^3/s), que trasiega la conducción.

Por lo tanto:

$$q_{to}(t) = \sqrt{\frac{h_o}{\frac{A}{\tau_o^{2n}} + B}} \quad \text{Ec. 3-10}$$

Haciendo el balance de masa dinámica alrededor del tanque se tiene:

$$q_e(t) - q_s(t) = A_d \frac{dh}{dt} \quad \text{Ec. 3-11}$$

De esta manera se puede observar que el caudal de salida es un término no lineal en la ecuación 3-9, por lo tanto se debe hacer uso de la expansión de la serie de Taylor con respecto a τ y q esta linealización se debe hacer alrededor de los valores de q_0 y τ_0 que son valores nominales en régimen permanente. Para lo cual se hará uso de la linealización de funciones con dos o más variables (2-7).

$$\begin{aligned} f[x(t), y(t)] &= f(\bar{x}, \bar{y}) + \frac{\partial f}{\partial x}(\bar{x}, \bar{y})[x(t) - \bar{x}] + \frac{\partial f}{\partial y}(\bar{x}, \bar{y})[y(t) - \bar{y}] \\ &+ \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(\bar{x}, \bar{y})[x(t) - \bar{x}]^2 + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}(\bar{x}, \bar{y})[y(t) - \bar{y}]^2 \\ &+ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}(\bar{x}, \bar{y})[x(t) - \bar{x}][y(t) - \bar{y}] + \dots \end{aligned}$$

Entonces utilizando la serie de expansión de Taylor para la ecuación (3-9) se tiene:

$$h(t) = h_o + \left. \frac{\partial f}{\partial q_t} \right|_{\tau_o, q_o} [q(t) - q_{to}] + \left. \frac{\partial f}{\partial \tau} \right|_{\tau_o, q_o} [\tau(t) - \tau_o] + C \frac{dq_t}{dt} \quad \text{Ec. 3-12}$$

Se debe tomar en cuenta que:

$$\Delta\tau = \tau(t) - \tau_0$$

De donde

$\tau(t)$ =Grado de apertura en función del tiempo al que tiende para alcanzar el nivel deseado h_0 (nuevas condiciones del sistema)

τ_0 =Grado de apertura actual en condiciones de régimen estable.

De este modo las variaciones se calcularán a partir de las condiciones iniciales.

$$\frac{\partial f}{\partial q_t} = 2q_{t0} \left(\frac{A}{\tau_0^{2n}} + B \right)$$

Y haciendo lo mismo con respecto a su grado de apertura (τ) se tiene:

$$\frac{\partial f}{\partial \tau} = -\frac{2nAq_{t0}^2}{\tau_0^{2n+1}}$$

Haciendo que:

$$E = 2q_{t0} \left(\frac{A}{\tau_0^{2n}} + B \right)$$

Y que

$$D = -\frac{2nAq_{t0}^2}{\tau_0^{2n+1}}$$

Y reemplazando en la ecuación (3-12), sin tomar en cuenta el signo de E; su resultado será:

$$h(t) = h_0 + E[q(t) - q_{t0}] + D[\tau(t) - \tau_0] + C \frac{dq_t}{dt} \quad \text{Ec. 3-13}$$

Con esta ecuación (3-13) se puede obtener soluciones precisas alrededor del punto de linealización h_0 y τ_0 , fuera de un cierto rango alrededor de este punto, termina la linealización lo cual da lugar a resultados erróneos.

Ahora se definen las siguientes variables de desviación

$$\Delta q_t(t) = q(t) - q_{t0}$$

$$\Delta\tau(t) = \tau(t) - \tau_0$$

$$\Delta h(t) = h(t) - h_0$$

Se sustituyen esas variables de desviación en la ecuación 3-13 diferencial linealizada y teniendo presente que si derivamos la siguiente ecuación: $\Delta q(t) = q(t) - q_{to}$; $\frac{dq_{to}}{dt} = 0$ debido a que es un término constante, de así que la ecuación resultará:

$$\Delta h(t) = E\Delta q_t(t) + D\Delta\tau(t) + C \frac{d\Delta q_t(t)}{dt} \quad \text{Ec. 3-14}$$

Si de la ecuación de continuidad le referimos en incrementos tenemos:

$$(q_e - q_{eo}) - (q_t - q_{to}) = A_d \frac{dh}{dt}$$

Donde reemplazando con las variables de desviación se tiene:

$$\Delta q_e(t) - \Delta q_t(t) = A_d \frac{d\Delta h(t)}{dt} \quad \text{Ec. 3-15}$$

Finalmente tomando la transformada de Laplace de las ecuaciones (3-14 y 3-15), y tomando en consideración que; en este trabajo le llamaremos de la siguiente manera:

$$\mathcal{L}[\Delta q_e] = Q_e(s); \quad \mathcal{L}[\Delta q_t] = Q_t(s); \quad \mathcal{L}[\Delta\tau] = T(s); \quad \mathcal{L}[\Delta h] = H(s).$$

$$H(s) = EQ_t(s) + DT(s) + CsQ_t(s) \quad \text{Ec. 3-16}$$

$$Q_e(s) - Q_t(s) = A_d sH(s) \quad \text{Ec. 3-17}$$

Dónde: $Q_t(s)$ = transformada de Laplace del caudal de salida del sistema, el que atraviesa la válvula

Si de (3-16) se despeja $Q_t(s)$; obtenemos lo siguiente:

$$Q_t(s) = \frac{H(s)}{E + Cs} - \frac{D}{E + Cs} T(s)$$

Sustituyendo esta última ecuación en (3-17) y despejando $H(s)$, obtenemos:

$$H(s) = \frac{Q_e(s)(E + Cs) + DT(s)}{A_d Cs^2 + A_d Es + 1}$$

En la figura 3-6 es el diagrama de bloques de la función de transferencia del sistema.

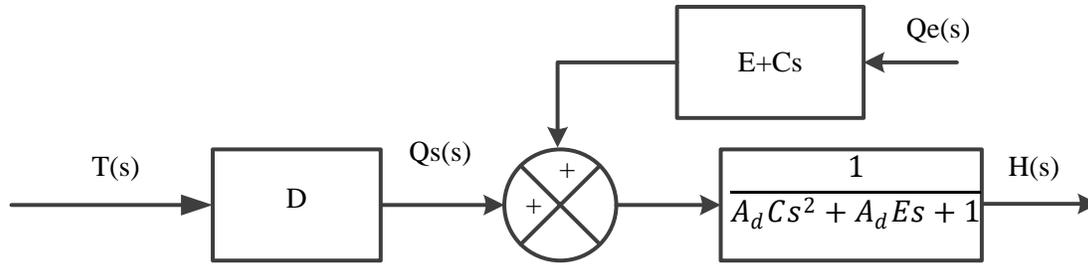


fig. 3-6 Diagrama de bloques del actuador, planta y perturbación

3.2.1 Obtención de la función de transferencia del controlador (regulador)

Como ya se analizó de donde proviene la ecuación 2-10, pues de esta partiremos para encontrar su respectiva función de transferencia, útil para el sistema de control en estudio.

Al algebrizar y sustituyendo $u(s) = \Delta\tau(s)$ a la ecuación 2-6 se tiene:

$$\frac{\Delta\tau}{E(s)} = K_p + \frac{K_p}{T_i s} + K_p T_d s \quad \text{Ec. 3-18}$$

Donde:

$$\frac{K_p}{T_i} = K_i$$

$$K_p T_d = K_d$$

Sustituyendo en la ecuación (3-18) y tomando la transformada de Laplace.

$$\frac{T(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

Para nuestro diseño el regulador será un PI para eliminar el error en estado estacionario y no tener problemas en cuanto al ruido amplificado por el término derivativo, representándolo en un diagrama de bloques se tiene ver figura 3-7:

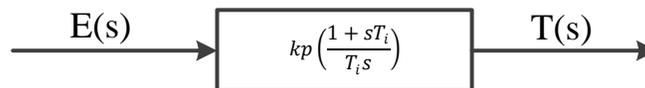


fig. 3-7 Diagrama de bloques del regulador PID

3.2.2 Función de transferencia del error

Como ya se indicó al regulador le llega una señal de comparación entre la lectura actual $H(s) = \Delta h(s)$ y la de consigna $H_R(s)$, la misma que hará cambiar la condición anterior de la variable manipulable (τ), para establecer que su caudal de entrada sea igual al caudal de salida. Entonces su función de transferencia queda expresado de la siguiente manera.

$$E_1(s) = [H(s) - H_R(s)]$$

Dónde:

$H(s)$ = transformada de Laplace de la altura en el depósito a partir de su valor en régimen permanente en función del caudal de entrada y grado de apertura.

$H_R(s)$ = transformada de Laplace de la altura de referencia en el depósito.

Esta función de transferencia en un diagrama de bloques será ver figura 3-8:

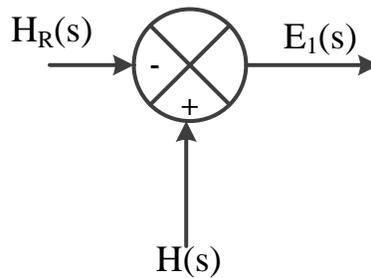


fig. 3-8 Función de transferencia del error

De este modo en función de lo desarrollado se obtiene el diagrama de bloques general de todo el sistema (figura 3-9), en la cual se establece un sistema con entrada perturbada y con realimentación unitaria $H(s)= 1$ ya que se traduce directamente en una señal de altura [19].

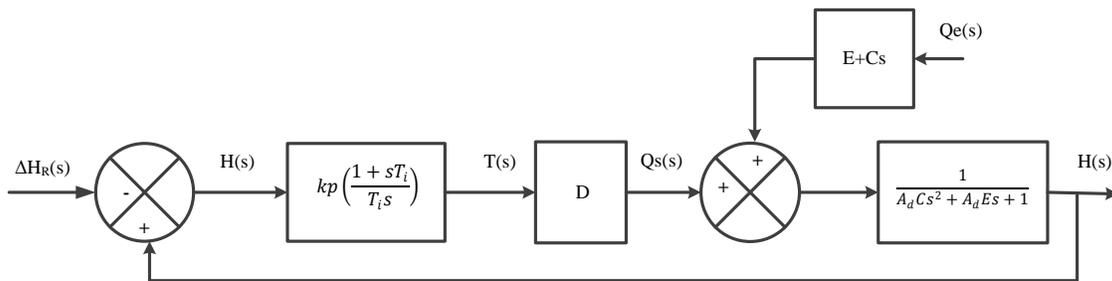


fig. 3-9 Diagrama de bloques general del control de nivel de un proceso con perturbación

Paso 5. Reducir el diagrama de bloques

Los modelos de un subsistema están interconectados para formar diagrama de bloques de los sistemas más grandes (diagrama de bloques funcional) donde cada bloque tiene una descripción matemática, nótese que el control de nivel del sistema en estudio debe reducirse

a un solo bloque con una descripción matemática que represente el sistema desde su entrada hasta su salida como se ilustra en la figura 3-10 una vez reducido el diagrama de bloques estamos listos para analizar y diseñar el sistema.

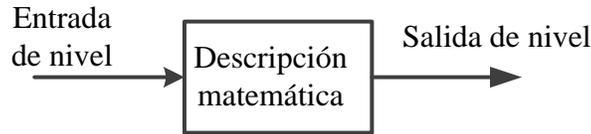


fig. 3-10 Diagrama de bloques equivalente para el sistema de control de nivel de un depósito

Para ello partiendo del bloque general y haciendo uso de las reglas algebraicas de bloques se obtendrá la función de transferencia y el diagrama de bloques respectivamente, tanto para $H(t)$ como para $T(t)$.

Si consideraremos que $H_R(s) = 0$, porque su valor de consigna no cambia en el tiempo, con lo cual se tendrá una sola entrada en el diagrama; se representara en función de esta única entrada $Q_e(s)$, y recordando que el error ingresado al controlador es: $\Delta H = H(s)$.

Por consiguiente su diagrama de bloques en su primera reducción quedara expresado de esta manera ver figura 3-11

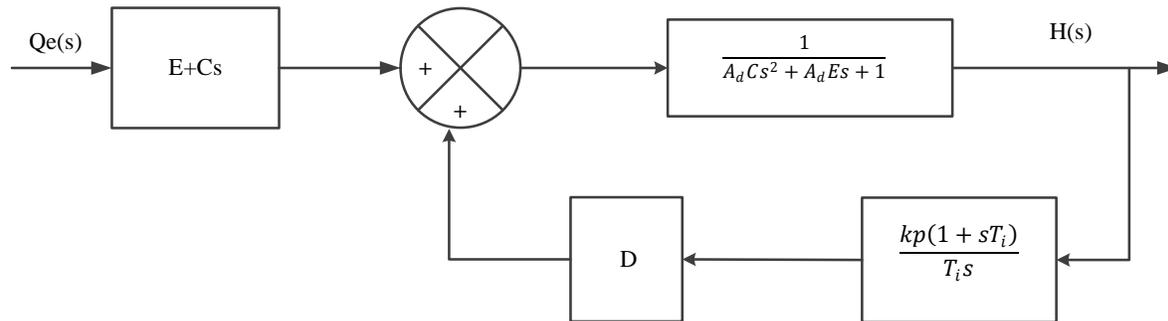


fig. 3-11 Diagrama de bloques en función del caudal de entrada

Por último de esta simplificación haremos de algebrizar, para llegar a obtener la función de transferencia que se busca salida/entrada del sistema

$$H(s) = \frac{1}{A_d C s^2 + A_d E s + 1} \left\{ Q_e(s)(E + C s) + \left[\frac{D K_p (1 + T_i s)}{T_i s} \right] H(s) \right\}$$

$$H(s) \left[1 - \frac{D K_p (1 + T_i s)}{T_i s (A_d C s^2 + A_d E s + 1)} \right] = \frac{T_i s Q_e(s)(E + C s)}{T_i s (A_d C s^2 + A_d E s + 1)}$$

$$H(s) = \frac{\frac{T_i s Q_e(s)(E + C s)}{T_i s (A_d C s^2 + A_d E s + 1)}}{\frac{A_d C T_i s^3 + A_d E T_i s^2 + T_i s - D K_p - D K_p T_i s}{T_i s (A_d C s^2 + A_d E s + 1)}}$$

$$\frac{H(s)}{Q_e(s)} = \frac{T_i s(E + Cs)}{A_d C T_i s^3 + A_d E T_i s^2 + T_i s - DK_p - DK_p T_i s}$$

$$\frac{H(s)}{Q_e(s)} = \frac{T_i s(E + Cs)}{A_d C T_i s^3 + A_d E T_i s^2 + (T_i - DK_p T_i) s - DK_p}$$

Ec. 3-20

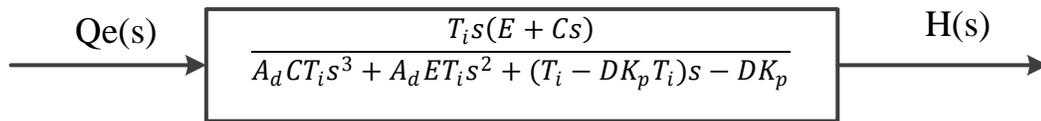


fig. 3-12 Función de Transferencia entrada- salida

La función $T(s)$ podemos obtenerla de dos formas; por Cramer o por los diagramas de bloques ya conocidos, se realizará la representación de dichos bloques, pero se desarrollara por Cramer y de esta manera comprobar que por los dos métodos se puede llegar a la función de transferencia $T(s)$.

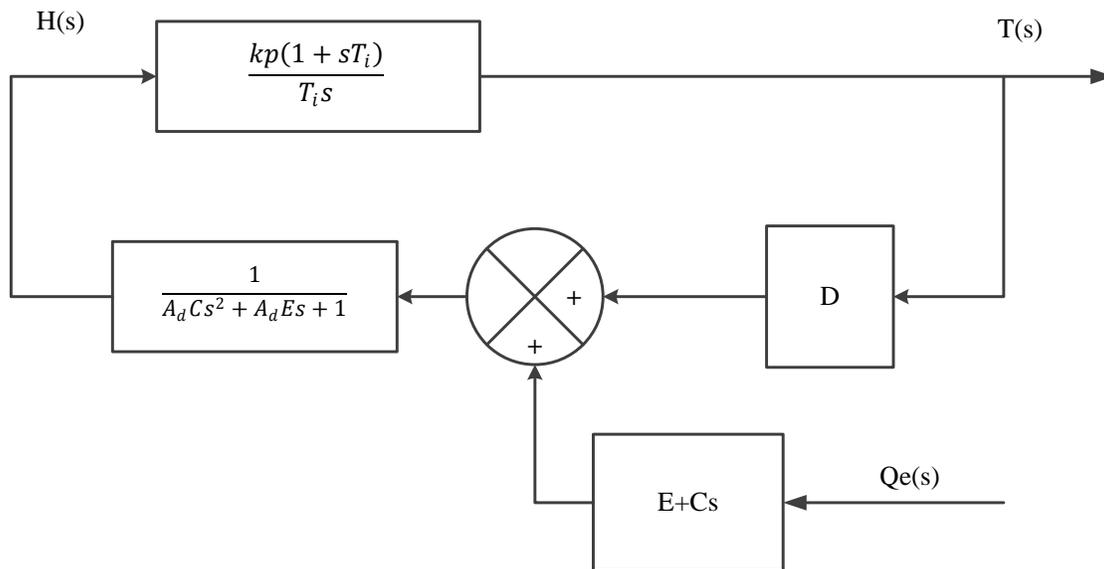


fig. 3-13 Diagrama de Bloques de T(S)

Ahora bien por el método de Cramer obtendremos la función $T(s)$ de transferencia Entrada/salida.

Ecuaciones generales:

$$H(s) - Q_t(s)(E + Cs) - DT(s) = 0 \text{ Ecuación de Bernoulli}$$

$$A_d s H(s) + Q_t(s) = Q_e(s) \text{ Ecuación de continuidad}$$

$$H(s) \left[\frac{K_p(1+T_i s)}{T_i s} \right] - T(s) = 0 \text{ Ecuación del regulador}$$

$$T(s) = \frac{\begin{vmatrix} 1 & -(E + Cs) & 0 \\ A_d s & 1 & Q_e(s) \\ K_p \frac{(1+T_i s)}{T_i s} & 0 & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & -(E + Cs) & -D \\ A_d s & 1 & 0 \\ K_p \frac{(1+T_i s)}{T_i s} & 0 & -1 \end{vmatrix}}$$

$$T(s) = \frac{1 \begin{vmatrix} 1 & Q_e(s) \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + (E + Cs) \begin{vmatrix} A_d s & Q_e(s) \\ K_p \frac{(1+T_i s)}{T_i s} & 0 \end{vmatrix}}{1 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} + (E + Cs) \begin{vmatrix} A_d s & 0 \\ K_p \frac{(1+T_i s)}{T_i s} & -1 \end{vmatrix} - D \begin{vmatrix} A_d s & 1 \\ K_p \frac{(1+T_i s)}{T_i s} & 0 \end{vmatrix}}$$

$$T(s) = \frac{-(E + Cs) \left[Q_e(s) * K_p \frac{(1+T_i s)}{T_i s} \right]}{-1 - (E + Cs) * A_d s + D * K_p \frac{(1+T_i s)}{T_i s}}$$

Multiplicando por menos 1 al numerador y denominador, para no alterar la ecuación:

$$T(s) = \frac{(E + Cs) \left[Q_e(s) * K_p \frac{(1+T_i s)}{T_i s} \right]}{1 + (E + Cs) * A_d s - D * K_p \frac{(1+T_i s)}{T_i s}}$$

De esta manera desarrollando queda $T(s)$ en función de $Q_e(s)$:

$$\frac{T(s)}{Q_e(s)} = \frac{K_p C T_i s^2 + (K_p E T_i + K_p C) s + K_p E}{A_d C T_i s^3 + A_d E T_i s^2 + (T_i - D K_p T_i) s - D K_p}$$

Ec. 3-21

Paso 6. Analizar y diseñar

La siguiente fase del proceso, a continuación de la reducción es el análisis y diseño. Si se está interesado solo en la operación de un subsistema individual, se puede saltar la reducción del diagrama de bloques y pasar de inmediato al análisis y diseño, en esta fase el ingeniero analiza el sistema para ver si las especificaciones de respuesta y requerimientos de desempeño pueden ser satisfechos por simples ajustes de los parámetros del sistema.

3.3 Método analítico para el diseño de controladores PID-PI.

Esta técnica se aplicará por conocimiento previo de la función de transferencia del proceso (control de nivel) que se desea controlar.

Método de asignación de polos

Este procedimiento es aplicable a sistemas que tengan el grado del denominador igual a 2 es decir de segundo grado (nuestro caso); en donde encontraremos los parámetros del controlador tal que la función de transferencia en cadena cerrada tenga unos polos predeterminados. Estos polos en bucle cerrado se determinaran de tal forma que se obtengan unas ciertas especificaciones en la respuesta del sistema.

En seguida se realizara un análisis de la ecuación característica para ello en la siguiente tabla identificaremos las variables del sistema, hay que recalcar que en este trabajo se utilizó la válvula de guillotina tipo V- Port, ya que nos permitirá mayor amplitud de maniobra. Todo esto es para obtener los valores que acompañan al término “s” que a su vez nos permitirá identificar los parámetros (K_d) , (K_p) y K_i por medio de la sintonización respectiva.

Datos del depósito	Valor
Cota de Solera. (m)	648.28
Sección. (m^2)	350.52
Cota de Consigna. (m)	653

Tabla 3-2 Variables del depósito de Ramblar

Datos Tubería 1	Valor
L (m)	10120.88
D. (mm)	1907.8
f	0.013
k	0

Tabla 3-3 Variables Tubería 1

Datos Tubería 2	Valor
L (m)	315
D. (mm)	2262.74
f	0.013
k	0

Tabla 3-4 Variables Tubería 2

Datos salida	Valor
Cota (m)	631
D. (mm)	2262.74
Peso esp. Agua N/m^3	9810

Tabla 3-5 Variables de salida

3.4 Cálculo y diseño de los diferentes parámetros del sistema

De la ecuación de Bernoulli en condiciones de régimen permanente partiremos para obtener el caudal en régimen permanente en m^3/s

Cálculo de la pérdida de carga en la válvula (h_v)

Con lo visto con anterioridad las pérdidas de la válvula están en función de su K_v y se propuso que la misma, se ajustara a una función potencial de este tipo $K_v(\tau) = C_v * \tau^n$. En

donde C_v y n son coeficientes del ajuste de la curva potencial mientras que τ es igual al grado de apertura de la válvula en función del tiempo.

Por lo que con el ajuste respectivo para una válvula de guillotina tipo V- Port de diámetro de 1500mm es:

$$C_v = 7.1942.$$

$$n = 1.8551.$$

$$\tau_0 = 59.94\% \text{ (en régimen permanente).}$$

τ_0 Es el grado de apertura de la válvula de guillotina, requerido para trasegar el caudal deseado (4500 l/s) en régimen permanente.

$$\text{De esta forma se tiene que: } h_{v0}(mca) = 0.6474 * q_t^2$$

Cálculo de las pérdidas de carga en la tubería (h_f)

$$\text{Por lo tanto: } h_f(m) = 0.4348 * q_{to}^2$$

Cálculo del término cinético referido al caudal $\left(\frac{v^2}{2g}\right)$

Aquí se debe tomar en cuenta el diámetro de salida; debido a que puede ser referido a la válvula o a la tubería, en nuestro caso está referido a la tubería de salida.

$$\text{De esta forma se tiene que: } \frac{v^2}{2g} = 0.00315 * q_{to}^2$$

Cálculo de las pérdidas menores (accesorios) (h_m)

Este cálculo se obviara debido al mínimo valor obtenido en este caso; no siempre este cálculo deberá despreciarse ya que k es debido a los cambios en la dirección y velocidad del flujo (codos, aberturas graduales, entre otras).

$$\text{De allí que } h_m = 0 * q_{to}^2$$

Finalmente si la cota $z_1 = h_0$, en condiciones iniciales es de 22 mca.

Cálculo del caudal de entrada Q_s

Para ello la expresión 3-10 puede ser re-escrita de la siguiente forma:

$$q_s = \sqrt{\frac{h_0}{\frac{8}{\pi^2 D_s^4 g} + \frac{8f_t L_t}{\pi^2 D_t^5 g} + \frac{8k_t}{\pi^2 D_t^4 g} + \frac{A}{\tau^{2n}}}}$$

Ec. 3-22

Así sustituyendo cada uno de los valores obtenidos en la ecuación (3-21), resultara un caudal de:

$$q_0 = 4.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

También si tomamos en cuenta su velocidad en régimen permanente en la tubería 1 y 2 a ese caudal con un grado de apertura del 59.94 % será igual a:

$$V_{t1} = 1.57 \text{ m/s}$$

$$V_{t2} = 1.11 \text{ m/s}$$

Y su velocidad en la válvula es:

$$V_{vo} = 2.5464 \text{ m/s}$$

Así los parámetros D, C y E tendrán los siguientes valores.

$$E = 6.7047 \frac{\text{s}}{\text{m}^2}$$

$$C = 368.89 \frac{\text{s}^2}{\text{m}^2}$$

$$D = -0.8114 \text{ m}$$

3.4.1 Diseño del controlador PI.

Conocidos los parámetros de la planta es momento del diseño del regulador PI, la ecuación 3-20 que nos indica su nivel en función del caudal de entrada puede ser escrita de la siguiente forma:

$$\frac{H(s)}{Q_e(s)} = \frac{(E + Cs)}{A_d Cs^2 + A_d Es + 1 - DK}$$

Ec. 3-23

Con

$$K = \frac{K_p(1 + T_i s)}{T_i s}$$

Si reemplazamos los valores respectivos en la ecuación 3-22 tendremos:

$$\frac{H(s)}{Q_e(s)} = \frac{(E + Cs)}{129303.32s^2 + 2350.13s + 1 - DK}$$

Analizando la ecuación característica se tiene lo siguiente:

- Número de polos con $K = 0$

$$N_p = 2$$

$$129303.32s^2 + 2350.13s + 1 = 0$$

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$s = \frac{-2350.13 \pm \sqrt{2350.13^2 - 4(129303.32 * 1)}}{2(129303.32)}$$

$$s_1 = -0.017$$

$$s_2 = -0.00043$$

Las raíces del polinomio del denominador de la función de transferencia de un sistema, denominados polos, determinan la forma general de la respuesta transitoria de ese sistema, de esta manera nuestra ecuación es de segundo grado y tiene dos polos reales en lazo abierto cuando $K = 0$, por lo tanto los polos están en -0.017 y -0.00043 , y a medida que se incrementa el valor de K , el valor del polo se hace más negativo.

- Numero de ceros = 2 en el infinito (2∞), esto se da por el principio de conservación que dice que el número de polos debe ser igual al número de ceros, entonces [22]:

$$n_p = n_z + n_{z\infty}$$

$$2 = 0 + 2_{\infty}$$

- El término rama de lugar geométrico de las raíces se usa con frecuencia para cada lugar geométrico de las raíces. Estas ramas son curvas continuas que inician en cada uno de los n polos en lazo abierto, donde $K = 0$, y se aproxima a infinito en los m ceros en lazo abierto.

Si $n > m$, se extienden a infinito (nuestro caso).

Si $m > n$, las ramas se extienden desde infinito a polos en lazo abierto.

De este modo el número de ramas es igual a 2 que son perpendiculares al eje real negativo y se extienden al infinito

- Los lugares geométricos de las raíces de un sistema con una ecuación característica real son simétricos respecto al eje real, los lugares geométricos de las raíces comienzan en los n polos del sistema donde $K = 0$, de este modo el lugar en el eje real = 2
- Ubicación de las asíntotas con $k=0,1,2$

$$\phi = \frac{(1 + 2k) * 180}{n_p - n_z}$$

$$\phi = \frac{180}{2} = 90^\circ$$

- Los puntos de separación de salida y de entrada se puede determinar resolviendo la siguiente ecuación y verificar si tenemos puntos de separación complejos o conjugados.

$$\frac{dG_{OL}(s)}{ds} = 0$$

$$\frac{dG_{OL}}{ds} = \frac{Q_e(s) * (E + Cs)}{A_dCs^2 + A_dEs + 1 - Dk} = \frac{33.16 + 1826s}{129303.32s^2 + 2350.13s + 1}$$

$$\frac{dG_{OL}}{ds} = \frac{1826(129303.32s^2 + 2350.13s + 1) - [(33.16 + 1826s) - (258606.64s + 2350.13)]}{(129303.32s^2 + 2350.13s + 1)^2}$$

$$7.08E8s^2 + 1000s - 76104.3 = 0$$

$$s = -0.0103$$

El punto de separación real lo tenemos en el plano izquierdo y corresponde a -0.0103.

- La intersección de los lugares geométricos de las raíces con el eje imaginario se puede encontrar calculando aquellos valores de K que den como resultado la existencia de las raíces imaginarias en la ecuación característica, entonces haciendo que:

$$s = jw$$

Resulta:

$$-129303.32w + 2350.13jw + 1 - DK$$

Al igualar las partes imaginarias se obtiene:

$$2350.13jw = 0$$

Así esto indica que los lugares geométricos no cruzan el eje imaginario, haciendo una representación aproximada de lo estudiado quedara como (ver figura 3-14):

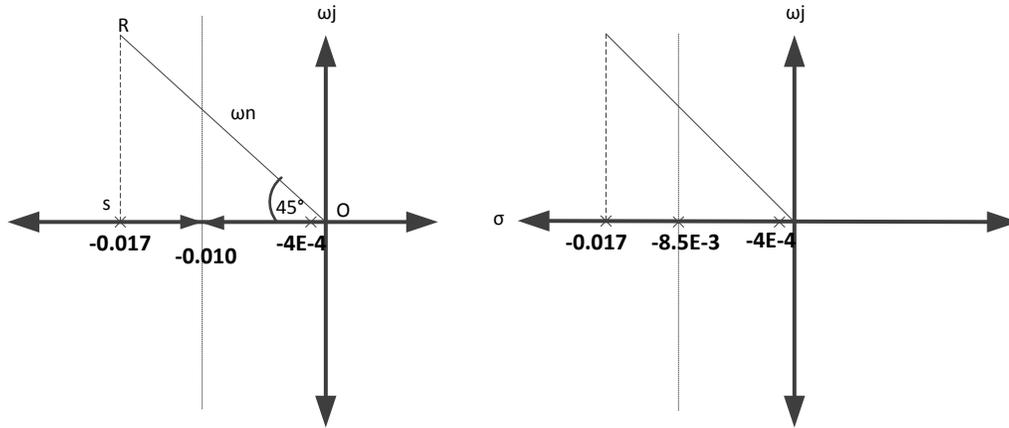


fig. 3-14 Lugar de las raíces

Con esta identificación de las raíces en el plano s podemos concluir que:

- Como los polos están ubicados en el plano horizontal izquierdo; el sistema será estable.
- Producirán una respuesta exponencialmente amortiguada o una respuesta sinusoidal.
- Para un sistema estable los polos dominantes son usualmente aquellos con la parte real negativa más pequeña, en nuestro caso nuestro el polo que determinara la forma de la respuesta transitoria es -0.00043 .
- Al ser nuestro sistema estable podremos “cancelar” es decir eliminar nuestro polo dominante -0.00043 para el diseño del controlador, de esta manera nosotros lograremos mover los polos del sistema a lugares deseados en el eje horizontal izquierdo, por ejemplo -0.0085 . de manera que el resultado del sistema en lazo cerrado podría tener mejor estabilidad y mejor desempeño.
- Esta vez el modo “cancelado” es controlable y observable, debido a que el sistema es estable.

Realizado el estudio anterior, podemos dar valores con criterio a nuestra ecuación característica, para que tenga la forma deseada en el diseño del regulador.

Por lo tanto trabajando con la ecuación característica de la forma general:

$$A_d C T_i s^3 + A_d E T_i s^2 + T_i s - D K_p - D K_p T_i s = 0$$

$$s^3 + \frac{E}{C} s^2 + \left(\frac{1}{A_d C} - \frac{D K_p}{A_d C} \right) s - \frac{D K_p}{A_d C T_i} = 0$$

Ec. 3-24

Y si deseo que mi ecuación característica en bucle cerrado tenga la siguiente forma:

$$(s + \alpha)(s^2 + 2\xi\omega_n + \omega_n^2) = 0$$

Desarrollando quedará:

$$s^3 + s^2(2\xi\omega_n + \alpha) + s(\omega_n^2 + 2\xi\omega_n\alpha) + \omega_n^2\alpha = 0$$

Ec. 3-25

Por lo que de esta manera se obtiene del triángulo rectángulo ROS ver figura 3.14

$$\omega_n = 0.024$$

$$\xi = \cos 45^\circ$$

$$\xi = 0.707$$

$$\alpha = 8.5E - 3$$

De manera que igualando las ecuaciones 3-24, 3-25 podremos obtener los coeficientes de K_p y T_i .

$$K_p = \frac{1 - A_d C (\omega_n^2 + 2\xi\omega_n\alpha)}{D}$$

$$K_p = 136.46$$

$$T_i = -\frac{DK_p}{A_d C \omega_n^2 \alpha}$$

$$T_i = 174.305s^{-1}$$

3.4.2 Obtención de la ecuación $h(t)$ (cota del agua en el depósito)

Perturbación del 10% como una función escalón.

Si a la ecuación 3-20 le introducimos una función escalón del 10%, que físicamente se la puede interpretar como la apertura instantánea de una válvula que da paso a un flujo hacia el interior del depósito, así una función escalón producida en $t = 0$ corresponde a una señal constante aplicada súbitamente al sistema en el instante en que el tiempo se empieza a contar.

$$H(s) = \frac{0.45}{s} \left[\frac{64299.6013s^2 + 1168.670038s}{22538296.25s^3 + 409642.221s^2 + 19475.238s + 110.730} \right]$$

$$H(s) = \frac{28934.820s + 525.901}{22538296.25s^3 + 409642.221s^2 + 19475.238s + 110.730}$$

Esta ecuación se desarrollara para obtener $h(t)$ para ello:

1. Factorizamos el denominador

$$H(s) = \frac{28934.820s + 525.901}{2.25383E7(s + 0.006)(s^2 + 0.0119s + 7.9E - 4)}$$

2. Separamos por fracciones parciales

$$\begin{aligned} & \frac{28934.820s + 525.901}{2.25383E7(s + 0.006)(s^2 + 0.0119s + 7.9E - 4)} \\ &= \frac{1}{2.25383E7} \left[\frac{N_1}{(s + 0.006)} + \frac{N_2s + N_3}{(s^2 + 0.0119s + 7.9E - 4)} \right] \end{aligned}$$

Ec. 3-26

$$28934.820s + 525.901 = N_1(s^2 + 0.0119s + 7.9E - 4) + (N_2s + N_3)(s + 0.006)$$

$$N_1 + N_2 = 0.$$

$$0.0119N_1 + 0.006N_2 + N_3 = 28934.820.$$

$$7.9E - 4N_1 + 0.006N_3 = 525.901.$$

$$N_1 = \frac{467107}{2.25383E7} = \mathbf{0.0207}$$

$$N_2 = \mathbf{-0.0207}$$

$$N_3 = \frac{26147.7}{2.25383E7} = \mathbf{0.00116}$$

3. Extraemos la anti transformada de Laplace

Reemplazamos los valores de N_1 , N_2 y N_3 en la ecuación 3-26

$$H(s) = \left[\frac{0.0207}{(s + 0.006)} + \frac{-0.0207s + 0.00116}{(s^2 + 0.0119s + 7.9E - 4)} \right]$$

Completando el trinomio cuadrado perfecto para tener de la forma:

$$s^2 + 2Vs + V^2 + R^2$$

$$(s^2 + 0.0119s + 7.9E - 4) + \left(\frac{0.0119}{2}\right)^2 - \left(\frac{0.0119}{2}\right)^2$$

Dónde:

$$V = \frac{0.0119}{2}; \quad R = \sqrt{7.9E - 4 - V^2}$$

De manera que:

$$H(s) = \left[\frac{0.0207}{(s + 0.006)} + \frac{-0.0207s + 0.00116}{(S + V)^2 + R^2} \right]$$

Arreglando

$$H(s) = \frac{0.0207}{(s + 0.006)} - 0.0207 \left[\frac{s - \frac{0.00116}{0.0207} + V - V}{(S + V)^2 + R^2} \right]$$

$$H(s) = \frac{0.0207}{(s + 0.006)} - \frac{0.0207(S + V)}{(S + V)^2 + R^2} + \frac{0.0207 \left(\frac{0.00116}{0.0207} - V \right)}{(S + V)^2 + R^2} * \frac{R}{R}$$

Si:

$$W_1 = 0.0207; \quad W_2 = \frac{W_1}{R} \left(\frac{0.00116}{0.0207} - V \right)$$

Por lo tanto:

$$H(s) = \frac{0.0207}{(s + 0.006)} - \frac{W_1(S + V)}{(S + V)^2 + R^2} + \frac{W_2 * R}{(S + V)^2 + R^2}$$

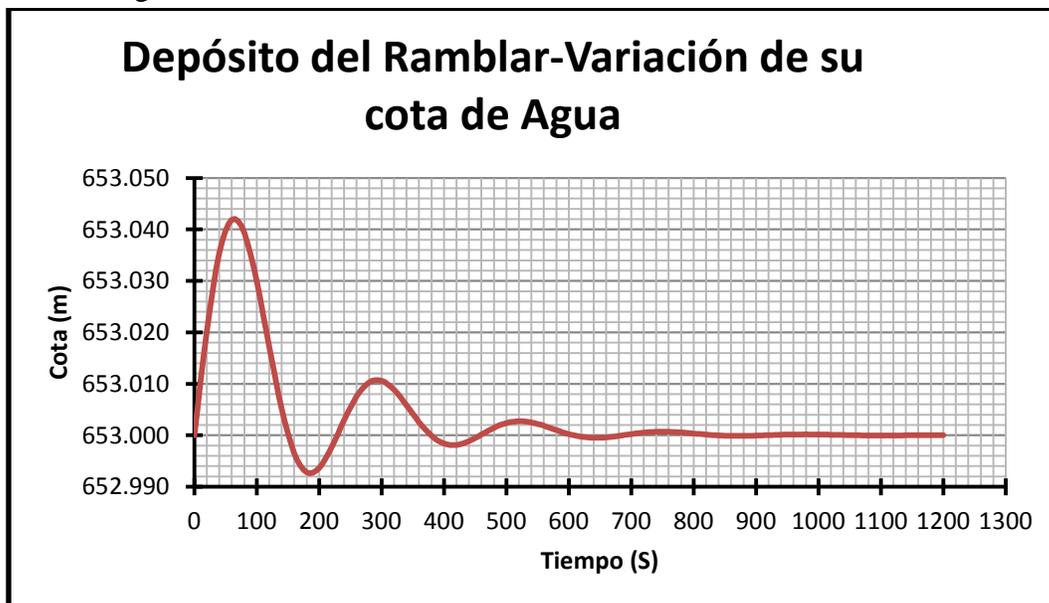
Ec. 3-27

Finalmente tomando la transformada inversa de la ecuación 3-27

$$h(t) = 0.0207e^{-0.006t} - W_1e^{-Vt} \cos Rt + W_2e^{-Vt} \text{sen} Rt + h_o$$

Ec. 3-28

La ecuación 3-28 representada en la gráfica 3-1 nos define la variación de cota de agua en el depósito en función del tiempo con un caudal de entrada incrementado un 10 % respecto del valor de régimen.



Graf. 3-1 Variación de su cota de agua en función del tiempo

3.4.3 Obtención de la ecuación $\tau(s)$ (grado de apertura)

De igual forma le introducimos el escalón del 10% (caudal de entrada) y desarrollamos de la misma manera indicada anteriormente por lo que tendremos:

$$T(s) = \frac{0.45 \left[\frac{K_p C T_i s^2 + (K_p E T_i + K_p C)s + K_p E}{A_d C T_i s^3 + A_d E T_i s^2 + (T_i - D K_p T_i)s - D K_p} \right]}{s}$$

$$T(s) = \frac{3948472.65s^2 + 94417.644s + 411.720}{22538296.25s^4 + 409642.221s^3 + 19475.238s^2 + 110.730s}$$

$$\frac{3948472.65s^2 + 94417.644s + 411.720}{2.25383E7s[(s + 0.006)(s^2 + 0.0119s + 7.9E - 4)]}$$

$$= \frac{1}{2.25383E7} \left[\frac{Z_1}{s} + \frac{Z_2}{(s + 0.006)} + \frac{Z_3s + Z_4}{(s^2 + 0.0119s + 7.9E - 4)} \right]$$

$$3948472.65s^2 + 94417.644s + 411.720$$

$$= Z_1[(s + 0.006)(s^2 + 0.0119s + 7.9E - 4)] + Z_2s(s^2 + 0.0119s + 7.9E - 4)$$

$$+ [(Z_3s + Z_4) * s * (s + 0.006)]$$

$$3948472.65s^2 + 94417.644s + 411.720$$

$$= As^3 + 0.0179Z_1s^2 + 8.61E - 4Z_1s + 5E - 6Z_1 + Z_2s^3 + 0.0119Z_2s^2 + 7.9E$$

$$- 4Z_2s + Z_3s^3 + 6E - 3Z_3s^2 + Z_4s^2 + 6E - 3Z_4s$$

$$Z_1 + Z_2 + Z_3 = 0.$$

$$0.0179Z_1 + 0.0119Z_2 + 6E - 3Z_3 + Z_4 = 3948472.65.$$

$$8.61E - 4Z_1 + 7.9E - 4B + 6E - 3Z_4 = 94417.644.$$

$$5E - 6Z_1 = 411.720.$$

$$Z_1 = \frac{8.234E8}{2.25383E7} = \mathbf{3.653}$$

$$Z_2 = 2.977E7 - 7.594D$$

$$C = -A - B$$

$$Z_4 = \frac{2.923E6}{2.25383E7} = \mathbf{0.129}$$

$$Z_2 = \frac{7.564E6}{2.25383E7} = \mathbf{0.33}$$

$$Z_3 = \frac{-8.99E7}{2.25383E7} = \mathbf{-3.989}$$

Reemplazamos los valores de Z_1 , Z_2 , Z_3 y Z_4 , se tiene:

$$T(s) = \left[\frac{3.653}{s} - \frac{0.33}{s + 0.006} + \frac{-3.989s + 0.129}{(s^2 + 0.0119s + 7.9E - 4)} \right]$$

De igual forma completando el trinomio cuadrado perfecto:

$$s^2 + 2Vs + V^2 + R^2$$

$$s^2 + 0.0119s + 7.9E - 4 + \left(\frac{0.0119}{2}\right)^2 - \left(\frac{0.0119}{2}\right)^2$$

Donde:

$$V = \frac{0.0119}{2}; \quad R = \sqrt{7.9E - 4 - V^2}$$

De manera que:

$$T(s) = \left[\frac{3.653}{s} + \frac{0.33}{s + 0.006} + \frac{-3.989s + 0.129}{(S + V)^2 + R^2} \right]$$

Reordenando

$$T(s) = \frac{3.653}{s} + \frac{0.331}{s + 0.006} - 3.989 \left[\frac{s - \frac{0.129}{3.989} + V - V}{(S + V)^2 + R^2} \right]$$

$$T(s) = \frac{3.653}{s} + \frac{0.33}{s + 0.006} - \frac{3.989(S + V)}{(S + V)^2 + R^2} + \frac{3.989 \left(\frac{0.129}{3.989} - V \right)}{(S + V)^2 + R^2} * \frac{R}{R}$$

Si:

$$W_1 = 3.989; \quad W_2 = \frac{W_1}{R} \left(\frac{0.129}{3.989} - V \right)$$

Por lo tanto:

$$T(s) = \frac{3.653}{s} + \frac{0.33}{s + 0.006} - \frac{W_1(S + V)}{(S + V)^2 + R^2} + \frac{W_2 * R}{(S + V)^2 + R^2}$$

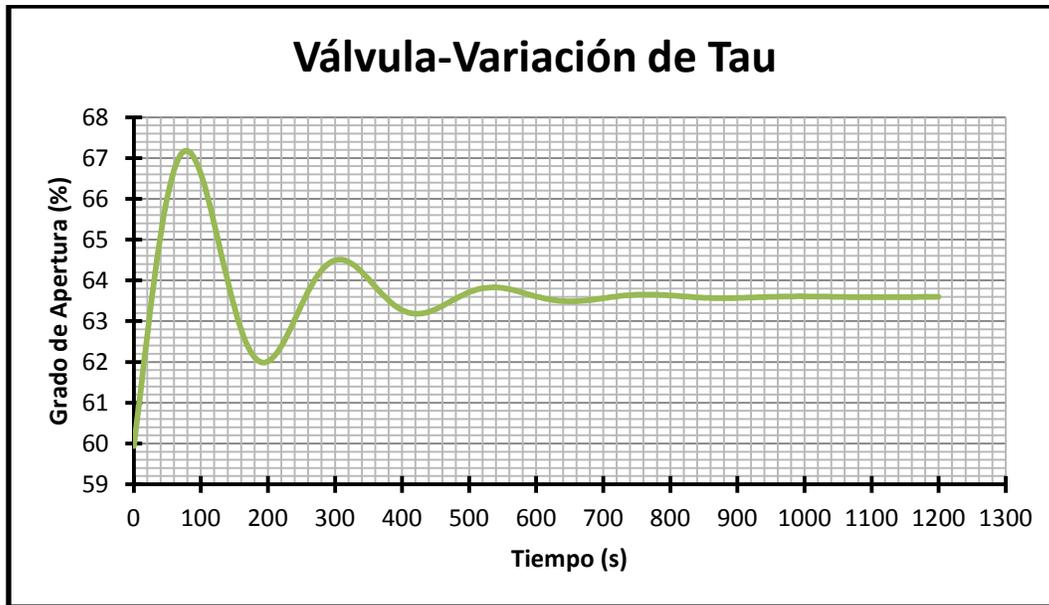
Ec. 3-29

Finalmente tomando la transformada inversa de la ecuación 3-29.

$$\tau(t) = 3.653 + 0.33e^{-0.006t} - W_1e^{-Vt} \cos Rt + W_2e^{-Vt} \operatorname{sen} Rt + \tau_o$$

Ec. 3-30

La ecuación 3-30 representada en la gráfica 3-2 nos indica la variación del grado de apertura de la válvula (variable manipulable), en función de un caudal de entrada, cuyos valores están comprendido entre 0-100%; de manera que ese nuevo grado de apertura será el que tiende a estabilizar el sistema a un nivel constante.



Graf. 3-2 Variación del grado apertura de la válvula

Finalmente se realizara la comprobación para $\tau(t)$, y demostrar que cumple las condiciones en régimen permanente con el correspondiente caudal modificado en un 10%.

De la expresión 3-13 se tendrá:

$$h(t) = h_0 + E[q(t) - q_{t0}] + D[\tau(t) - \tau_0] + C \frac{dq_t}{dt}$$

$$C \frac{dq_t}{dt} = 0; \text{ Por estar en régimen permanente.}$$

$$h(t) - h_0 = 0; \text{ Por el objetivo principal de nuestro estudio.}$$

De esta forma reemplazando los demás términos y despejando $\tau(t)$ se obtiene:

$$\tau(t) = 59.9439 + \frac{6.70473 * 0.45}{0.81144}$$

$$\tau(t) = 63.662\%$$

Valor semejante al obtenido del gráfico 3-2 que es de: 63.596%

Capítulo 4.
Comparación y discusión
con Allievi

En este capítulo analizaremos el comportamiento del programa Allievi con los coeficientes $K_p=136.460$ y $T_i=174.305$ s, obtenidos del cálculo analítico anterior. Estos parámetros del regulador PI serán introducidos a un caso de estudio planteado en donde las condiciones iniciales de dicho sistema son similares a las condiciones de partida (caso estudiado en la resolución analítica), su modificación es en la perturbación, en la cual la modulación del caudal de entrada vendrá impuesta por una estación de bombeo; la misma que efectuará cambios en el sistema mediante la puesta en marcha. En general poner en marcha o parar una nueva bomba significa un porcentaje de caudal total variable. Ante esto el regulador deberá cumplir el objetivo trazado de mantener un nivel constante en el depósito de Ramblar, modificando su grado de apertura a un nuevo estado, para lograr de esta manera estabilizar la instalación.

4.1 Descripción del sistema en estudio

El sistema está constituido por el depósito de Moixent de donde se alimentan las cuatro bombas en paralelo que impulsan un caudal de 1121 l/s cada una de ellas, con una altura de bomba igual a 316 m y rendimiento del 87.6 % cada una, este grupo de bombeo tiene una estructura de protección que consta de tres calderines de $35 m^3$. Esta estación de bombeo trasiega un caudal variable (casos a plantear), desde la estación de bombeo de Moixent por medio de la tubería de impulsión general V. Potro hasta el depósito de Ramblar, en este tanque se quiere mantener fija su cota de consigna, para ello a través de la válvula motorizada SDMX, de diámetro 1500 mm y la tubería de entronque principal del tramo V, de longitud 10120.88 m y un diámetro de 1907.8 mm, se deberá realizar en dicha válvula un cambio en su grado de apertura (τ); esta modificación será efectuada por un regulador PI cuyos coeficientes K_p y K_i serán los mismos de la resolución analítica con una modificación por cuestión del programa en donde el error le considera de la siguiente manera:

$$e = \frac{h(t) - h_0}{h_{r0}} \quad \text{Ec. 4-1}$$

Dónde:

$h(t)$ = Cota de agua en el depósito leída en cada instante de tiempo.

h_0 = Cota de consigna

h_{r0} = Diferencia entre la cota de consigna y solera del depósito.

Es por esta razón que a los parámetros del regulador se multiplicara por el término h_{r0} , para lograr que al sistema le ingrese un error adimensional, en el cálculo analítico se prescindió de este valor porque su resultado final no se alteraba; por tal circunstancia los nuevos parámetros en Allievi tomaran el siguiente resultado.

$$K_p = 136.460 * h_{r0}$$

$$K_p = 136.460 * 4.72$$

$$Kp = 644.091$$

$$Ki = \frac{Kp}{Ti} * h_{ro}$$

$$Ki = \frac{136.460}{174.30} * 4.72$$

$$Ki = 3.69 \text{ s}^{-1}$$

Finalmente con un tramo de tubería VII-2 de longitud 315 m y diámetro 2262.74 mm entre la válvula y el depósito de S. Diego, se hará su descarga respectiva. En el esquema 4-1 se recoge un detalle de la instalación descrita.

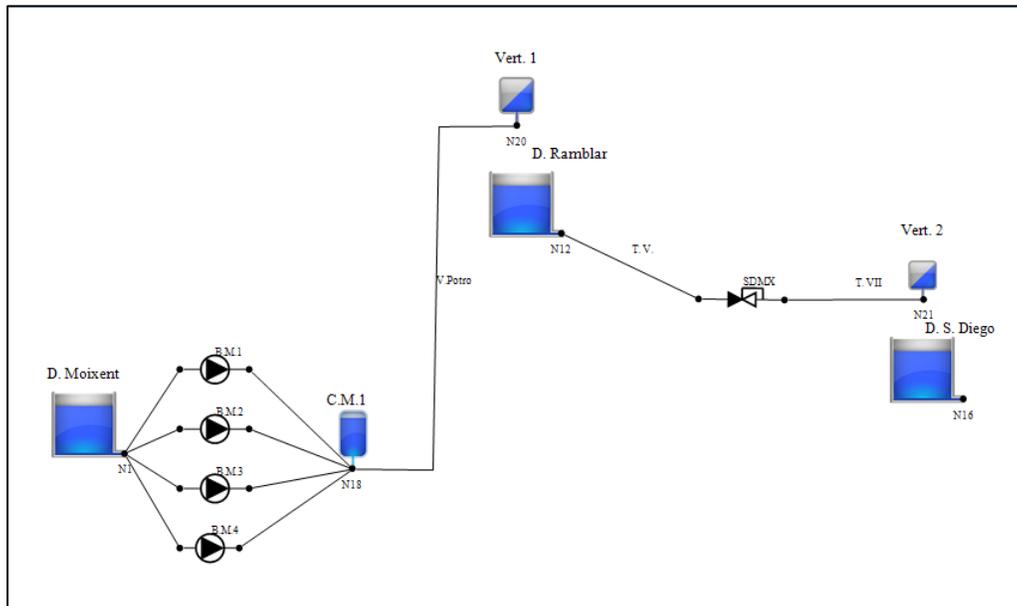


fig. 4-1 Representación del sistema en Allievi

Casos de estudio en el programa Allievi

Uno de los objetivos de Allievi es de intentar simular el funcionamiento de la instalación frente a las circunstancias más diversas (paradas y arranques programados, paradas inesperadas de grupos de bombeo, cambios en el funcionamiento general del sistema, roturas, etc. así como el diseño y comprobación de situaciones o fenómenos no deseados.

En todos los casos es necesario tener un control sobre los caudales trasegados de manera que no sobrepasen sus valores; ya que de lo contrario generan variaciones de presiones importantes, así como el mencionado desbordamiento o vaciado de los depósitos; ante todo ello se plantearan diferentes casos de funcionamiento del sistema y comprobar cuan robustos y fiables son los coeficientes obtenidos para esa instalación ante perturbaciones

incontroladas. Y así garantizar que independientemente de las maniobras provocadas en el sistema; el control por parte del regulador PI es totalmente correcto, ya que su cota objetivo principal de este estudio se mantendrá constante, evitando posibles afecciones a su entorno.

Casos a plantear:

- Parada y arranque programada a válvula abierta de la estación de bombeo de Moixent.
- Arranque y parada programada a válvula cerrada del grupo de bombeo de Moixent.
- Parada accidental y arranque programado de las bombas a válvula abierta

4.2 Parada y arranque programada a válvula abierta de la estación de bombeo de Moixent.

Como en un abastecimiento el consumo de agua fluctúa enormemente con el tiempo, el servicio puede garantizarse mediante la progresiva entrada en funcionamiento de distintos grupos de bombeo, consiguiendo mantener el rendimiento del conjunto dentro de niveles aceptables. Es por ello que este caso lo generamos de acuerdo a esa demanda. Para ello es necesario tratar a cada bomba como un elemento diferente a fin de poder indicar la puesta en marcha de cada una de ellas hasta lograr ese caudal deseado; o simplemente porque su nivel es inferior a la de consigna $h(t) < h_o$.

Protocolo programado

El grupo de bombeo funciona de la siguiente manera:

El sistema esta inicialmente en funcionamiento, luego paran las bombas con desfases de 5 minutos, 30 minutos después, le permitimos un nuevo arranque de igual manera con desfases de 5 min, el instante de arranque de la primera lo hace en el minuto 50 (empieza a aumentar la velocidad de rotación), la segunda en el minuto 55 y así sucesivamente; además los tiempos de parada y de arranque los fijamos en 30 s (es una rampa) en este intervalo de tiempo, toma la velocidad de rotación (nula 0) de régimen según sea parada o arranque; este período depende de la rampa y del sistema eléctrico. También hay que mencionar que en este caso la parada programada lo haremos imponiendo su funcionamiento en la velocidad de rotación, ya que en Allievi también se puede realizar esta maniobra en la tabla 4-1 se describe lo expuesto.

EB CON IMPOSICIÓN DE VELOCIDAD DE ROTACIÓN

Núm EB con imposición de N

EB para imposic N Núm puntos

Punto	Instante (s)	Rotación (% Nrég)
1	300	100
2	330	0
3	3000	0
4	3030	100

EB CON IMPOSICIÓN DE VELOCIDAD DE ROTACIÓN

Núm EB con imposición de N

EB para imposic N Núm puntos

Punto	Instante (s)	Rotación (% Nrég)
1	600	100
2	630	0
3	3300	0
4	3330	100

Punto	Instante (s)	Rotación (% Nrég)
1	900	100
2	930	0
3	3600	0
4	3630	100

Punto	Instante (s)	Rotación (% Nrég)
1	1200	100
2	1230	0
3	3900	0
4	3930	100

Tabla 4-1 Paradas y Arranques de los grupos de bombeo con imposición en la velocidad de rotación

Revisión de la válvula de regulación abierta

Como se comentó esta simulación lo haremos a válvula abierta para observar su comportamiento del sistema; así en la tabla 4-2 lo verificamos:

Punto	Inst (s)	Apert (%)
1	0	41.6

Punto	Inst (s)	Apert (%)
1	0	41.6

Punto	Inst (s)	Apert (%)
1	0	41.6

Punto	Inst (s)	Apert (%)
1	0	41.6

Tabla 4-2 Representación de válvulas abiertas

Los 41.6% de apertura es porque a ese grado de apertura obtenemos un caudal total impulsado de 4500l/s.

Entrada de los coeficientes Kp y Ki

Finalmente los coeficientes obtenidos al principio del capítulo son introducidos en Allievi para conocer si son o no capaces de regular el sistema ante la perturbación realizada ver tabla 4-3.

PROGRAMA ALLIEVI. Datos de las Estructuras de Control de Caudal (3/3)										
REGULACIÓN CON CONTROLADOR PI DEL TRASVASE JÚCAR-VINALOPÓ.										
VÁLVULAS DE CONTROL DE NIVEL EN DEPÓSITOS										
ECQ	Denominación	Ramal	Depósito a controlar	Zona a controlar	Cota a controlar (m)	Holgura cota (mm)	Coefficiente proporc. Kp	Coefficiente integ. Ki (1/s)	Coefficiente deriv. Kd (s)	Apertura inicial (%)
1	ValvSDMX	1	DipRamblar		653	0	644.09	3.69	0	59.73

Tabla 4-3 Parámetros del Regulador PI

También se debe tomar atención en la tabla anterior que allí hay una casilla en donde se fija la cota a controlar, que en este caso será de 653 m. Una vez simulado un período de 4800 segundos se representara y discutirá lo siguiente:

➤ **Evolución de la cota de agua en el depósito de Ramblar**

En la figura 4-2 observamos que en condiciones de régimen permanente (sin modificar las condiciones iniciales) el sistema es estable durante los 5 primeros minutos. Cuando hay un paro del grupo de bombeo secuencial, el error que se comente con respecto a su punto de referencia es del orden de 15 cm, con respecto a su nivel de referencia, y con un tiempo de estabilización de 2 min aproximadamente; una de las posibles causas del porque baja de su consigna es, porque cuando le llega la lectura actual del depósito y lo compara con la consigna (error) al regulador, la válvula aún está abierta en su grado de apertura anterior que lo mantuvo en equilibrio al sistema existiendo un retraso entre la acción de apertura o cierre de la válvula y su repercusión sobre el nivel del agua en el depósito. Es decir este retraso es debido al transitorio que se produce en la tubería cuando se acciona la válvula.

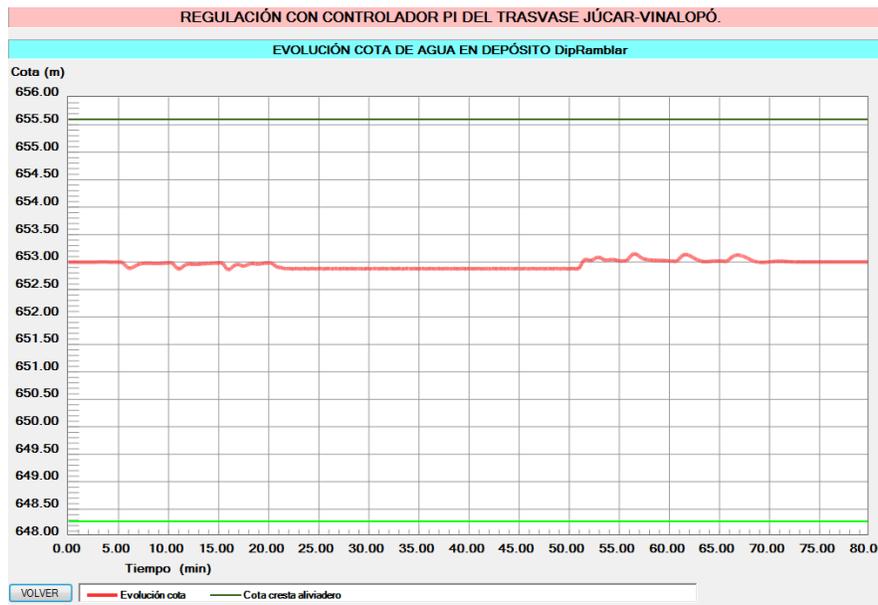


fig. 4-2 Cota de agua en el Depósito de Ramblar (caso 1)

Conforme se van parando las bombas su comportamiento es semejante excepto cuando se para la tercera bomba, que es en donde le cuesta más al sistema estabilizarse, su tiempo aproximado ya no es los 2 min, si no que aquí son 4 min; estas oscilaciones desde el minuto 15 al 19 se debe a que conforme hay menos bombas en marcha, cada nueva bomba que se para produce una reducción de caudal mayor (1016.74 a 1171.16 l/s), con lo cual produce un transitorio más violento y tiende a que se tenga que regular unas oscilaciones de nivel más fuertes. Continuando con el análisis entre el minuto 20 y 50, que es en donde ya se han parado todas las bombas su nivel es inferior al de consigna, porque como ya no hay caudal impulsado desde la estación de Moixent y la válvula de regulación responde segundos después de esta acción, su cierre no es instantáneo provocando ese nuevo nivel pero sin alejarse excesivamente del de referencia y manteniéndolo allí por el tiempo que sea necesario, que en este caso es cuando nuevamente se pone en marcha el grupo de bombeo. El comportamiento de la puesta en marcha de la primera bomba (50 min.) tiene mayor tiempo de oscilación por el mismo efecto; que cuando entra en funcionamiento una nueva bomba el aumento de caudal es más pequeño (1207.78 a 1171.16 l/s), es por esta razón que el sistema “tarda” más en estabilizarse, porque inicia desde caudal 0 a 1207.78 l/s, provocando en su nivel las oscilaciones respectivas. Pero estas fluctuaciones son reguladas gracias al regulador PI que evita que sean mayores y puedan provocar la inestabilidad al sistema. Por último cuando ya se ha alcanzado por unos instantes este régimen estacionario, en el minuto 55 se prende la segunda bomba generando una nueva alteración al sistema del orden de 15 cm (igual que su parada), de su punto de referencia, con lo que nuevamente el regulador debe enviar una señal de apertura a la variable manipulable para lograr mantener su equilibrio ante esa nueva perturbación, y así lo va haciendo con las nuevas imposiciones de caudal que le ingresan al depósito. Se recomienda que estos tirones no sean muy bruscos tanto en la parte superior como inferior, ya que podría en algún caso excepcional encontrarle al sistema al borde de sus fronteras tanto en la cresta del aliviadero (desbordamiento) como en el fondo del tanque (vaciado). Los parámetros del regulador en este caso responden adecuadamente sin oscilaciones bruscas y con tiempo de establecimiento aceptable.

➤ **Evolución del nivel de agua en el depósito de Ramblar**

El nivel es una de las más comunes medidas hechas por las instalaciones, su acotación está referido desde la solera del depósito hasta la película de agua dentro del mismo (ver figura 4-3), como se mencionó al momento de introducir los parámetros del regulador se tiene la opción de controlar la cota en el depósito y por ende su nivel; aquí su valor de consigna es de 4.72 m. Y por lo tanto sufre las mismas evoluciones que cuando se analizó su cota, verificándose el correcto cumplimiento del objetivo y manteniéndose dentro de las condiciones de contorno, lo cual garantiza que no se produzcan accidentes fortuitos.

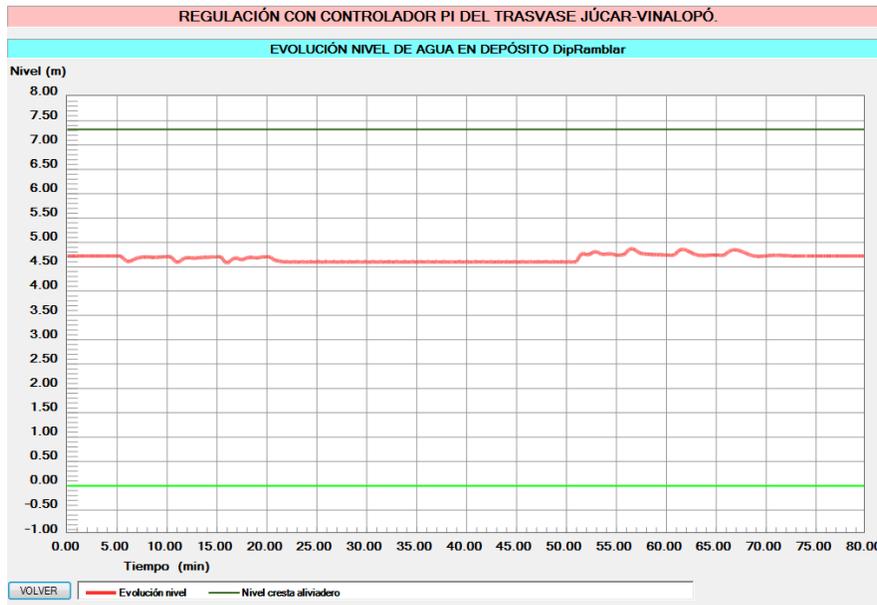


fig. 4-3 Nivel de Agua en el Depósito de Ramblar (caso 1)

➤ **Comportamiento del grado de apertura de la válvula de regulación (SDMX)**

La variable a controlar será estudiada en este apartado identificando el comportamiento que sufre su grado de apertura en función del tiempo, permitiéndonos conocer su evolución ante las continuas paradas y arranques del grupo de bombeo de Moixent.

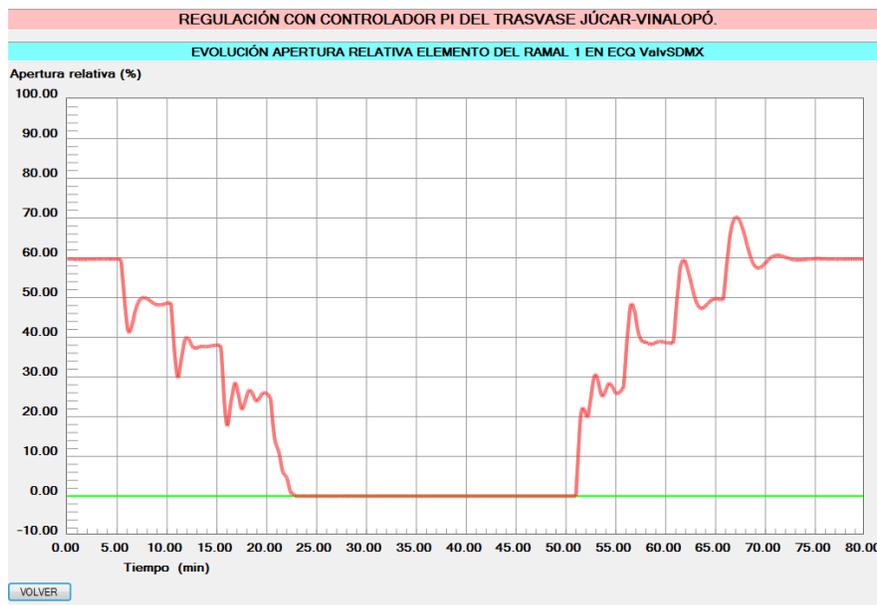


fig. 4-4 Grado de Apertura de la válvula de Guillotina (caso 1)

En su estado estacionario el grado de apertura era de 59.73 % (ver figura 4-4), al parar la primera bomba un nuevo escenario se presenta, lo que indica que la variable τ , debe efectuar alguna maniobra con el fin de no permitir el vaciado del depósito en un tiempo lo

más corto posible; por lo tanto a partir del minuto 5 existe una primera oscilación de bajada del 41 % en su apertura, y una rápida recuperación que produce un sobre pico del 50 % aproximadamente llegando a estabilizarlo por escasos segundos en 48 %, porque una nueva bomba se para en el tiempo 10 minutos, ocasionando el mismo efecto anterior y llegando a estabilizarlo en un 38 % de su apertura inicial; en el siguiente paro de bomba al sistema le cuesta más su estabilización no lográndolo, se simuló de esta forma para conocer su actuación del sistema, frente a un nuevo paro de bomba y considerar si esto podría generar oscilaciones de mayor amplitud que podrían desestabilizar el sistema, o sigue una secuencia normal de cierre de válvula, llegando a cerrar completamente la válvula y sin fluctuaciones.

Como la programación fue de parada y arranque a partir del minuto 50 se enciende la primera bomba impulsando un caudal de 1125.10 l/s, lo cual le hace fluctuar desde el minuto 50 al 55 que es en donde una nueva bomba arranca provocándole un tirón del 48 % de apertura la cual resulta excesiva y tiende a disminuir para que de este modo el caudal que le está ingresando sea el mismo de salida al depósito de S. Diego, cuya estabilización es encontrado en un grado de apertura del 38 % con dos bombas en marcha. Como la programación de arranque se efectuó cada 5 minutos la tercera bomba se prendera ocasionando una nueva perturbación que rápidamente será controlada por el regulador PI, llegando a una nueva condición de apertura del 50 %. Esta secuencia de alteraciones termina con la última bomba puesta en marcha llegando a establecerse con un grado de apertura final de aproximadamente 60 %.

➤ **Representación del volumen de agua en una de las tres estructuras de protección contra transitorios.**

Los calderines llamados también depósitos hidroneumáticos, son depósitos que contienen aire y agua o nitrógeno a presión, son dispositivos de protección más utilizados en la industria del agua para el control de transitorios, particularmente para la protección de instalaciones de bombeo frente al transitorio originado por el fallo de suministro eléctrico.

Las primeras oscilaciones que se dan el minuto 5 (ver figura 4-5) son porque el calderín de aire comprimido inmediatamente después del paro de una de las bombas se convierte en una fuente de energía que tiende a mantener el movimiento del fluido en la conducción. Así, este hecho se puede comprobar de mejor manera desde el minuto 20 hasta el 50 que es en donde se paran todas las bombas, y es aquí donde el aire dentro del calderín se va expandiendo y la presión va disminuyendo, originando que el caudal en la tubería de impulsión V. Potro se reduzca de una forma controlada y mucho más lenta de lo que ocurriría sin la presencia de los mismos. Se trata pues de convertir un transitorio rápido en un fenómeno lento de oscilación en masa.

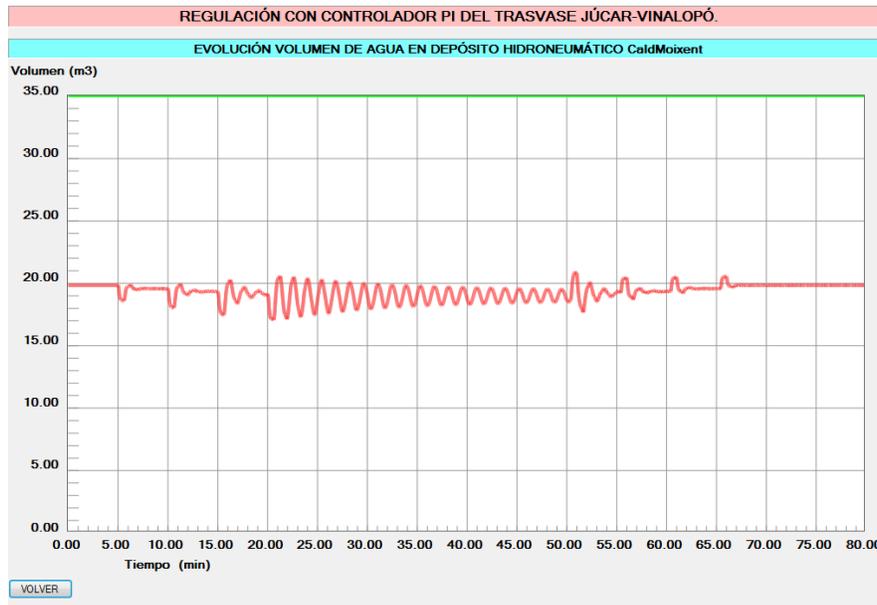


fig. 4-5 Evolución de agua dentro del Calderín (caso 1)

Además se recomienda colocarse una válvula de retención entre las bombas y el calderín, para prevenir el posible flujo inverso a través de éstas. En este sentido es importante que la válvula de retención tenga una respuesta dinámica adecuada, según el cual la válvula estará totalmente abierta cuando por ella circule un caudal positivo, y se cierre instantáneamente cuando el caudal a través de la misma sea nulo con el objeto de minimizar al máximo el temido "check valve slam". Estos dispositivos de protección deben instalarse con capacidad para controlar tanto las depresiones como sobrepresiones generadas, y así evitar daños en la instalación a causa de los transitorios que podrían presentarse.

Por último como existe un arranque del grupo de bombeo en el minuto 50 hasta el 55 las oscilaciones provocadas aquí; es porque parte del caudal impulsado por una bomba ingresa primero a las estructuras de protección, las cuales tienden a recuperar su volumen original.

➤ Evolución del caudal entrante/saliente del depósito de Ramblar

Otra representación importante dentro del sistema es por ejemplo la evolución del caudal de entrada vs el caudal de salida en el depósito de Ramblar; aquí la salida (línea verde, fig. 4-6) está regulada por el controlador la misma que responde al nivel en el depósito, mientras que la entrada (línea roja fig. 4-7) viene condicionada por el transitorio, impuesta por el continuo arranque del grupo de bombeo. Como la salida de caudal debe ser igual a su entrada estas deben tender a comportamientos similares, y llegando en el equilibrio a ser una sola ya que de lo contrario su nivel en el depósito será diferente al de consigna. Aun así como el cambio brusco de caudal de entrada es mayor, la salida no puede del todo ser igual en todo momento, ya que el distribuidor no puede ir abriendo y cerrando tan aprisa como el caudal de entrada impuesto por una bomba.

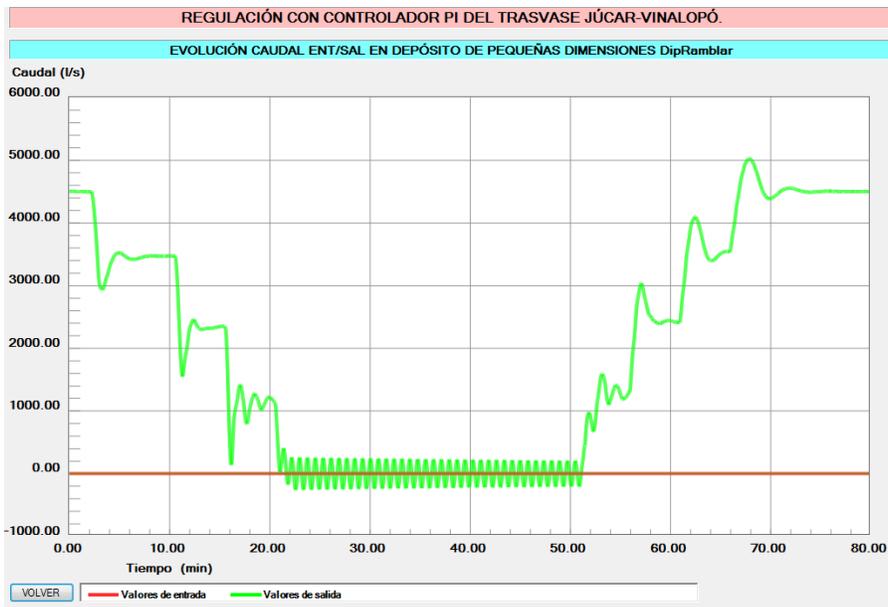


fig. 4-6 Caudal salida al Depósito de Ramblar (caso 1)

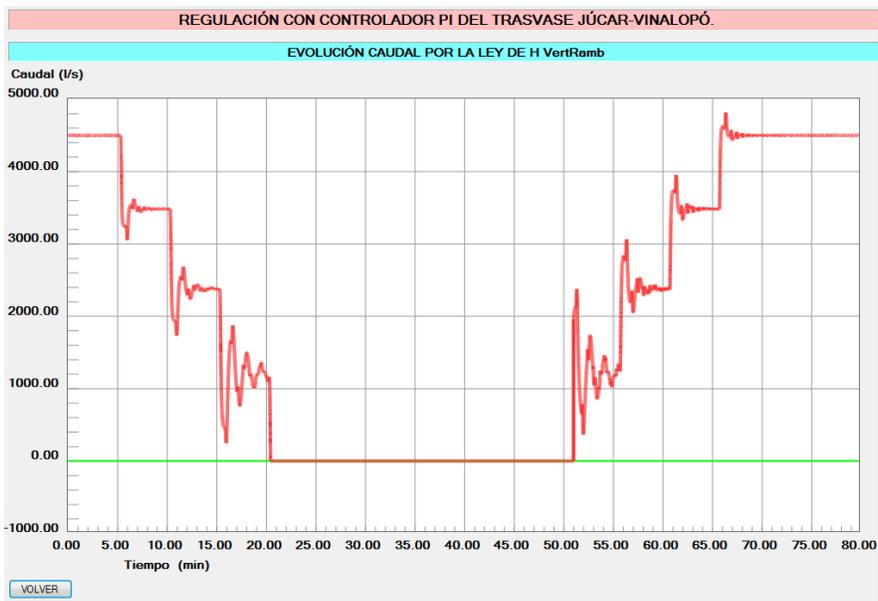


fig. 4-7 Caudal Entrada al Depósito de Ramblar (caso 1)

4.3 Arranque y parada programada a válvula cerrada del grupo de bombeo de Moixent.

Al igual que en el caso anterior ya sea por demanda o simplemente por altura de nivel inferior a la de consigna, la estación de bombeo de Moixent se pondrá en marcha de manera cronológica a válvula cerrada; con el objetivo de conocer si el controlador actúa solo con el hecho de prender la estación de bombeo o en base al caudal trasegado hacia el depósito, el mismo que le hará subir o bajar de su punto de referencia. También otro objetivo en esta simulación es para tener toda la instalación bajo control, de manera que se arranque el

equipo elevador y luego que ya se ha establecido su velocidad de régimen abra su válvula de regulación.

Condiciones de operación

El grupo de bombeo durante los 5 primeros minutos está desconectado, luego se permite un arranque desde el minuto 5 que se pone en marcha la primera bomba; y así con este intervalo de tiempo van arrancando las demás. El tiempo de arranque se mantiene en los 30 segundos para cada una de las bombas. En cuanto a la válvula de regulación instalada a la salida de la primera bomba permanecerá cerrada hasta los 6 minutos, y entre los 6 y 7 minutos se abrirá la válvula (de 0 % a 41.60 %), esta maniobra también se puede realizar de manera que al principio se abra lentamente (un 10 %) y que pasado un tiempo conveniente se abra más rápido (su 31.6 % restante). Cuando se haga su respectivo paro en el minuto 50, así mismo de la primera bomba, su maniobra será la siguiente: hasta el minuto 48 la válvula de regulación permanecerá abierta y entre los 48 a 49 minutos la válvula se cerrará, y con estas condiciones se mantendrá durante toda su simulación. Con esta programación cuando se ponga en marcha las bombas por ejemplo la número uno un período de tiempo desde los 5 hasta los 6 min estarán a válvula cerrada y no pasara caudal a la instalación; no obstante la bomba ya estará en marcha; en las tablas 4-4 se detalla los intervalos de tiempos a válvula cerrada y abierta de cada una de las válvulas de regulación en la estación de bombeo.

Punto	Inst (s)	Apert (%)
1	360	0
2	420	41.6
3	2880	41.6
4	2940	0

Punto	Inst (s)	Apert (%)
1	660	0
2	720	41.6
3	3180	41.6
4	3240	0

Punto	Inst (s)	Apert (%)
1	960	0
2	1020	41.6
3	3480	41.6
4	3540	0

Punto	Inst (s)	Apert (%)
1	1260	0
2	1320	41.6
3	3780	41.6
4	3840	0

Tabla 4-4 Maniobras de la válvula de Regulación de cada bomba (caso 2)

Además como se indicó con anterioridad al grupo de bombeo se puede imponer su funcionamiento, en la velocidad de rotación, de manera que sus arranques y paradas sean totalmente controlados, en las tablas 4-5 se describe su programación.

EB CON IMPOSICIÓN DE VELOCIDAD DE ROTACIÓN		
Núm EB con imposición de N	4	Actualizar
EB para impositic N	BMoixent1	Núm puntos 4
Punto	Instante (s)	Rotación (% Nrég)
1	300	0
2	330	100
3	3000	100
4	3030	0

EB CON IMPOSICIÓN DE VELOCIDAD DE ROTACIÓN		
Núm EB con imposición de N	4	Actualizar
EB para impositic N	BMoixent2	Núm puntos 4
Punto	Instante (s)	Rotación (% Nrég)
1	600	0
2	630	100
3	3300	100
4	3330	0

EB CON IMPOSICIÓN DE VELOCIDAD DE ROTACIÓN		
Núm EB con imposición de N	4	Actualizar
EB para impositic N	BMoixent3	Núm puntos 4
Punto	Instante (s)	Rotación (% Nrég)
1	900	0
2	930	100
3	3600	100
4	3630	0

EB CON IMPOSICIÓN DE VELOCIDAD DE ROTACIÓN		
Núm EB con imposición de N	4	Actualizar
EB para impositic N	BMoixent4	Núm puntos 4
Punto	Instante (s)	Rotación (% Nrég)
1	1200	0
2	1230	100
3	3900	100
4	3930	0

Tabla 4-5 Paradas y Arranques de los grupos de bombeo con imposición en la velocidad de rotación (caso 2)

➤ **Evolución de la cota de agua en el depósito de Ramblar**

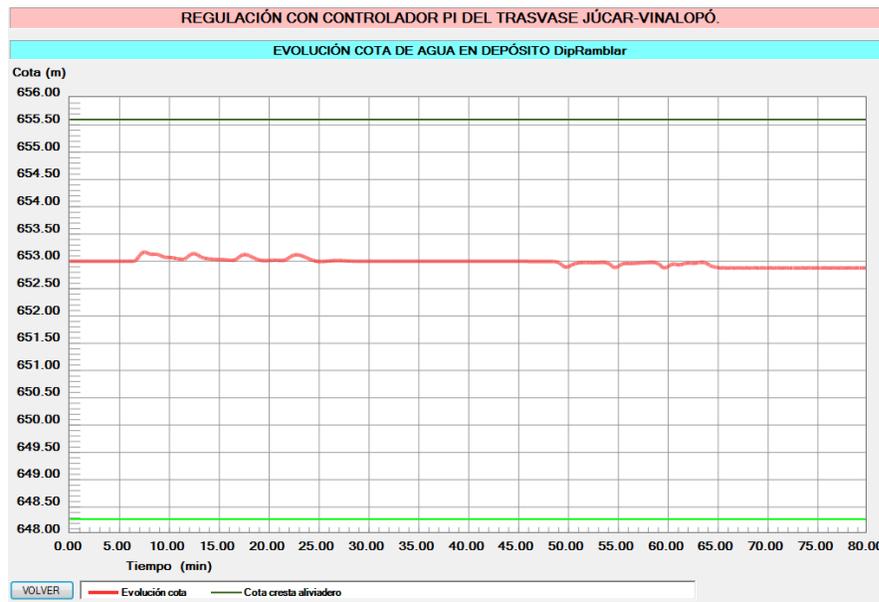


fig. 4-8 Evolución de la cota de agua en el depósito a válvula Cerrada.

Como inicialmente el sistema esta parado, su cota se ha establecido en 653 m (ver figura 4-8), cuando entra a funcionar la bomba uno al minuto 5, y alcanza su funcionamiento normal en el instante 5.5 min. con caudal cero; el regulador PI responde de una manera efectiva al no actuar solo con el hecho de poner en marcha las bombas, si no que actua unicamente cuando la maniobra de apertura de válvula de regulación deja pasar caudal y hace subir el

nivel del agua en el depósito, enviando esa señal a la válvula motorizada SDMX que haga aumentar su apertura en un cierto porcentaje; para que el caudal de salida del depósito se equipare con el caudal de entrada. Conforme los grupo de bombeo se van poniendo en marcha, y se van abriendo posteriormente sus válvulas de regulación, la cota tiende a un sobre pico que es controlado por el regulador que hace equilibrar y mantener en el valor pre-establecido, hasta el minuto 49; que es en donde sufre otra perturbación a causa del cierre anticipado de la válvula de regulación de la primera bomba, este efecto en esta ocasión disminuye su cota, pero hay una recuperación de la cota por unos minutos debido a que las siguientes bombas se paran de igual forma; hasta que finalmente llega a establecerse en 652.85 m de cota.

➤ **Evolución del nivel de agua en el depósito de ramblar**

La respuesta que aquí se obtiene es semejante al caso de su evolución de cota de agua en el depósito previamente analizada. Y si hacemos una comparación con la maniobra a válvula abierta, el comportamiento tampoco llega a diferir ya que en ninguno de los dos casos; presentan oscilaciones que puedan llegar a desestabilizar el sistema, lo que quiere decir es que el ajuste de los coeficientes K_p y K_i del regulador responde bien independientemente de su maniobra (ver figura 4-9).

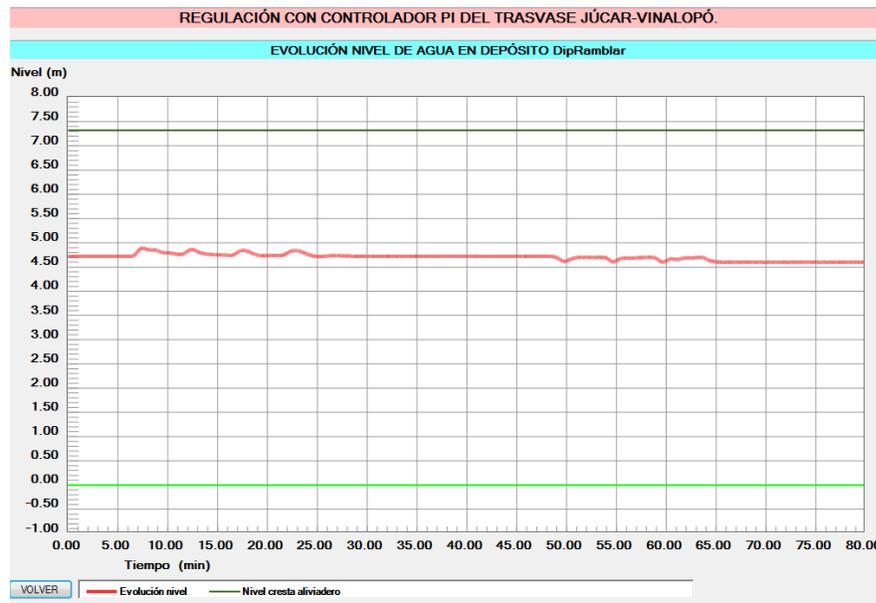


fig. 4-9 Representación del Nivel con arranque y paro a Válvula Cerrada.

➤ **Comportamiento del grado de apertura de la válvula de regulación (SDMX)**

En la figura 4-10 se confirma lo dicho; que la válvula de regulación no llega a actuar en el minuto 5.5, tiempo en el cual la velocidad de rotación de la primera bomba está en su máximo funcionamiento, ya que el controlador no envía ninguna señal a la variable

manipulable, que la haga variar su nivel de agua y a su vez se mantiene en 0 % de apertura. No así en el minuto 7 en donde un caudal determinado ingresa hacia el depósito, el cual hace aumentar el nivel por encima del valor de consigna, y que a su vez efectuara un cambio de posición en la variable manipulable porque su estado actual no es adecuado para esas nuevas condiciones de trabajo. Su continuo cambio va siempre en base ya sea de la maniobra impuesta por el operador o por maniobra programada en su válvula de regulación, ubicada a la salida del equipo de bombeo, y en todos los casos ya sea por parada o puesta en marcha el sistema sigue respondiendo adecuadamente ante eventualidades externas.

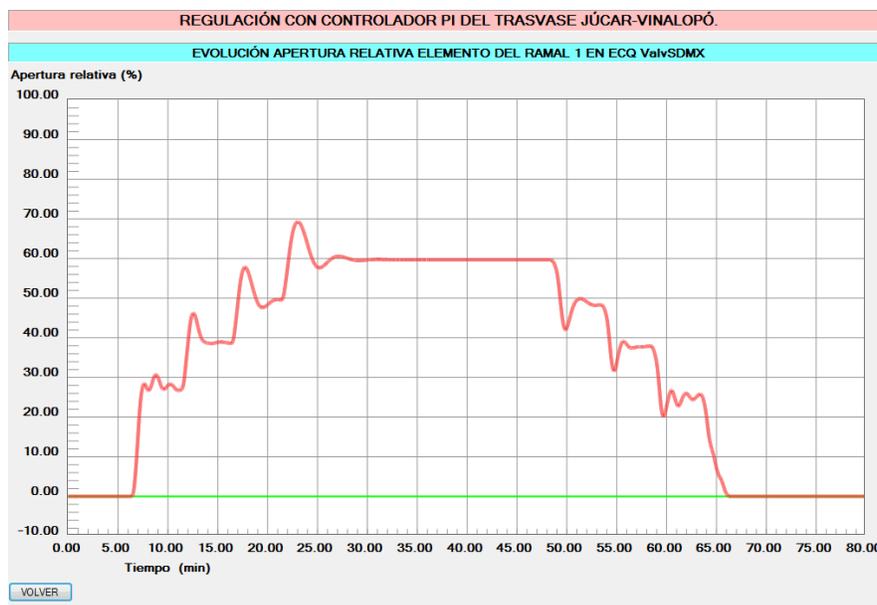


fig. 4-10 Representación del grado de apertura a válvula cerrada.

Por otro lado un aspecto a considerar es la inercia del flujo y que también se vio en el primer caso; que está presente entre las estructuras de protección contra transitorios y la tubería de impulsión V. Potro; que hace que su grado de apertura sea oscilante continuamente cuando todas las bombas ya se han parado.

Este fenómeno se debe porque la entrada de caudal impulsado por el grupo de bombeo es por la parte inferior del depósito de Ramblar; trayendo como consecuencia que su nivel dentro del depósito ascienda y descienda de forma permanente de la misma manera como lo hace en los calderines. Esta consideración se recoge en la figura 4-11 en la cual se hizo su simulación con la entrada de caudal por la parte inferior del depósito de Ramblar, de este modo se observa que su grado de apertura no llega a ser 0 del todo como en la figura 4-10.

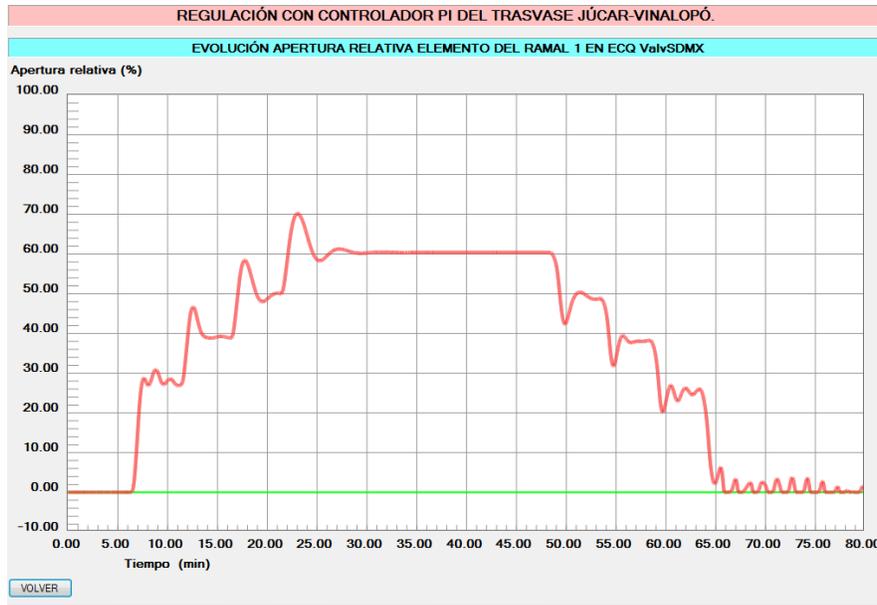


fig. 4-11 Representación del grado de apertura a válvula cerrada con alimentación superior.

➤ **Representación del volumen de agua en una de las tres estructuras de protección.**

La función que deben realizar estas estructuras de protección (calderines) durante las perturbaciones ya se comentó en su momento, en vista de ello nos enfocaremos en el análisis del último tramo (figura 4-12) que es el causante para que tanto el grado de apertura de la válvula de regulación SDMX como el nivel en el depósito de Ramblar (alimentación por la parte inferior del depósito), estén oscilando de manera continua y que por tal motivo requieran un tiempo razonable para poder estabilizar del todo al sistema.

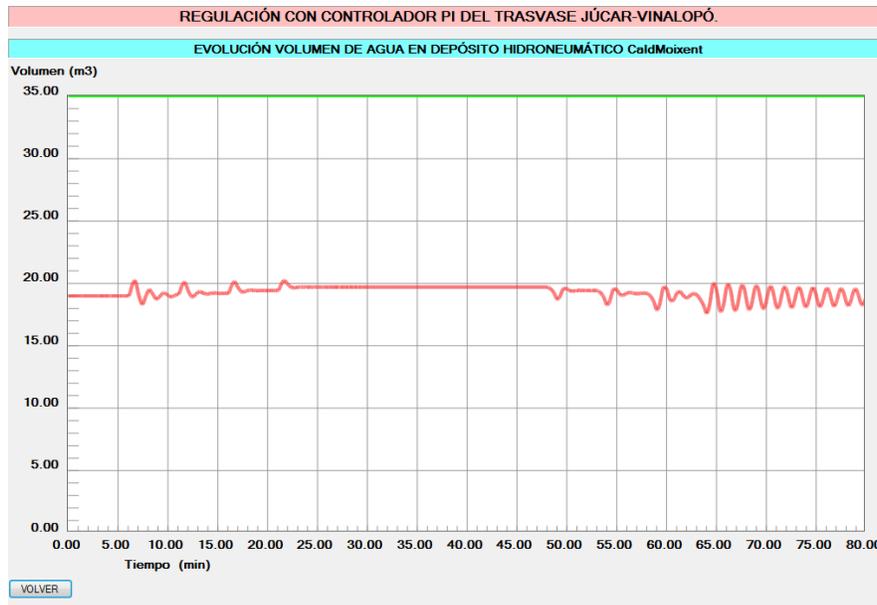


fig. 4-12 Evolución del agua en el calderín a válvula cerrada.

Como los calderines aumentan la inercia del sistema pero sólo a partir del momento de la parada del grupo elevador, por lo que en absoluto afecta a la puesta en marcha del grupo, su oscilación respectiva únicamente se da en la parada y no así en la puesta en marcha de la estación de bombeo; esto se puede verificar en la figura 4-12. Es por esta razón que la instalación tardará más tiempo en llegar al equilibrio, como se puede observar en la figura 4-13 que representa su nivel cuando la entrada de caudal es por la parte inferior del depósito.

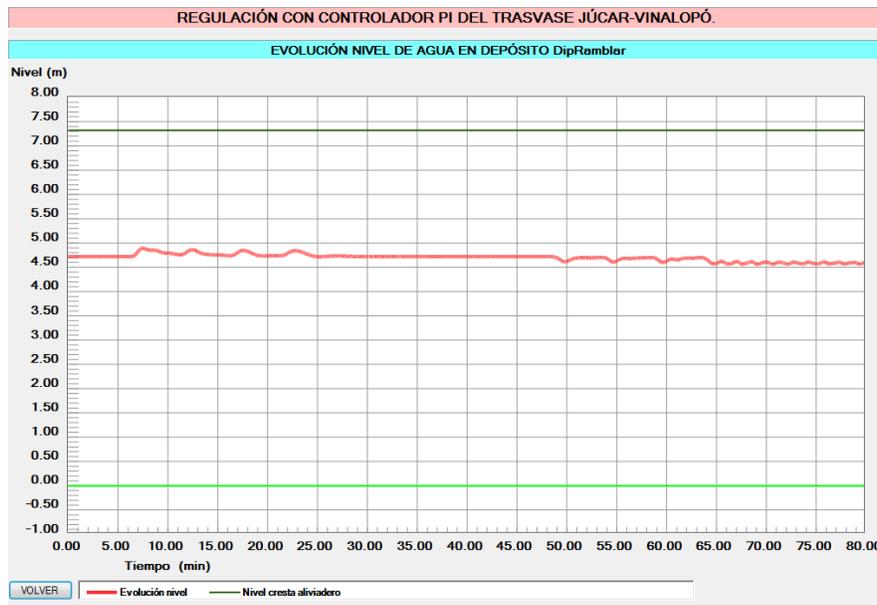


fig. 4-13 Evolución del nivel de agua en el depósito con alimentación por la parte inferior (caso 2).

➤ Evolución del caudal entrante/saliente del depósito de Ramblar

Como la inercia se va a dar tanto en la impulsión, como entre el depósito de Ramblar y la válvula motorizada SDMX (tramo V), ya que esta se cerró (minuto 65) para mantener constante el nivel; las oscilaciones en el intervalo de tiempo entre los 65 y 80 min presentes allí (línea verde figura 4-14), no son de mucha amplitud; de modo que estas fluctuaciones no afectaran la condición impuesta por el regulador PI en el grado de apertura final de la válvula motorizada, ya que el grupo de impulsión ha parado (línea roja figura 4-15), y por lo tanto no existe perturbación alguna. De allí que su nivel, cota y grado de apertura se mantiene constantes desde ese tiempo en adelante.

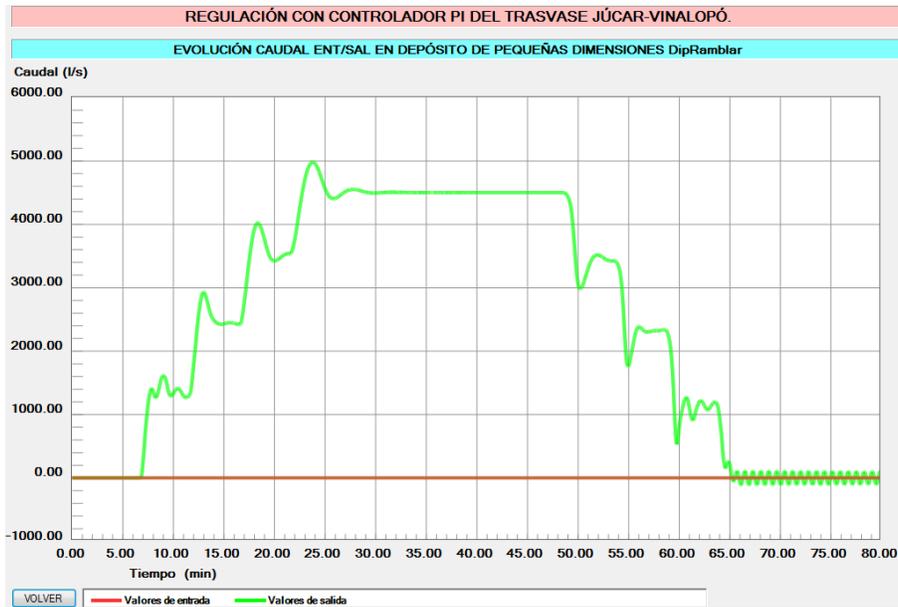


fig. 4-14 Evolución de la salida de caudal en el depósito de Ramblar a válvula cerrada.

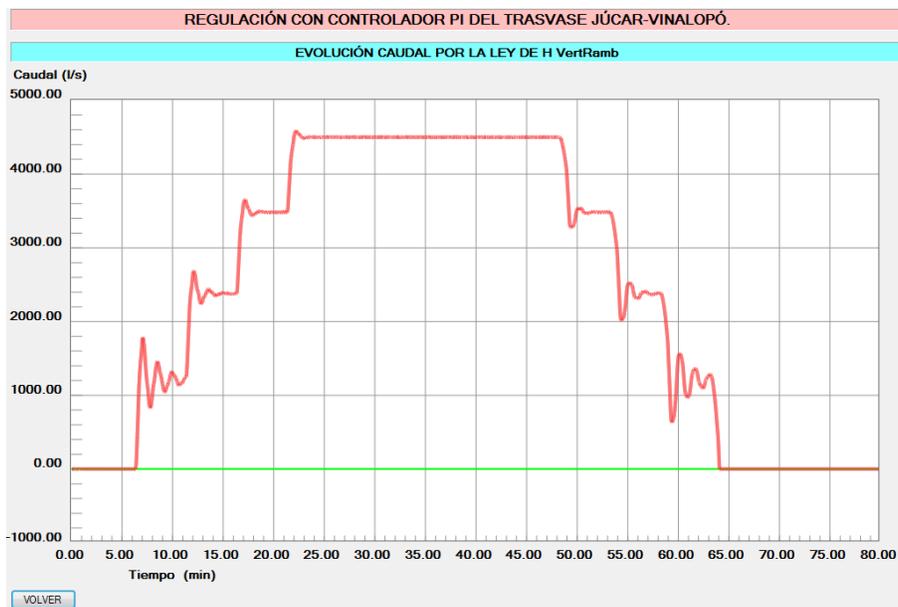


fig. 4-15 Evolución de la entrada de caudal en el depósito de Ramblar a válvula cerrada

4.4 Parada accidental y arranque programado de las bombas a válvula abierta

Una vez realizado la simulación en condiciones programadas, es momento de ponerlo a prueba al regulador PI, cuando ocurra una parada imprevista del grupo elevador debido a un corte de energía, y puesta en marcha luego de un cierto lapso de tiempo; cuyos efectos serán estudiados y representados para comprobar la veracidad del cálculo analítico producidos por esa acción.

Planteamiento del problema en cuestión.

El sistema esta inicialmente en marcha, hasta el minuto 5 que es en donde se produce su corte de energía parando a todo el equipo elevador. La tabla 4-6 muestra que la instalación está en funcionamiento normal al empezar la simulación.

PROGRAMA ALLIEVI. Datos de las Estaciones de Bombeo (1/2)														
REGULACIÓN CON CONTROLADOR PI DEL TRASVASE JÚCAR-VINALOPÓ.														
DATOS DE LAS ESTACIONES DE BOMBEO														
Número de Estaciones de Bombeo		4		Actualizar		Punto óptimo funcionamiento de bombas					Coef. pérd. válv. ret. (m ³ /s) ²			
EB	Denominación	Núm B paralelo	Forma curvas caract bombas	Tipo válv de grupo	Func inicial de bombas	Vel rotac rég (rpm)	Inercia grupo (Kg.m ²)	Vel rotac nom (rpm)	Qb (l/s)	Hb (m)	Pot (kW)	Rend máx (%)	Por grupo	Para by-pass
1	BMoixent1	1	Universales	7	En marcha	985	47	985	1121	316	3967	87.60	3.5	
2	BMoixent2	1	Universales	7	En marcha	985	47	985	1121	316	3967	87.60	3.5	
3	BMoixent3	1	Universales	7	En marcha	985	47	985	1121	316	3967	87.60	3.5	
4	BMoixent4	1	Universales	7	En marcha	985	47	985	1121	316	3967	87.60	3.5	

Tabla 4-6 Cuadro del grupo de bombeo en marcha (caso 3)

Como el instante de parada se da al tiempo indicado anteriormente y sin programación previa; el respectivo paro del grupo de bombeo no tiene tiempo de parada porque es una desconexión y va por inercia, hasta que totalmente llega a cero. Se establece un intervalo de 25 minutos para que nuevamente la estación de bombeo empiece a funcionar, comenzando por la primera bomba en el minuto 30, seguido de las demás bombas con desfase de 5 minutos. (ver tabla 4-7).

EB INICIALMENTE EN MARCHA, Y QUE SE PARAN EN UN DETERM, INSTANTE					
Núm. EB inicialmente en marcha		4		Actualizar	
EB	Denominación	Instante de parada (s)	¿Se vuelve a arrancar?	Instante de arranque (s)	Tiempo de arranque (s)
1	BMoixent1	300	Si	1800	30
2	BMoixent2	300	Si	2100	30
3	BMoixent3	300	Si	2400	30
4	BMoixent4	300	Si	2700	30

Tabla 4-7 Tabla de parada y arranque de la estación de bombeo Moixent (caso 3)

Luego de la puesta en funcionamiento de todas las bombas, el sistema funciona con esas nuevas condiciones y no cambia en toda la simulación prevista.

➤ Evolución de la cota de agua en el depósito de Ramblar

El efecto de parada inesperada del grupo motor, tiene considerable consecuencia con respecto a los dos casos antecidos en cuanto a su cota de referencia (figura 4-16); que lo establece en 652.69 m. pero que a la vez el regulador actúa de manera eficiente evitando el vaciado del depósito de Ramblar; esto puede ser interpretado que el ajuste de los coeficientes proporcional e integrativo del regulador son adecuados, consiguiendo un desempeño acorde a las especificaciones del sistema, independientemente de las perturbaciones a las que esté expuesto.

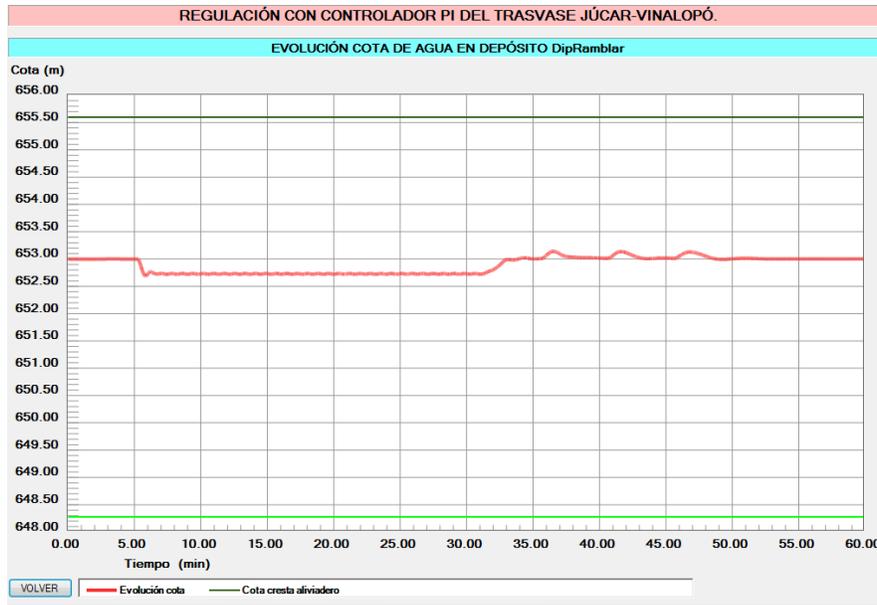


fig. 4-16 Evolución de la cota de agua en el depósito (caso 3)

➤ **Comportamiento del nivel de agua en el depósito**

Su resultado no es indiferente al obtenido de su cota, la única eventualidad que no se ha considerado en ninguno de los casos es que cuando exista las oscilaciones permanentes como el que se da desde el minuto 5 al 30 (ver figura 4-17), estas no afectaran el control del regulador siempre y cuando sus oscilaciones no sean de muy alta frecuencia y lleguen a inestabilizar el sistema.

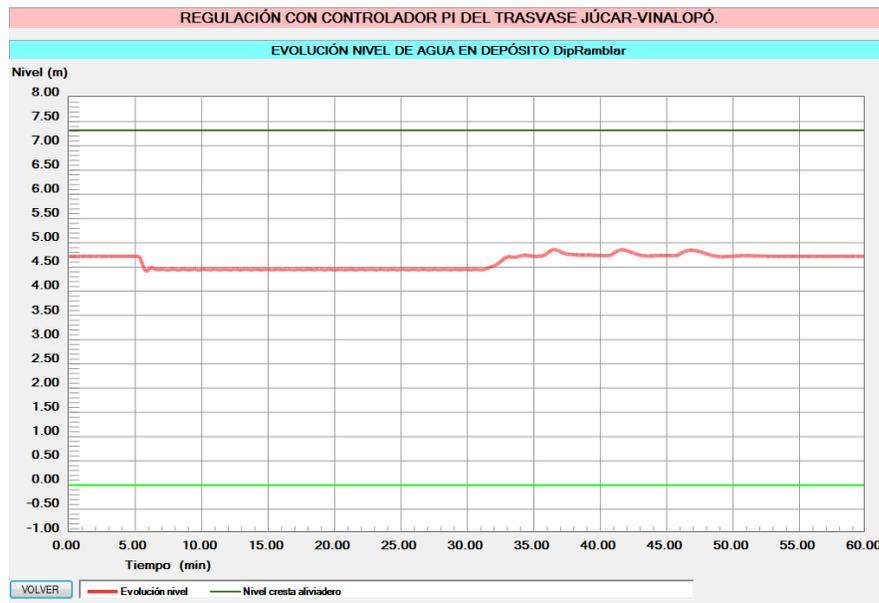


fig. 4-17 Evolución del nivel de agua en el depósito (caso 3)

➤ **Comportamiento del grado de apertura de la válvula motorizada.**

Como se comentó anteriormente las oscilaciones provocadas garantizan que el grado de apertura de la válvula motorizada no tenga una continua oscilación en el momento que paran las bombas y entre a actuar el equipo hidroneumático. Su comprobación se representa en la figura 4-18 donde en ese intervalo de fluctuación no se modifica el porcentaje de apertura que es del 0 %, abriéndose únicamente cuando se produce el funcionamiento respectivo de la instalación y llegándose a establecerse en los 59.73 % de grado de apertura final, el mismo que tenía al principio de su funcionamiento.

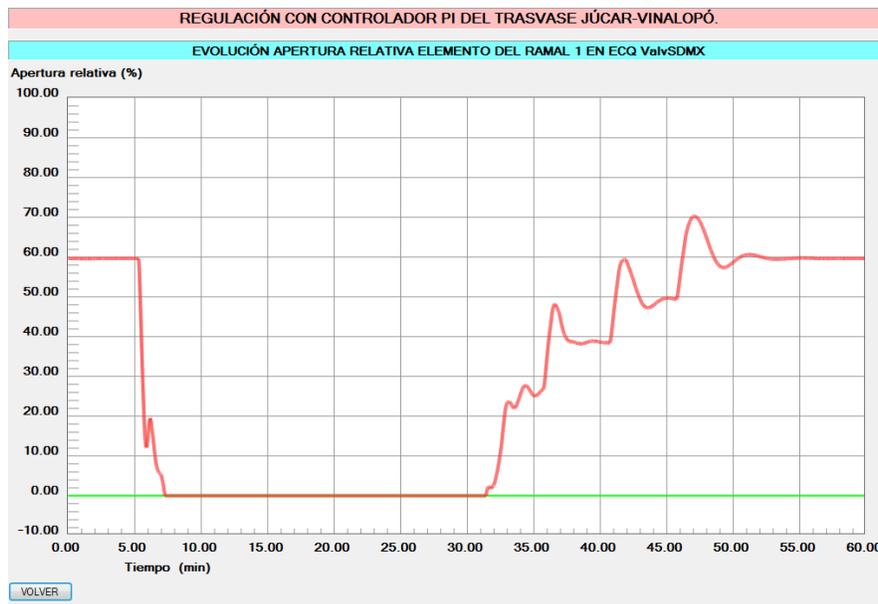


fig. 4-18 Grado de Apertura de la válvula motorizada (caso 3)

Un factor importante de mencionar también en el funcionamiento de la instalación son sus velocidades de flujo en condiciones de régimen permanente dentro de las tuberías; en la tabla 4-8 una velocidad de 1.58 m/s es alcanzado en el tramo V, esto refleja que la válvula motorizada solo con el hecho de controlar el nivel establecido, también está regulando su velocidad impidiendo su aumento; así por ejemplo cuando hay un sobre pico de apertura como del 70%, además de tener un nivel superior al de consigna, tendremos velocidades elevadas dando lugar a condiciones más desfavorables en el golpe de ariete. Por lo que se recomienda que en el sistema no se deba sobrepasar una velocidad máxima de 1.5 m/s, no obstante, no se trata de un límite máximo absoluto, pudiendo esta velocidad ser excedido en casos debidamente justificados o por instantes de tiempo como se da en nuestro caso.

VALORES INICIALES EN TUBERÍAS

Número de tuberías

Tub	Denominación	Q (l/s)	V (m/s)	Factor de fricción	Pérd (m) fricción	Pérd (m) menores	Cel (m/s)	Tramos	Long máx aire tub (m)
1	TubVPotro	4500.40	1.71	0.01283	16.32	0.00	917.95	339	42.49
2	TramVII-2	4504.01	1.12	0.01257	0.11	0.00	787.50	8	2.00
3	TramV	4504.01	1.58	0.01277	8.57	0.00	857.70	236	

Tabla 4-8 Velocidades de los diferentes tramos del sistema (caso 3)

➤ **Representación de las estructuras de protección**

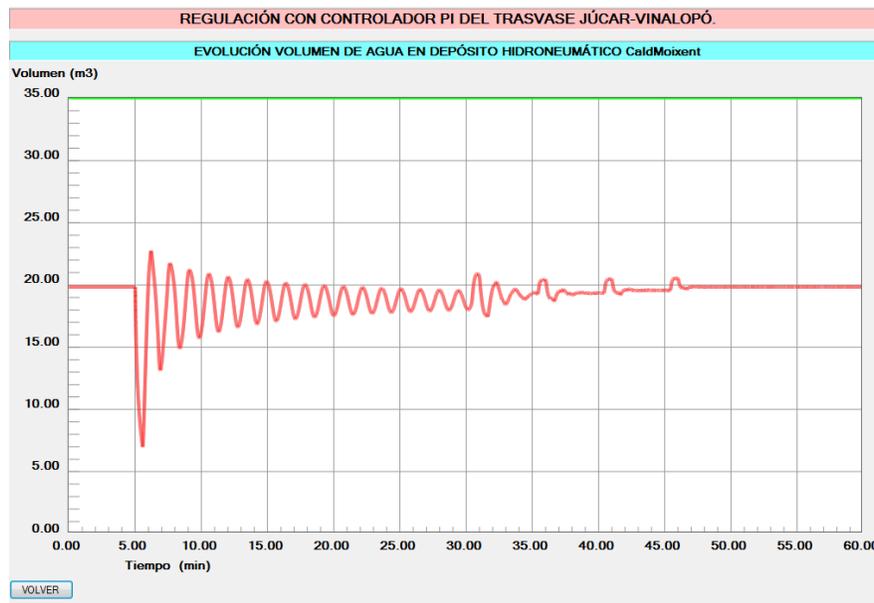


fig. 4-19 Comportamiento de las estructuras de protección (caso 3)

La frecuencia de las oscilaciones desde el minuto 5 al 30 (ver figura 4-19) es impuesta como era de suponer por la desconexión accidental, y provocó en el sistema hidráulico inestabilidad de las condiciones de operación estacionaria; pero por la presencia de los dispositivos hidroneumáticos la evolución de la amplitud de las oscilaciones van disminuyendo con el tiempo pero no llegando a eliminarlo del todo, ya que su puesta en marcha del grupo elevador en el minuto 30 genera oscilaciones de otro tipo; sometiéndole al sistema a una oscilación que es amortiguada en el tiempo gracias al regulador PI.

➤ **Representación del caudal de entrada y salida en el depósito de Ramblar**

Si las oscilaciones de entrada y salida de caudal en el punto de salida final del depósito de la figura 4-20 (línea verde), son de considerable amplitud y lleguen a representar un aumento o disminución del nivel de referencia; registrando el regulador como una señal de error y por ende su modificación en la variable manipulable τ , se puede incorporar una banda de nivel; que de esta forma mientras dicho nivel esté dentro de la banda, la válvula

no responderá. Es lo mismo que decir que la válvula abrirá o cerrará no cuando el nivel del agua sea diferente del de referencia, sino cuando dicho nivel salga de un intervalo especificado, pero como se indicó en nuestro caso no es necesario porque dichas oscilaciones no afectan la estabilidad del sistema.

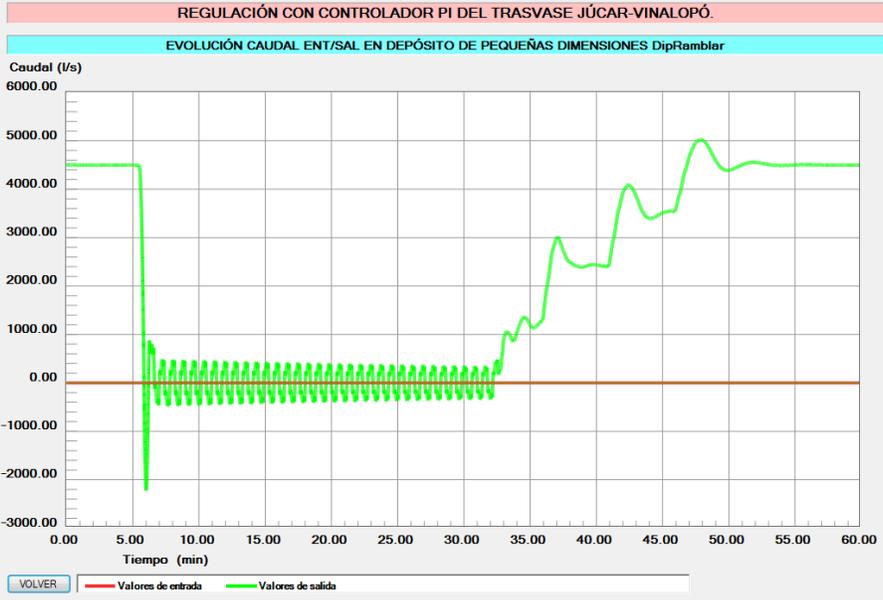


fig. 4-20 Caudal de salida en el depósito de Ramblar (caso 3).

Finalmente tanto el caudal de entrada como el de salida tienen un valor final de 4500.4 y 4504.01 l/s, respectivamente lo cual indica que se cumple el objetivo planteado de estabilizar el sistema frente a cualquier perturbación exógena que se presente.

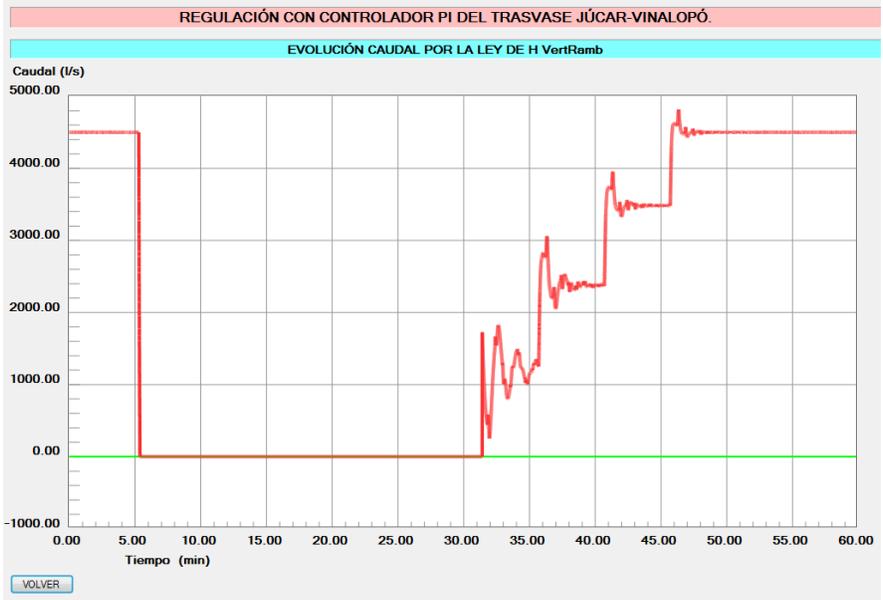


fig. 4-21 Caudal de entrada en el depósito de Ramblar (caso 3).

➤ **Evolución de la presión en el nudo NV06 (caso 3)**

Un análisis también interesante es la representación de la evolución de presiones en el nudo de entrada a la válvula de regulación de nivel (nudo NV06), en donde se considerará las maniobras provocadas por el caso 3 (más desfavorable) de la válvula motorizada SDMX.

Cuando se las hace trabajar a las válvulas con escasa abertura y caudales importantes, provocan una enorme disipación energética dada la gran resistencia que ofrecen al paso del fluido. Asimismo, la velocidad en el interior de la válvula se incrementa considerablemente como consecuencia de la disminución de la sección efectiva de paso (efecto Venturi). Todo ello conlleva una brusca disminución de la presión, que puede llegar hasta la presión de vapor, con lo que aparecerá el fenómeno de la cavitación. En la figura 4-22 se presenta dicho efecto en donde en un lapso de 1 minuto existe una importante sobrepresión y depresión debido al estrangulamiento al que se somete al flujo, cuando el grupo de bombeo cesa en su funcionamiento; como consecuencia de ello, la línea de nivel de presión aumenta y disminuye desde un valor de 127.59 a -11.69 mca respectivamente, si se continuara por un tiempo prolongado este fenómeno es posible incluso llegar al "bloqueo" del flujo, es por esto que se requiere de maniobras con cierta capacidad de predicción de cuándo, en qué condiciones puede ocurrir y por cuanto tiempo ocurrirá y así podremos saber hasta qué punto se pueden forzar las condiciones de trabajo de la válvula.

La cavitación desde el minuto 5.5 y 6.5 puede caracterizarse como incipiente porque lo hace de modo intermitente y únicamente cuando exista una parada inesperada del grupo de bombeo, y luego de este tiempo en adelante sus presiones son controladas y establecidas en 25 mca. la misma que es adecuada para el sistema en estudio.

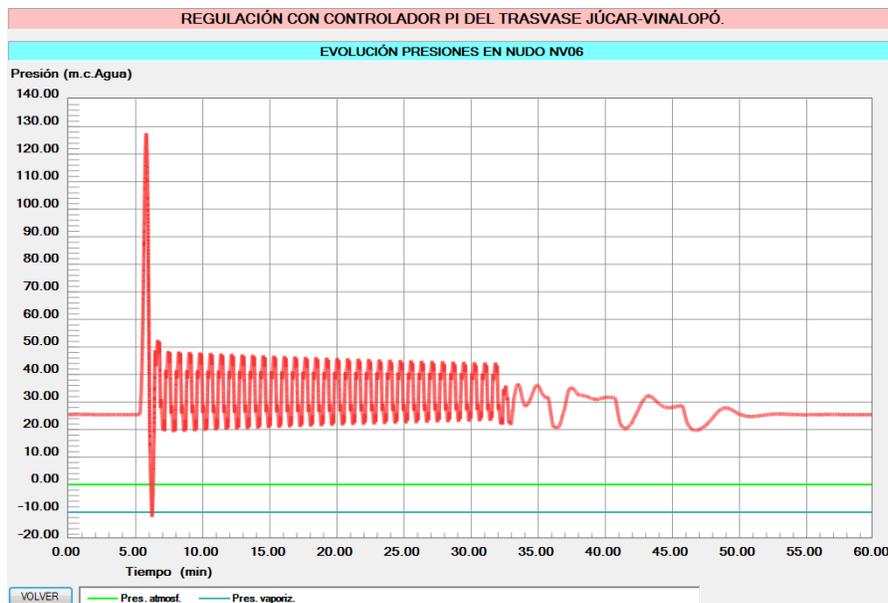


fig. 4-22 Evolución de la presión del nudo NV06 (caso 3)

Capítulo 5.
Conclusiones y
Recomendaciones

5.1 Conclusión.

La administración y distribución de abastecimientos de agua requiere la automatización y supervisión de la instalación hidráulica; de aquí que la automática de control, actúa para mejorar el sistema de control. Para ello la determinación total de la personalidad de la instalación es fundamental para garantizar el ajuste correcto de los coeficientes del regulador, también el sistema podría tener su personalidad modificada a través de la selección de los parámetros y en general arreglando en la fase de diseño, para conseguir en la etapa final resultados deseados según nuestros requerimientos.

El modelo hidráulico presentado en este trabajo fue desarrollado para simular diferentes escenarios del sistema hidráulico, y demostrar que los valores sugeridos para el regulador PI se ajustan de acuerdo a las condiciones de operación analíticas, logran los resultados esperados en la operación a largo plazo del sistema, y confirman el correcto planteamiento de sus ecuaciones en el modelo. Para el control más preciso y ajustado a la realidad fue necesario utilizar una herramienta computacional como Allievi, la cual permite el seguimiento de la evolución en el tiempo del nivel de agua en el depósito y del grado de apertura de la válvula. En definitiva, para verificar que los coeficientes K_p y K_i del regulador fueron apropiados y conseguir un desempeño favorable ante las reglas y las restricciones impuestas por el sistema.

Además este trabajo tomó en cuenta las características no lineales del actuador, el efecto de las perturbaciones no constantes en la velocidad de alimentación del tanque y la inercia del fluido que está presente sobre todo cuando los caudales trasegados son considerables.

Las dos técnicas utilizadas, analíticas y numéricas, logran el objetivo principal. Pero Allievi en su proceso numérico (método de las características) mantiene todas las no linealidades de la instalación y no hace aproximaciones que lo hagan diferente a la realidad, es progresivo en el tiempo y no involucra cálculos matriciales que inducen a resultados inconsistentes, además es sencillo de programar y es computacionalmente eficiente cuando se verifican las condiciones de estabilidad del mismo dadas por la condición de Courant-Friedrics-Lewy (condición CFL). Una vez implementado, resulta un método explícito en el tiempo; que no es necesario resolver en cada Δt grandes sistemas de ecuaciones simultáneas, lo que supone gran eficiencia computacional.

Finalmente el desarrollo de un sistema de control de nivel de agua automático por medio de un regulador PI, conseguirá salidas de caudales regulados ante grandes variaciones de flujo de entrada, para evitar un desbordamiento o vaciado del depósito. Con ello se minimiza la presencia de personal para la toma de decisiones en el proceso de control.

5.1.1 Recomendaciones

La verificación de los datos con Allievi ha demostrado que gracias a su motor de cálculo responden de manera efectiva alcanzando el objetivo perseguido, es por esta razón que este programa debe de contar con un método como el del lugar de las raíces para tener un fundamento preciso en el diseño del regulador PI o PID, en donde se establece de acuerdo al conocimiento exacto de la instalación (planta), la ubicación de sus raíces y analizar si su sistema es estable o no, con lo cual se deberá tomar las decisiones respectivas para tener un resultado final acorde a nuestras especificaciones deseadas, implementando un regulador eficiente y robusto ante cualquier perturbación en el sistema. Con el fin de alcanzar el control total de las instalaciones hidráulicas sometidas a:

- Regulación mediante depósitos de cabecera.
- Bombeo directo con regulación todo o nada.
- Regulación con válvula motorizada.
- Regulación con bombas de velocidad variable.
- Regulación por seguimiento del caudal de entrada.
- Regulación del nivel de dos depósitos por medio de una válvula motorizada.

Para conseguir una regulación óptima que origine el menor coste teniendo en cuenta la capacidad hidráulica de cada estación, capacidad de depósitos y discriminación horaria, todo ello para tener una gestión óptima de los sistemas de transporte de agua.

Bibliografía

- [1] J. Abreu, E. Cabrera, V. Espert, J. García- Serra y F. Sanz, (2012) "Transitorios Hidraulicos", Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- [2] B. C. Kuo, (1996) "Sistemas de Control Automático", Prentice-Hall Hispanoamericana, México.
- [3] N. S. Nise, (2004) "Sistemas de control para Ingeniería", Continental, México.
- [4] C. A. Bahón y C. Raya Giner, (2004) "Tecnología de Sistemas de Control", Edicions UPC, Barcelona.
- [5] C. V. Miranda, (2012), " Sistemas de control continuos y discretos", Paraninfo, Madrid.
- [6] K. Ogata, (1998) "Ingeniería de Control Moderna", Prentice-Hall Hispanoamericana, México.
- [7] R. H. Gaviño, (2010) "Introducción a los sistemas de control", Prentice Hall, Madrid.
- [8] L. Moreno, S. Garrido y C. Balaguer, (2003) "Ingeniería de Control Modelado, Análisis y control de sistemas dinámicos", Ariel, Barcelona.
- [9] R. C. Dorf y R. H. Bishop (2005), "Sistemas de control moderno", Person Prentice Hall, Madrid.
- [10] R. P. Ñ. Garcia, O. Reinoso Garcia, N. Garcia Aracil y R. Aracil Santonja, (2003) "Apuntes de Sistema de control", Club Universitario, Alicante.
- [11] M. P. J., J. Otero Corte, R. Rios Fernandez y P. Suarez Rodriguez, (1990) "Cálculo Operacional: La Transformada de Laplace", Universidad de Oviedo, Oviedo.
- [12] R. G. López, D. Espinosa Corbellini, M. Á. Fernande Granero y E. Romero Bruzón, (2004), "Fundamentos de Regulación Automática", Universidad de Cádiz, Cádiz.
- [13] C. A. Smith y A. Corripio, (2000) "Control Automático de Procesos", Limusa S.A., Madrid.
- [14] J. Balcells y J. L. Romeral, (1997) "Autómatas Programables", Marcombo, Barcelona.

- [15] E. M. Pérez, J. M. Acevedo, C. F. Silva y J. Quiroga, (2009) "Autómatas Programables y Sistemas de Automatización", Marcombo, Barcelona.
- [16] K. J. Aström y T. Häggglund, (2009) "Control PID Avanzado", Pearson Prentice Hall, Madrid.
- [17] J. A. Navarro Márquez, (2002) "Sistemas de Medida y Regulación", Ceysa, Barcelona.
- [18] A. Roca, (2010) "Control de Procesos con prácticas de simulación y análisis por ordenador PC", Tarragona.
- [19] W. Bolton, (2009) "Ingenieria de Control", Marcombo Alfaomega, Barcelona.
- [20] N. F. Marcia y J. Thaler, (2005) "Modeling and Control of Dynamic Systems", Thomson Delmar Learning, New York.
- [21] I. Boiko, (2013) «Variable-structure PID controller for level process,» Elsevier Science Ltd.
- [22] J. Wilkie, M. Johnson y R. Katebi, (2002) "Control Engineering an Introductory Course", Palgrave Macmillan, New York .
- [23] M. Barrón y J. González, «Evaluación experimental de un esquema de regulación».
- [24] D. Jones, (2008) «Simulation of hydroelectric system control,» Elsevier Science Ltd.
- [25] T. K. Ilyas Eker, (2002) «Operation and control of a water supply system,» The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- [26] J. N. Petr Chalupa, (2013) «Modeling and model predictive control of a nonlinear,» Elsevier Science Ltd.