

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

TESIS DE GRADO

CÉSAR LUIS GARCÍA MARIN

JUAN ELISEO ESTUPIÑÁN GUTIÉRREZ



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN  
SECCIONAL BUCARAMANGA

2011

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
MÓDULO VIRTUAL DE CONTROL PARA NIVEL Y FLUJO DE AGUA

CÉSAR LUIS GARCÍA MARIN  
JUAN ELISEO ESTUPIÑÁN GUTIÉRREZ

HECTOR RAMIRO PEREZ RODRIGUEZ

Ph.D. Ingeniería Mecánica

Director de tesis

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN  
SECCIONAL BUCARAMANGA

2011

## AGRADECIMIENTOS

A Dios quien ha sido pilar fundamental en mi vida, A mi familia por su total apoyo y A nuestro director de tesis por su ayuda incondicional.

**César García.**

A Dios quien ha sido el que nos ha brindado las oportunidades para alcanzar nuestros logros, a mi familia quien ha sido mi apoyo incondicional, a mis padres por haber inculcado en mí el valor del conocimiento y a nuestro director de tesis por su gran ayuda en la culminación de este gran objetivo.

**Juan E Estupiñán.**

**Nota de Aceptación**

---

---

---

---

---

---

**Firma del Presidente del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN_____	12
PRESENTACIÓN_____	12
SOFTWARE_____	14
PROCON SERIE 3800 _____	15
MOTIVACIÓN_____	17
1. OBJETIVOS_____	18
1.1. OBJETIVO GENERAL_____	18
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS_____	18
2. MODULO VIRTUAL PARA CONTROL DE NIVEL Y FLUJO DE AGUA_	19
2.1 DESCRIPCION GENERAL_____	19
2.2 TUBERÍA_____	20
2.3 ACCESORIOS_____	24
2.4 CALCULO DE PERDIDAS EN TUBERIA Y ACCESORIOS_____	25
2.5 VÁLVULAS_____	34
2.5.1 VÁLVULA MANUAL_____	35
2.5.2 VÁLVULA DE CONTROL_____	37
2.6 TANQUE DE ALMACENAMIENTO_____	46
2.7 BOMBA SUMERGIBLE_____	47
3. DESARROLLO MATEMATICO DEL SISTEMA_____	51
4. DESARROLLO DEL SOFTWARE_____	62
4.1 PLATAFORMA EN LABVIEW_____	63
5. CONCLUSIONES_____	67
6. BIBLIOGRAFIA_____	69
7. ANEXOS_____	71
7.1 ALGORITMOS_____	71
7.1.1 ALGORITMO 1_____	71

7.2 CONTROL DE PROCESOS, CONTROL P, PI, Y PID_____	77
7.3 TRANSFORMADA DE LAPLACE_____	86
7.4 SERIES DE TAYLOR_____	88

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Diagrama de Moody.
- Figura 2. Coeficientes de pérdidas “K” para accesorios.
- Figura 3. Circuito de flujo de agua y sus dimensiones.
- Figura 4. Coeficiente de fricción en tubería, método gráfico
- Figura 5. Válvula manual.
- Figura 6. Circuito de control para intercambiador de calor
- Figura 7. Fabricantes más conocidos.
- Figura 8. Válvula EV210B 10B.
- Figura 9. Comportamiento de la válvula.
- Figura 10. Caudal Vs. Porcentaje de apertura de la Válvula.
- Figura 11. Perdidas Vs. Posición de la Válvula.
- Figura 12. Dimensiones y características del tanque.
- Figura 13. Bomba por encima de la succión.
- Figura 14. Bomba por debajo de la succión.
- Figura 15. Característica H-Q del sistema.
- Figura 16. Diagrama utilizado para desarrollo matemático del sistema.
- Figura 17. Interfaz grafica.
- Figura 18. Interfaz de programación grafica.
- Figura 19. Panel frontal.
- Figura 20. Alarma de nivel en el tanque.
- Figura 21. Control proporcional.
- Figura 22. Control proporcional integral.
- Figura 23. Control proporcional integral derivativo.
- Figura 24. Partes del control
- Figura 25. Sistema de control de nivel
- Figura 26. Curva de porcentaje de apertura Vs nivel del tanque
- Figura 27. Respuesta del sistema a un step
- Figura 28. Error en el sistema

Figura 29. Error del sistema Vs Posición de la válvula

Figura 30. Evolución del error del sistema

Figura 31. Transformada de Laplace de funciones más usuales

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Rugosidad promedio para algunas superficies.

Tabla 2. Velocidades típicas de líquidos en tuberías comerciales.

Tabla 3. Conversión de velocidad del agua

Tabla 4. Características del Agua.

Tabla 5. Pérdidas por fricción en tubería

Tabla 6. Pérdidas por fricción en codos de 90 grados

Tabla 7. Caudal máximo y diámetro de diferentes válvulas.

Tabla 8. Comportamiento de la válvula

Tabla 9. Datos de porcentaje de apertura, presión y caudal de la válvula.

Tabla 10. Pérdidas en la Válvula.

## RESUMEN GENERAL DE TESIS DE GRADO

**TITULO:** MÓDULO VIRTUAL PARA CONTROL DE NIVEL Y FLUJO DE AGUA.

**AUTORES:** CESAR LUIS GARCÍA MARIN  
JUAN ELISEO ESTUPIÑÁN GUTIÉRREZ

**FACULTAD:** FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

En este proyecto se implementó una plataforma de software que sirve como módulo virtual para el laboratorio de control de procesos de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

La Universidad en el programa académico de ingeniería electrónica, ofrece formación teórica desarrollada en las aulas de clases y formación práctica desarrollada en los laboratorios que dispone la universidad. La Virtualización de las prácticas de laboratorio permite, en este caso, total disponibilidad tanto para el estudiante como para el profesor y esto lo facilita el módulo virtual desarrollado en este proyecto.

El módulo virtual permite controlar dos variables de control comunes en el campo industrial como lo son el nivel y el flujo. Además permite implementar diferentes estrategias de control. En esta primera versión se deja implementado el control PID (*proportional integral diferencial*), uno de los más utilizados en la industria.

Para lograr la Virtualización de un sistema de nivel y flujo, se tomó como base el módulo de control de nivel y flujo que posee la universidad, *PROCON SERIE 3800*, ubicado en el laboratorio de control. El módulo virtual se desarrolló en LABVIEW y MATLAB como plataformas de programación.

### **Palabras Claves:**

Virtualización, Control de Nivel, Control de Flujo, PID, Labview, Matlab.

## **ABSTRACT OF THESIS PROJECT**

**TITLE:** VIRTUAL MODULE FOR LEVEL AND WATER FLOW CONTROL

**AUTHORS:** CESAR LUIS GARCIA MARIN  
JUAN ELISEO ESTUPIÑAN GUTIERREZ

**DEPARTMENT:** ELECTRONIC ENGINEERING

In this project to control level and flow a software platform was implemented. This platform serves as a virtual module for process control laboratory of the Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

The University's academic program in electronic engineering, offers theoretical training developed in the classroom and practical training in the university laboratories. Labs Virtualization allows total availability for both the student and the teacher and the virtual module developed in this project goes in this direction.

The module can control two virtual control variables common in the industrial field such as the level and flow. It also allows implementing different control strategies. In this first version was implemented PID control (proportional integral differential), one of the most widely used in industry.

The developed virtual platform was based on the module level and flow control that owns the university, PROCON SERIES 3800, located in the control laboratory. The virtual module of this project was developed in LABVIEW and MATLAB as programming platforms.

### **KEY WORDS:**

Virtualization, level control, flow control, PID, Labview, Matlab.

# INTRODUCCIÓN

## PRESENTACIÓN

La finalidad de este Modulo Virtual es introducir nuevas metodologías de aprendizaje en varios campos de la ingeniería utilizando nuevas herramientas de programación gráfica que constituyen lo que se conoce como instrumentación virtual. De hecho, no sólo se pretende cubrir un vacío que hay actualmente en la formación de los estudiantes en este campo realmente innovador sino que, yendo un poco más lejos, presenta diversas posibilidades de aplicación en el ámbito académico que pueden generar alternativas en el desarrollo de proyectos docentes convencionales.

Entendiendo la instrumentación virtual como un entorno de programación gráfico que nos permite el control y la simulación de cualquier instrumento local o remoto y, a su vez, como una herramienta potente de adquisición y procesado de señales, su utilización no queda exclusivamente limitada a las disciplinas electrónicas, sino que puede hacerse extensiva a otras especialidades; Podríamos pensar que la instrumentación electrónica se limita a los instrumentos clásicos de un laboratorio electrónico: multímetros, osciloscopios, generadores de señal, etc., pero actualmente cualquier laboratorio adelantado, ya sea mecánico, físico, químico o de otras actividades relacionadas con la investigación o la ingeniería, presenta instrumental con un componente electrónico muy importante.

La vinculación de la educación con la tecnología ha ampliado las oportunidades para transformar y mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje. En la enseñanza de la ingeniería, especialmente en el área de laboratorios, el problema de la rapidez del cambio tecnológico adquiere especial relevancia y se refiere a lo siguiente: ¿cómo suministrar a los estudiantes experiencias significativas, actualizadas, con recursos limitados? El alto costo de los equipos sigue siendo una limitación, especialmente en los países subdesarrollados. Una solución a este problema es emplear en los laboratorios técnicas de

enseñanza y aprendizaje basadas en computadoras personales, en los cuales se reemplacen equipos convencionales por computadoras, instrumentos virtuales y sistemas de adquisición de datos, que permitan a los estudiantes hacer adquisición, procesamiento y control de señales físicas en tiempo real a costos menores.

*Aunque la instrumentación virtual, por su mismo concepto, se aplica al diseño de laboratorios soportados en computadoras, desde el punto de vista de aplicaciones de software se desarrollan programas para simular procesos o experimentos, en los cuales el estudiante se encuentra en contacto solo con una computadora en un proceso de aprendizaje. Schär y Krueger (2000) mencionan igualmente que la simulación interactiva puede demostrar las situaciones que ocurren en el mundo real; es una herramienta flexible y desde el punto de vista pedagógico, apoya la concepción del aprendizaje constructivista por cuanto está centrada en el alumno como sujeto de su propio aprendizaje, y por lo tanto protagonista de su propia construcción. Señalan también que tal método coloca la iniciativa y el control en las manos de los estudiantes. Coincidiendo con esta propuesta, Johansson, Gäfvert y Åström (1998) por un lado, y Wittenmark, Haglund y Johansson (1998) por otro, han desarrollado módulos de enseñanza en el campo de la teoría de los sistemas de control y el control de procesos por computadora respectivamente, utilizando varios software, entre ellos Matriz X y Matlab.*

*Los autores han afirmado que estos módulos permiten a los estudiantes estudiar los distintos aspectos de un tema de la teoría de control o del control de procesos por computadora.*

*Reemplazar los instrumentos tradicionales por instrumentos virtuales que se ejecutan en computadoras, permite que las funciones de los mismos vayan a la par del desarrollo de las nuevas tecnologías de las computadoras, cuyos costos siguen una tendencia decreciente.*

*Los laboratorios son un elemento clave en la formación integral y actualizada de un ingeniero.*

*No se puede concebir un ingeniero que no haya realizado prácticas de laboratorio en su trayectoria de formación inicial. Los avances tecnológicos de los últimos años han abierto posibilidades para cambiar la estructura rígida de los laboratorios tradicionales, por una estructura flexible que se apoya en las computadoras, circuitos de acondicionamiento, hardware de adquisición de datos y software. Constituyen todos estos elementos la plataforma sobre la cual se desarrolla la instrumentación virtual. Se puede afirmar que, cada año, aumenta el número de universidades que se acogen a esta propuesta de laboratorios virtuales. [1]*

### **El software en la instrumentación virtual**

El software es el componente más importante de un instrumento virtual. Con la herramienta de software apropiada los ingenieros y científicos pueden crear eficientemente sus propias aplicaciones, diseñando e integrando las rutinas que requiere un proceso en particular. También pueden crear las interfaces de usuario que mejor satisfagan el objetivo de la aplicación y de aquéllos que van a interactuar con ellas. Pueden definir cómo y cuándo la aplicación adquiere datos desde el dispositivo, cómo los procesa, manipula y almacena los datos y cómo se presentan los resultados al usuario.

Contando con un software poderoso, se puede dotar a los instrumentos con capacidades de inteligencia y de toma de decisiones de manera tal que se adapten cuando las señales medidas varíen inadvertidamente o cuando se requiera mayor o menor potencia de procesamiento.

Una ventaja importante que provee el software es la modularidad; Cuando se trata de un gran proyecto, los ingenieros y científicos generalmente abordan la tarea dividiéndola en unidades funcionales manejables. Estas tareas divididas son más manejables y más fáciles de probar dadas las menores dependencias que podrían causar comportamientos inesperados. Usted puede diseñar un instrumento virtual para solucionar cada una de estas tareas subsidiarias y luego reunir las en un sistema completo para resolver la tarea de mayor

envergadura. La facilidad con la cual usted puede realizar esta división de tarea depende en mayor medida de la arquitectura subyacente en el software.

### **¿Por qué Labview es la herramienta ideal para crear instrumentos virtuales?**

Labview es una parte integral de la instrumentación virtual dado que provee un medio ambiente de desarrollo de aplicaciones que es fácil de utilizar y está diseñado específicamente teniendo en mente las necesidades de ingenieros y científicos. Labview ofrece poderosas características que facilitan la conexión a una gran variedad de hardware y otro software.

### **Reducción de costos y preservación de la inversión**

El modulo virtual es un producto versátil dado que usted puede utilizar una sola computadora equipada con Labview para innumerables aplicaciones y propósitos. No sólo es versátil sino también extremadamente efectivo desde el punto de vista del costo. La instrumentación virtual con Labview demuestra ser económica, no sólo por los reducidos costos de desarrollo sino también porque preserva la inversión del capital a lo largo de un extenso período. A medida que cambian sus necesidades, usted puede fácilmente modificar los sistemas sin necesidad de adquirir nuevo equipamiento y crear bibliotecas enteras de instrumentación a costo menor que el correspondiente a un solo instrumento comercial tradicional.

## **PROCON (ENTRENADOR PARA PROCESOS DE CONTROL)**

### **INTRODUCCIÓN AL PROCON 38**

El sistema PROCON de las serie 38 es un paquete muy completo relacionado con todos los aspectos sobre sistemas de control. Este incluye un dispositivo para el control, monitoreo e interface, un controlador industrial estándar, un manual de acompañamiento y un programa. El programa presenta una parte teórica, unos objetivos y preguntas relacionadas con cada práctica. También entrega graficas y mediciones de los resultados en tiempo real, usando el

computador basado en la instrumentación virtual y control automático de procesos cuando este sea necesario.

El programa permite un control externo, y como el desarrollo práctico y su conocimiento acerca de procesos de control aumentan; el computador podrá tomar la función de controlador y los distintos algoritmos de control pueden ser construidos y evaluados, de este modo todos los aspectos del control industrial moderno pueden ser experimentados e investigados.

El proceso de control es una rama de la ingeniería de control, que trata sobre la operación de las plantas en la industria, como petroquímicas, alimentos, acero, vidrio, papel y energía.

La serie 38 de PROCON es un completo paquete de temas tratados en el control de procesos. El cual lo introducirá a equipos industriales estándar, cubriendo todos los aspectos del uso de los equipos (tanto de uso general como específico en el proceso de control). Cada parte del equipo es investigada particularmente, por lo que su uso es comprendido y su posición en el proceso de control es apreciado. [2]

## MOTIVACIÓN

Actualmente para realizar las prácticas de control de nivel y caudal de agua, el laboratorio de control dispone únicamente de un módulo. Algunos de los componentes de este equipo fabricado por Feedback tienen problemas, el mayor es el desengranaje de los piñones del motor de la servo válvula. Esto ha generado problemas de disponibilidad de este módulo, ocasionando problemas al profesor y a los estudiantes en el momento de realizar los laboratorios en clase. Adicionalmente, como sólo hay un equipo de estos, únicamente un grupo de 3 estudiantes en cada clase de laboratorio puede realizar las prácticas asignadas al módulo de nivel y caudal. Otros inconvenientes es la difícil y costosa compra de partes o piezas que suelen dañarse, la teoría del módulo está en inglés y el soporte dado por ellos es muy deficiente, por otro lado las partes del mismo son obsoletas y no es fácil conseguirlas y comprarlas.

Debido a todos esos inconvenientes se optó por desarrollar un módulo virtual con características similares al módulo real PROCON, donde se pudieran desarrollar por medio de laboratorios, los métodos de control aprendidos. Al generalizar esta propuesta se obtendrá una interacción de todos los estudiantes para el manejo del módulo y la realización de dichas prácticas. Además de poder integrar al módulo gráficas de comportamiento del tipo de control que se está realizando, la cual no era posible visualizar en el módulo real.

En general el estudiante tendrá la capacidad de operar el módulo real, entendiendo el funcionamiento completo desde el módulo virtual.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 GENERAL**

Implementar un módulo virtual para el control de las variables de nivel de agua en un tanque y control de caudal de agua que se desplaza por una tubería y entra a un tanque.

### **1.2 ESPECÍFICOS**

1. Aplicar la técnica de control Proporcional Integral Diferencial (PID) a la planta de nivel y caudal del módulo virtual que se implementa.
2. Desarrollar el mímico de la planta PROCON SERIE 3800.
3. Obtener el modelo matemático del sistema y su función de transferencia.
4. Realizar prueba general y ajustes al módulo virtual.
5. Desarrollar el software asociado para la práctica en el laboratorio.
6. Escribir artículo para la revista puente de la universidad y socializar el proyecto con profesores y estudiantes de la universidad.

## **2. MÓDULO VIRTUAL PARA CONTROL DE NIVEL Y FLUJO DE AGUA.**

### **2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL**

En este proyecto se crea, para el laboratorio de control de procesos, un módulo virtual en una plataforma de software (Labview), para el control de nivel de un tanque y control de caudal del agua de alimentación a un tanque.

Se pretende alcanzar una gran similitud entre el módulo real PROCON y el módulo virtual. Para ello se hace un análisis completo del módulo real, se adquirieron medidas de longitudes de tubería, diámetro de la tubería y accesorios, área del tanque de almacenamiento donde se hace el control de nivel, sensor de nivel, datos de la servo válvula a implementar y de las válvulas manuales.

Con todos los datos necesarios se desarrolló el modelado matemático respectivo que describe las partes del módulo real y se realizó la interfaz gráfica con la programación respectiva al tipo de control a realizarse en el proceso de dicho módulo, teniendo en cuenta el tipo de material utilizado, pérdidas por fricción en la tubería y en los accesorios, caudales máximos en bomba sumergible y tablas de porcentaje de caudal según apertura de servo válvula y válvulas manuales.

## **2.2. TUBERÍA**

Las tuberías son el medio usual utilizado en el transporte de fluidos, compresibles e incompresibles, en los procesos industriales y en las aplicaciones de la vida cotidiana. Los materiales de las tuberías y sus accesorios son variados, su escogencia depende del tipo de fluido y las condiciones en que se transportará, la presión y temperatura de diseño, del medio ambiente en que se instalará, etc.; es decir dependen de la aplicación específica del sistema. Entre los materiales metálicos se encuentran los aceros maleables, al carbono o inoxidable, las aleaciones de níquel, titanio y circonio. Algunos materiales no metálicos utilizados son el asbesto-cemento, grafito impermeable, concreto no reforzado, vidrio y una gran variedad de plásticos como polietileno, policloruro de polivinilo y polipropileno. [3,4]

### **Propiedades del acero inoxidable**

El acero inoxidable es una aleación de hierro y carbono que contiene por definición un mínimo de 10,5% de cromo. Algunos tipos de acero inoxidable contienen además otros elementos aleantes. Los principales son el níquel y el molibdeno. Es un tipo de acero resistente a la corrosión, el cromo que contiene posee gran afinidad por el oxígeno y reacciona con él formando una capa pasivadora que evita la corrosión del hierro contenido en la aleación. Sin embargo, esta película puede ser afectada por algunos ácidos dando lugar a un ataque y oxidación del hierro por mecanismos ínter granulares o picaduras generalizadas.

Punto de fusión: 398°C

Ventajas de la tubería de acero inoxidable:

- Con su propiedad sanitaria e inocua para el medio ambiente, la tubería de acero inoxidable mantiene la buena calidad del agua, sin contaminar a la salud humana. Puede ser utilizado para todo tipo de aguas, sin necesidad de un control adicional del agua. No corrupto, ausencia de

fugas, no huele, no turbio; características reciclables completa llega a ser verde tubería para el desarrollo continuo

- Soportable a la corrosión, aplicable a todo tipo de transporte de las aguas.
- Resistente a altas temperaturas, que funciona bien bajo condiciones de temperatura de 135 grados centígrados. Resistente a la presión alta como para ser 10.0 MPa o superior.
- Baja resistencia del agua causada por su pared interior lisa, hace que fluya más rápido el agua (normalmente 0,4 veces de los tubos de acero al carbono).
- Tubería de acero inoxidable desde hace mucho tiempo la vida laboral, con excelentes propiedades químicas y físicas, mientras más de 100 años (por lo general el medio ambiente en menos de 1.6Mpa, inferior a 135 grados centígrados).
- No infiltración, gracias a su estructura molecular compacta, anti-oxidación, no dejando espacio para las bacterias dentro de la tubería.

### Rugosidad

La rugosidad ( $\epsilon$ ) es un parámetro importante que describe el desnivel promedio que presenta la tubería respecto al diámetro interno tabulado. Se ha encontrado que el parámetro de rugosidad depende del material de cada tubería, y del tiempo en uso de la misma (en la tabla 1 se muestran valores típicos de la rugosidad de una tubería) [5].

TUBERÍA	ESTADO	$\epsilon$ RECOMENDADO (MM)
ACERO COMERCIAL	Nuevo	0.045
	Ligeramente Oxidado	0.3
	Oxidado	2
HIERRO	Forjado	0.045
	Colado	0.3
	Galvanizado	0.15
	Capa de asfalto	0.15
VÍDRIO O PLÁSTICO		0.002
CAUCHO	Lisa	0.01
	Reforzada	1

**Tabla 1.** Rugosidad promedio para algunas superficies.

Los límites usuales para las velocidades de ciertos líquidos se resumen en la *tabla 2*.

FLUIDO	VELOCIDAD SUGERIDA (ft/s)	MATERIAL DE LA TUBERIA	FLUIDO	VELOCIDAD SUGERIDA (ft/s)	MATERIAL DE LA TUBERIA
Amoniaco Líquido	6	Acero	Tricloroetileno, Estireno, Cloruro de Vinilo, Percloroetileno	6	Acero
Cloruro de Calcio	4	Acero	Agua de aliment. a la caldera Agua de mar	3-8	Acero
Tetracloruro de Carbono	6	Acero		4-12	Acero
Propilenglicol	5	Acero		5-8	Acero revestido
Hidróxido de Sodio	6 (0-30%NaOH) 5 (30-50%NaOH) 4 (50-73%NaOH)	Acero y Níquel	Ácido Sulfúrico	4 (88- 93% $H_2SO_4$ ) 4 (93-100% $H_2SO_4$ )	Acero Cast Iron

**Tabla 2.** Velocidades típicas de líquidos en tuberías comerciales.

Velocidad (ft/s)	Velocidad (m/s)
<b>1</b>	0.3048
<b>3</b>	0.9144
<b>8</b>	2.4384

**Tabla 3.** Conversión de velocidad del agua

### Factor de fricción

El factor de fricción es un número adimensional, definido por la ecuación 1 que representa el cociente entre el esfuerzo cortante en la pared y las fuerzas de inercia. La funcionalidad de dicho factor depende estrictamente del tipo de régimen de flujo. [5,7].

A efectos prácticos, se ha graficado en escala logarítmica, el factor de fricción vs. Reynolds, en el diagrama de Moody, teniendo en cuenta la rugosidad y el diámetro de la tubería ( $\epsilon/D$ ).

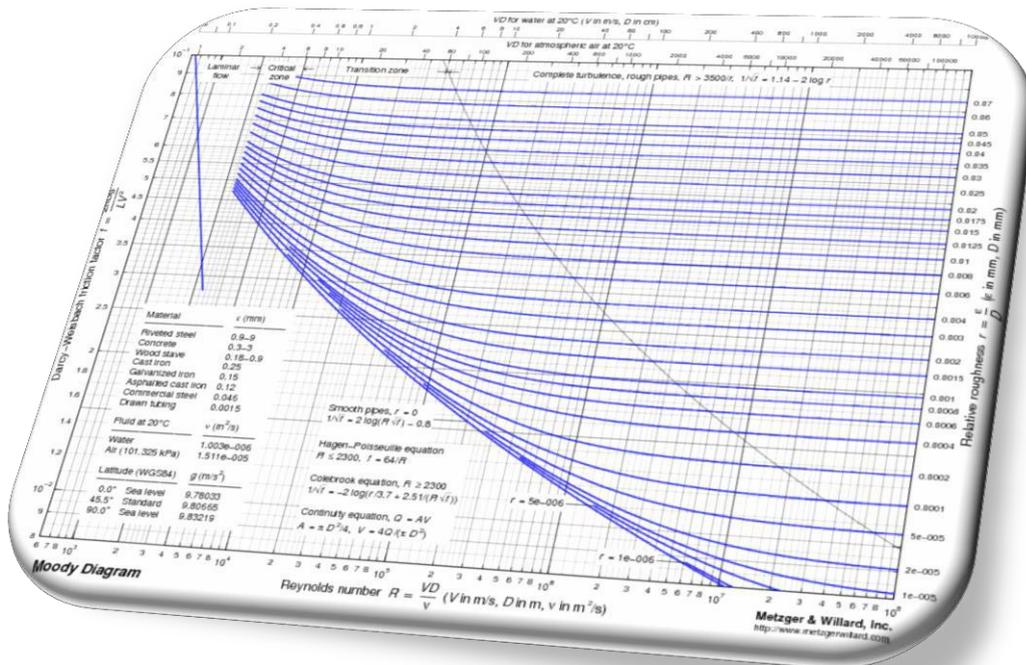


Figura 1. Diagrama de Moody.

### Ecuaciones de Darcy

La ecuación de Darcy-Weisbach es una ecuación ampliamente usada en hidráulica y mecánica de fluidos. Permite el cálculo de la pérdida de carga debida a la fricción dentro una tubería.

Donde:

$f$  = factor de fricción de Darcy- Weisbach

$L$  = Longitud del tubo.

$D$  = Diámetro interno de la tubería.

$V$  = Velocidad media del fluido.

$g$  = Aceleración gravitacional.

Sus características son:

- Fórmula para determinar las pérdidas de energía por fricción.
- Ecuación racional, desarrollada analíticamente aplicando procedimientos de análisis dimensional.
- Derivada de las ecuaciones de la Segunda Ley de Newton.
- Es la fórmula más utilizada en Europa para calcular pérdidas de cabeza.
- La pérdida por fricción está expresada en función de las siguientes variables: longitud de la tubería, velocidad media de flujo (la que se puede expresar también en términos del caudal), diámetro de la tubería y depende también de un factor o coeficiente de fricción  $f$ . [6]

La pérdida de carga continua es directamente proporcional a la velocidad del líquido y a la longitud del tramo de tubería que estamos considerando, e inversamente proporcional a su diámetro.

### **Número de Reynolds**

El número de Reynolds es quizás uno de los números adimensionales más utilizados. La importancia radica en que nos habla del régimen con que fluye un fluido, lo que es fundamental para el estudio del mismo.

El Número de Reynolds permite caracterizar la naturaleza del flujo, es decir, si se trata de un flujo laminar o de un flujo turbulento, además, indica la

importancia relativa de la tendencia del flujo hacia un régimen turbulento respecto de uno laminar y la posición relativa de este estado dentro de una longitud determinada. [7]

Los diferentes regímenes de flujo y la asignación de valores numéricos de cada uno fueron reportados por primera vez por Osborne Reynolds en 1883. Reynolds observó que el tipo de flujo adquirido por un líquido que fluye dentro de una tubería depende de la velocidad del líquido, el diámetro de la tubería y de algunas propiedades físicas del fluido.

Así, el número de Reynolds es un número adimensional que relaciona las propiedades físicas del fluido, su velocidad y la geometría del ducto por el que fluye y está dado por:

---

Donde:

Re = Número de Reynolds

D = Diámetro interno del ducto

V = Velocidad promedio del líquido

= Densidad del líquido

= Viscosidad del líquido

Cuando el ducto es una tubería, D es el diámetro interno de la tubería.

Generalmente cuando el número de Reynolds se encuentra por debajo de 2100 se sabe que el flujo es laminar, el intervalo entre 2100 y 4000 se considera como flujo de transición y para valores mayores de 4000 se considera como flujo turbulento. Este grupo adimensional es uno de los parámetros más utilizados en los diversos campos de la Ingeniería Química en los que se presentan fluidos en movimiento. [10]

### 2.3. ACCESORIOS

En todo sistema de tuberías se encuentran presentes diversos accesorios con diferentes funciones, entre ellos la de unir piezas de tubo, cambiar la dirección de las líneas de tuberías, modificar el diámetro de la misma, controlar el flujo, unir dos corrientes para formar una tercera, etc.

Las pérdidas por fricción en los accesorios dependen de un factor K, el cual veremos en la figura 2.

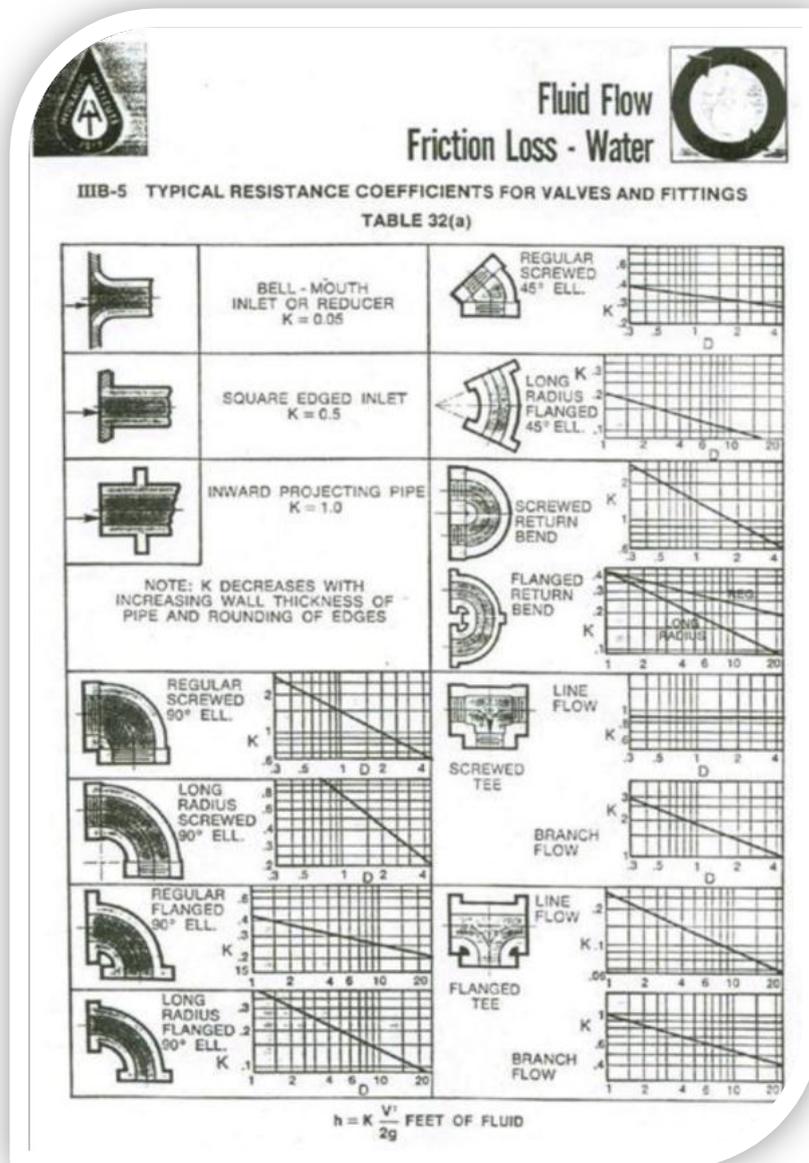


Figura 2. Coeficientes de pérdidas “K” para accesorios.

## 2.4. CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN TUBERÍA Y ACCESORIOS

### Datos Característicos

**L** = Longitud de la tubería (m)

**D** = Diámetro interno de la tubería (m)

**Vel** = Velocidad media del flujo del fluido (m/s)

**Ks** = Rugosidad de la tubería (m)

**Q** = Caudal (m<sup>3</sup>/s)

**A** = Área transversal en m<sup>2</sup> =  $\pi \cdot D^2 / 4$  (m)

**Re** = Número de Reynolds

**Miu** = Viscosidad dinámica del agua (25°C = 0.891 x 10<sup>-3</sup> kg/m\*s) (tablas)

**Ro** = Densidad del agua = 997 kg/m<sup>3</sup> a temperatura ambiente 25 °C

**g** = Gravedad (m/s<sup>2</sup>)

**Ks** = Rugosidad del acero inoxidable (m)

**KsOverD** = Ks/D Relación de rugosidad de la tubería

CARACTERÍSTICAS DEL AGUA							
TEMPERATURA	DENSIDAD	VISCOSIDAD	DILATACION	TEMPERATURA	DENSIDAD	VISCOSIDAD	DILATACION
°C	kg/m <sup>3</sup>	cST	%	°C	kg/m <sup>3</sup>	cST	%
4	1.000	9.85	0.00	50	988	13.56	1.21
5	1.000	9.92	0.00	55	986	14.01	1.44
10	1.000	10.28	0.01	60	983	14.48	1.70
15	999	10.66	0.10	65	981	14.96	1.97
20	998	11.05	0.20	70	978	15.45	2.26
25	997	11.44	0.32	75	975	15.95	2.58
30	995	11.84	0.46	80	972	16.47	2.91
35	994	12.26	0.62	85	968	16.99	3.27
40	992	12.68	0.80	90	965	17.54	3.65
45	990	13.11	0.99	95	961	18.09	4.05

Tabla 4. Características del Agua.

### Cálculos de pérdidas

**D** = Diámetro interno de la tubería (m)

—

Por medio de la rugosidad relativa, que está dada por la rugosidad del material y el diámetro interno de la tubería, se puede hallar gráficamente el factor de fricción.

**$K_s/D$**  = Relación de rugosidad de la tubería

**$K_s$**  = Rugosidad de la tubería (m)

— — —

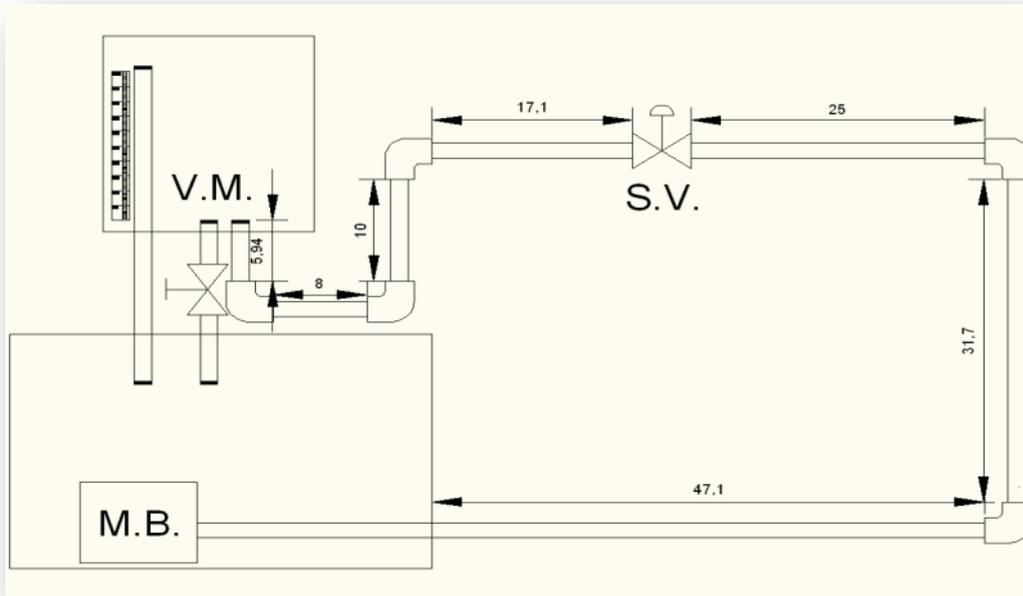
Relación de rugosidad de la tubería = 0.0035

Se determina el número de Reynolds

**$Re$**  = Número de Reynolds

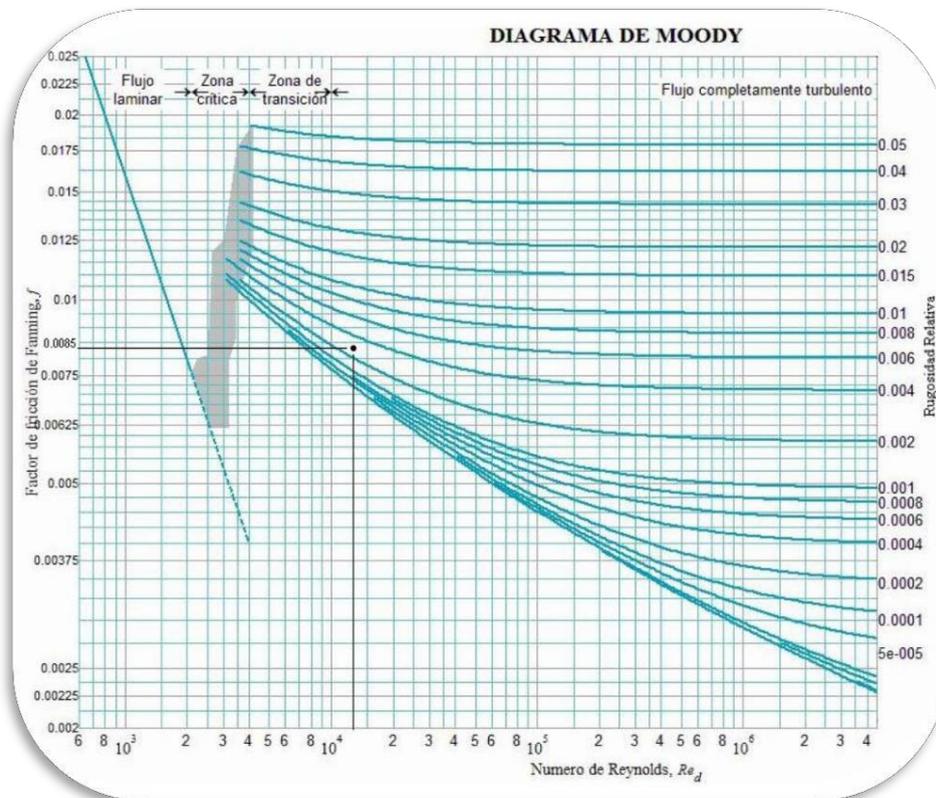
— — —  
— — —

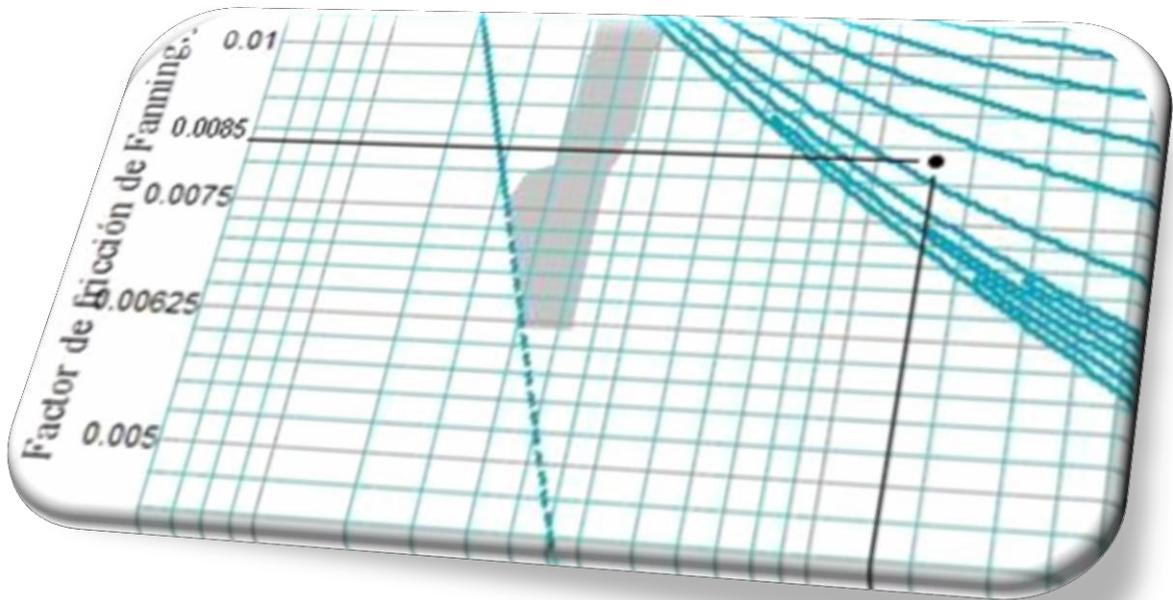
Se define el circuito de flujo del líquido (agua) y las dimensiones de la tubería.



**Figura 3. Circuito de flujo de agua y sus dimensiones.**

Pérdidas de fricción en la tubería mediante la ecuación de Darcy.





**Figura 4. Coeficiente de fricción en tubería, método gráfico.**

Coeficiente de fricción en tubería = 0.00825

Caudal Máximo = Cv = 7 (l/m)

Conversión de litros por minuto (l/m) a metro cúbico por segundo ( $m^3/s$ )

$$\frac{7 \text{ l/m}}{60} = \frac{7}{60} \text{ m}^3/\text{s}$$

Área sección transversal de la tubería = A ( $m^2$ )

$$\text{---}$$

\_\_\_\_\_

### **Velocidad media del fluido**

—

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

### **Longitudes de Tubería de 1/2" antes de la servo válvula**

Longitud 1 = L1 = 0.471m

Longitud 2 = L2 = 0.317m

Longitud 3 = L3 = 0.250m

### **Longitudes de Tubería de 1/2" después de la servo válvula**

Longitud 4 = L4 = 0.171m

Longitud 5 = L5 = 0.100m

Longitud 6 = L6 = 0.080m

Longitud 7 = L7 = 0.0594m

### **Pérdidas en tubería:**

Para hallar las pérdidas en la tubería reemplazamos los datos tramo a tramo en la fórmula 5.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

—

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

—

—

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

—

—

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

—

—

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

—

—

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

—

—

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

—

—

Tramo de Tubería	Pérdida por fricción en tubería (m)
1	0.013241
2	0.008912
3	0.007028
4	0.004807
5	0.002811
6	0.002249
7	0.001670

**Tabla 5. Pérdidas por fricción en tubería**

Estas pérdidas obtenidas se encuentran dimensionadas en metros de agua, las cuales, por conveniencia de unidades serán pasadas a unidades de presión en el software con el fin de tener facilidades de desarrollo matemático.

**Pérdidas en codos:**

Coeficiente de fricción en codo de 90 grados = 2.1 (ver figura 2)



Codos	Pérdida por fricción en codos de 90 grados (m)
1	0.090879
2	0.090879
3	0.090879
4	0.090879
5	0.090879

**Tabla 6. Pérdidas por fricción en codos de 90 grados**

Relación de pérdidas antes de la servo válvula = P1

Relación de pérdidas después de la servo válvula = P2

## **2.5. VÁLVULAS**

En la regulación de los distintos procesos de una planta industrial tendrán un papel fundamental las válvulas. Con ellas se podrá controlar los caudales de las distintas corrientes implicadas en el proceso, además de las condiciones internas de presión de depósitos y recipientes.

Una válvula consiste básicamente en un cuerpo principal dentro del cual van alojados el obturador y los asientos, elementos que me definirán el paso de fluido permitido en cada momento. El obturador consiste en un mecanismo móvil que varía su posición con respecto al asiento, siendo el caudal de paso directamente proporcional a la superficie libre existente entre el embolo y el asiento. Por su diseño deberá acoplar perfectamente sobre el asiento para proporcionar un cierre hermético cuando la válvula esté cerrada. El movimiento del obturador estará comandado por un vástago al que es solidario, siendo este el elemento donde físicamente se actúa para controlar la posición del obturador. Su movimiento podrá ser lineal o rotativo dependiendo del diseño de la válvula.

Cabe decir que el cuerpo de la válvula debe estar realizado en un material resistente, capaz de resistir la presión máxima posible en la línea a la vez que garantiza la hermeticidad del dispositivo. El cuerpo de la válvula deberá estar dotado de algún elemento, tal como bridas o rosca, para su conexión a la línea.

Esta clase de válvulas se utilizará para realizar el control de caudal, presión, etc. de las distintas corrientes de proceso.

El mecanismo básico de funcionamiento de estos elementos será la regulación del caudal de paso controlando la posición relativa del obturador respecto al asiento. La forma y mecanismo mediante el cual se materializa el movimiento del obturador son los que nos definen los distintos tipos de válvulas existentes. Dentro de este grupo de válvulas encontraremos diversos tipos dependiendo de su diseño constructivo. Las características de asiento, obturador y movimiento de este último nos determinarán los posibles servicios a los que pueden ser dedicados cada tipo de válvula.

### **2.5.1. VÁLVULA MANUAL**

Las válvulas manuales exigen la acción directa del usuario sobre ellas para efectuar su regulación. El obturador es movido por la misma fuerza ejercida por el operador, existiendo diversos mecanismos de transmisión de la fuerza como pueden ser reductores, trenes de engranajes, etc. a través de los cuales se transforma la acción humana en una variación de la posición del obturador. Este tipo de válvula exige la presencia física de un operador en el equipo para su regulación. Debido que no es posible su accionamiento remoto estas válvulas no admiten su uso como elementos finales de regulación de un sistema de control de procesos.

Las válvulas de accionamiento manual se usarán en líneas donde no sea necesario una regulación frecuente de la corriente para mantener y controlar el régimen del proceso.

Salvo excepciones, en una planta de proceso industrial las válvulas manuales se utilizan únicamente como elementos de bloque de líneas, ya que las aplicaciones donde se requiere la modulación de la corriente de paso se recurre a válvulas automáticas.

Con el objeto de poder aislar líneas o zonas del circuito de una instalación se instala una serie de válvulas manuales que servirán para bloquear la línea cuando ello sea necesario. Existen situaciones donde por razones de seguridad es necesario garantizar la circulación o el bloqueo de una línea, surgiendo así las válvulas CSO y CSC. Estas se caracterizan por encontrarse selladas, imposibilitando así su manipulación incontrolada. Cuando sea necesario bloquear o abrir la línea, según los casos, se tendrá que romper el precinto de la válvula y tras su manipulación se deberá de nuevo precintarse y sellar.

- Válvulas CSO (*Car Seal Open*). Este tipo de válvula se instala en líneas donde se debe asegurar que la válvula se encuentre abierta permitiendo el paso libre de corriente por la línea.
- Válvulas CSC (*Car Seal Close*). Estas válvulas se usan en conducciones donde se requiere que la línea esté cerrada y un cambio de posición de la válvula implicaría una situación de riesgo.



07387-22

**Figura 5. Válvula manual**

## 2.5.2. VÁLVULA DE CONTROL

Las válvulas de control son los elementos finales de control más usuales y se les encuentra en las plantas de proceso, donde manejan flujos para mantener en los puntos de control las variables que se deben controlar. En esta sección se hace una introducción a los aspectos más importantes de las válvulas de control para su aplicación al control de proceso.

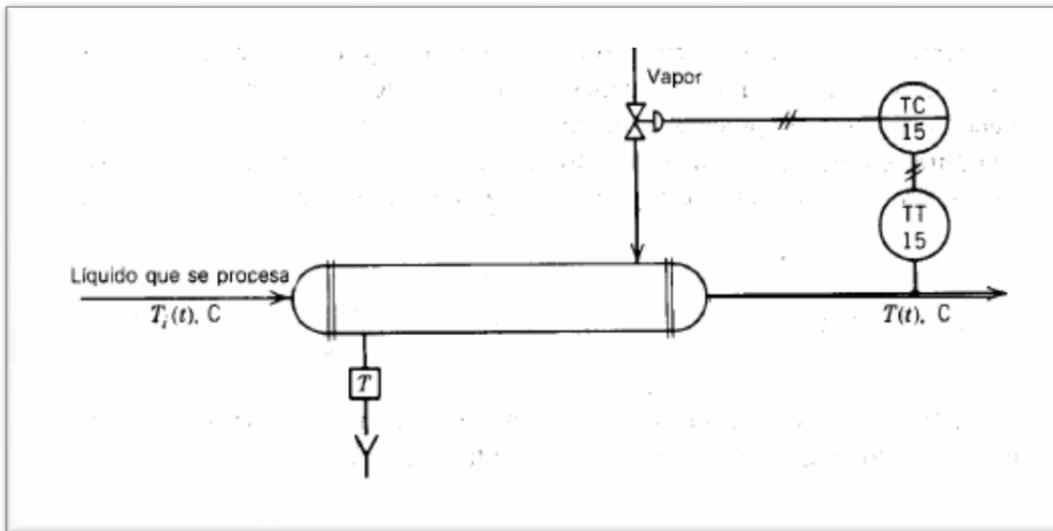
La válvula de control actúa como una resistencia variable en la línea de proceso; mediante el cambio de su apertura se modifica la resistencia al flujo y, en consecuencia, al flujo mismo. Las válvulas de control no son más que reguladores de flujo.

En esta sección se presenta la acción de la calcula de control (en condición de falla), su dimensionamiento y sus características. [9]

### **Funcionamiento de la Válvula de Control**

La primera pregunta que debe contestar el ingeniero cuando elige una válvula de control es: ¿Cómo se desea que actúe la válvula cuando falla la energía? La pregunta se relaciona con la “posición en falla” de la válvula y el principal factor que se debe tomar en cuenta para contestar esta pregunta es, o debe ser, la seguridad. Si el ingeniero decide que por razones de seguridad la válvula se debe cerrar, entonces debe especificar que se requiere una válvula “cerrada en falla” (CF); la otra posibilidad es la válvula “abierta en falla” (AF); es decir, cuando falle el suministro de energía, la válvula debe abrir paso al flujo. La mayoría de las válvulas de control se operan de manera neumática y, consecuentemente, la energía que se les aplica es aire comprimido. Para abrir una válvula cerrada en falla se requiere energía y, por ello, también se les conoce como válvulas de “aire para abrir” (AA). Las válvulas abiertas en falla, en las que se requiere energía para cerrarlas se conoce también como de “aire para cerrar” (AC). Enseguida se verá un ejemplo para ilustrar la forma de elegir la acción de las válvulas de control; este es el proceso en la figura 5-1, en el la

temperatura a la que sale el fluido bajo proceso se controla mediante el manejo del flujo de vapor al intercambiador de calor.



**Figura 6. Circuito de control para intercambiador de calor [15]**

La pregunta es: ¿Cómo se desea que opere la válvula de vapor cuando falla el suministro de aire que le llega?

Como se explicó anteriormente, se desea que la válvula de vapor se mueva a la posición más segura; al parecer, esta puede ser aquella con la que se detiene el flujo de vapor. Es decir, no se desea flujo de vapor cuando se opera en condiciones inseguras, lo cual significa que se debe especificar una válvula cerrada en falla. Al tomar tal decisión, no se toma en cuenta el efecto de no calentar el líquido en proceso al cerrar la válvula; en algunas ocasiones puede que no exista problema alguno, sin embargo, en otras se debe tener en cuenta. Considere, por ejemplo, el caso en que se mantiene la temperatura de cierto polímero con el vapor; si se cierra la válvula de vapor, la temperatura desciende y el polímero se solidifica en el intercambiador; en este ejemplo, la decisión puede ser que con la válvula abierta en falla se logra la condición más segura.

Es importante notar que en el ejemplo solo se tomo en cuenta la condición de seguridad en el intercambiador, que no es necesariamente la más segura en la operación completa; es decir, el ingeniero debe considerar la planta completa en lugar de una sola pieza del equipo; debe prever el efecto en el intercambiador de calor, así como en cualquier otro equipo del que provienen o al cual van el vapor y el fluido que se procesa. En resumen, el ingeniero debe tomar en cuenta la seguridad en la planta entera. [10]

### **Dimensionamiento de la válvula de control**

El dimensionamiento de la válvula de control es el procedimiento mediante el cual se calcula el coeficiente de flujo de la válvula,  $C_v$ ; el “método  $C_v$ ” tiene bastante aceptación entre los fabricantes de válvulas; lo utilizó por primera vez la Masoneilan international, INC, en 1944. Cuando ya se calculo el  $C_v$  requerido y se conoce el tipo de válvula que se va a utilizar, el ingeniero puede obtener el tamaño de la válvula con base en el catalogo del fabricante.

El coeficiente  $C_v$  se define como *“la cantidad de agua en galones U.S. que fluye por minuto a través de una válvula completamente abierta, con una caída de presión de 1 psi en la sección transversal de la válvula.”* Por ejemplo, a través de una válvula con coeficiente máximo de 25 deben pasar 25 gpm de agua, cuando se abre completamente y la caída de presión es de 1 psi.

A pesar de que todos los fabricantes utilizan el método  $C_v$  para dimensionamiento de válvulas, las ecuaciones para calcular  $C_v$  presentan algunas diferencia de una fabricante a otro. La mejor manera de proceder es elegir el fabricante y utilizar las ecuaciones que recomienda; en esta sección se presentan las ecuaciones de dos fabricantes, *Masoneilan y Fisher controls*, para mostrar las diferencias entre sus ecuaciones y métodos. Las mayores diferencias se presentan en las ecuaciones para dimensionar las válvulas utilizadas con fluidos que se comprimen (gas, vapor o vapor de agua). Los dos fabricantes mencionados no son, de ninguna manera, los únicos, en la tabla 5-1 se dan los nombres y direcciones de algunos otros, esta no es exhaustiva, pero proporciona al lector los nombres de cierta cantidad de compañías que se

dedican a la fabricación de válvulas de control. Se eligió a Mazonearan y Fisher controls porque sus ecuaciones y métodos son típicos en la industria.

**Tabla 5-1. Fabricantes de válvulas de control.**

Jamesbury Corporation	640 Lincoln Street Worcester, MA 01605
Jenkins Brothers	101 Merritt Seven Norwalk, CO 06851
Jordan Valve	407 Blade Street Cincinnati, OH 45216
Crane Company	300 Park Avenue New York, NY 10022
DeZurik	250 Riverside Avenue, North Sartell, MN 50377
Fisher Controls Company	P.O. Box 190 Marshalltown, IA 50158
Masoneilan International	63 Nahatan Street Norwood, MA 02062
Honeywell	1100 Virginia Drive Fort Washington, PA 18034
Copes-Vulcan, Inc.	Martin and Rice Avenues Lake City, PA 14623
Valtek	P.O. Box 2200 Sprinville, UT 84663
The Duriron Company, Inc.	1978 Foreman Drive Cookeville, TN 38501
Cashco, Inc.	P.O. Box A Ellsworth, KS 67439
The Foxboro Company	Foxboro, MA 02035

**Figura 7. Fabricantes más conocidos.**

Utilización con líquidos. La ecuación básica para dimensionar una válvula de control que se utiliza con líquidos es la misma para todos los fabricantes:

—  
—

O se despeja Cv

—  
—

Donde:

q= Flujo de líquidos en gpm U.S.

= Caída de presión (P1-P2), en psi en la sección transversal de la válvula.

P1= Presión de entrada a la válvula, en psi.

P2= Presión de salida de la válvula, en psi.

= Gravedad específica del líquido a la temperatura en que fluye, para agua =1 a 60°F.

Algunas veces las unidades de flujo se dan en lbm/hr, en estos casos las ecuaciones y se pueden escribir como sigue:

—

Y

=====

Donde:

W= Flujo del líquido en lbm/hr.

Existen otras consideraciones, tales como correcciones de viscosidad, de vaporización instantánea y de cavitación, en la elección de las válvulas de control que se utilizan los líquidos. [11]

### **Selección de la válvula.**

Según las especificaciones requeridas para obtener una similitud entre el Modulo Virtual y el Modulo Real, se determino utilizar el siguiente cuerpo de válvula:



**Figura 8. Válvula EV210B 10B**

MODELO: EV210B 10B

FABRICANTE: DANFOSS

VIAS: 2/2

CONEXIÓN: NPT

CARACTERISTICAS:

- Para aplicaciones industriales severas, como control y dosificación.
- Para agua, aceite, aire comprimido y fluidos neutros similares.
- Rango de caudal de agua hasta de 7 L/min y una presión diferencial de 0 a 18 psi.
- Viscosidad de hasta 50 cSt.
- Temperatura ambiente hasta 80°C.
- Protección de la bobina de hasta IP 67.
- Conexión roscada de ½”.

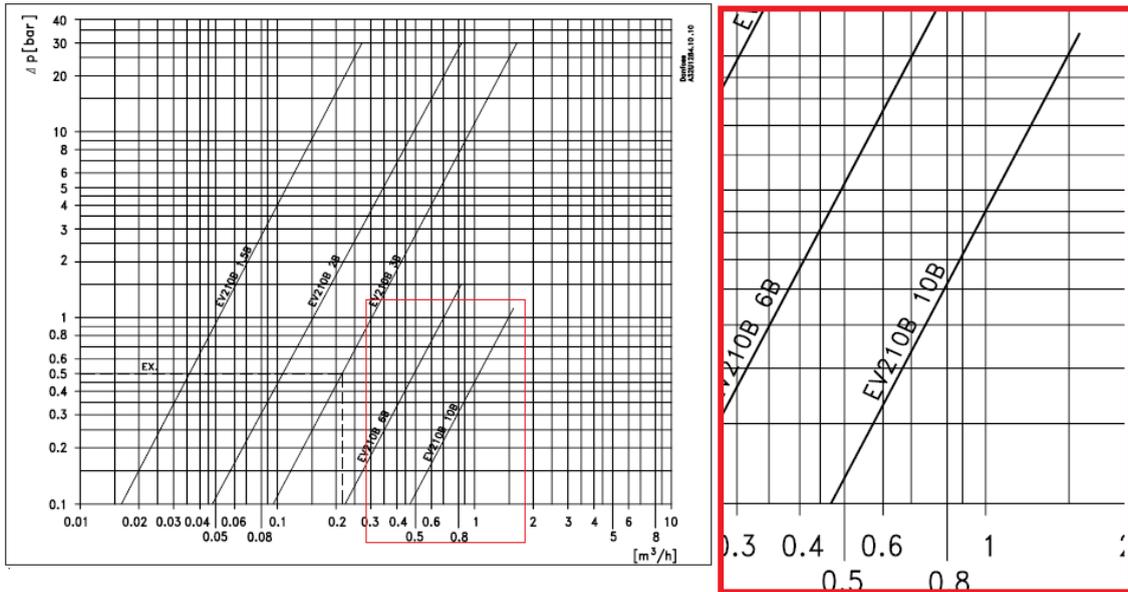


Figura 9. Comportamiento de la válvula

Apertura [%]	Caudal [L/min]	vp
0	0	0
10	2	0,1
20	3,34	0,2
30	3,9	0,3
40	4,7	0,4
50	5,5	0,5
60	5,9	0,6
70	6,25	0,7
80	6,5	0,8
90	6,75	0,9
100	7	1

Tabla 7. Datos de porcentaje de apertura, caudal y Vp de la válvula.

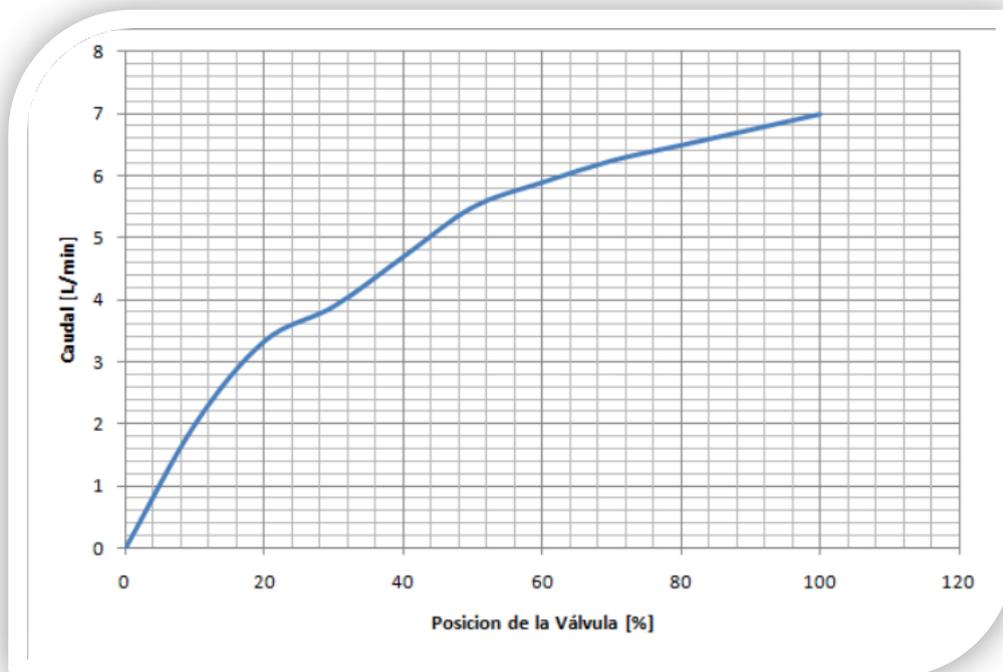
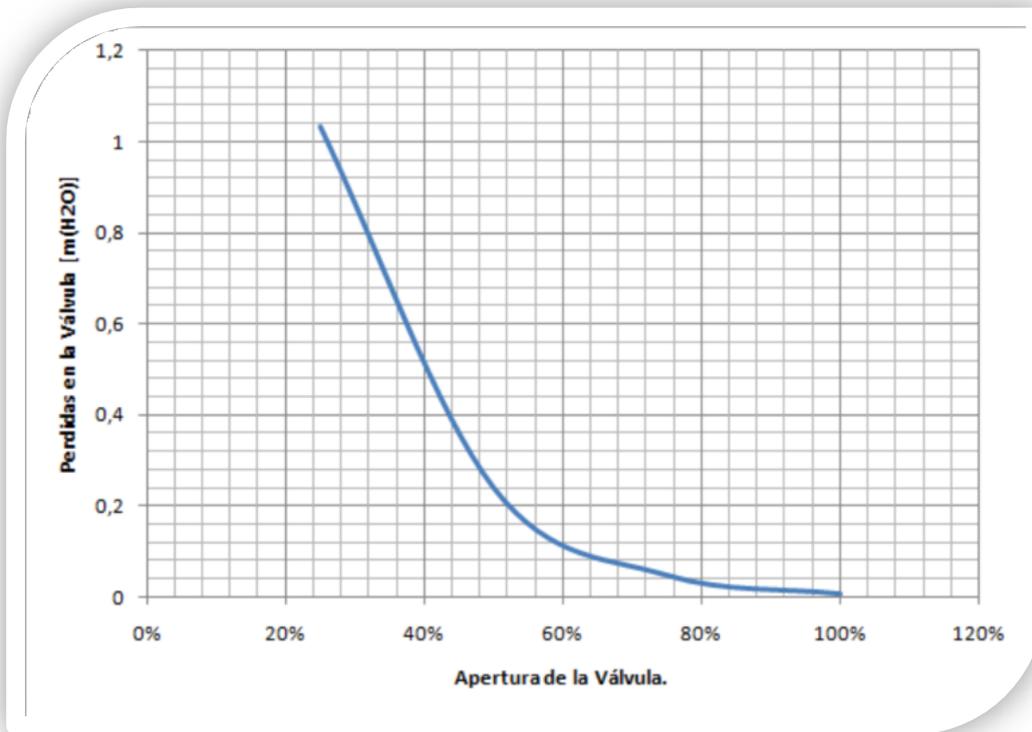


Figura 10. Caudal Vs. Porcentaje de apertura de la válvula.

Apertura [%]	Factor de perdida	Perdida [m(H2O)]	V*V	Gravedad
10%	50	2,152891739	0,84820048	9,82
25%	24	1,033388035	0,84820048	9,82
50%	5,6	0,241123875	0,84820048	9,82
75%	1,15	0,04951651	0,84820048	9,82
100%	0,2	0,008611567	0,84820048	9,82

Tabla 8. Pérdidas en la válvula.



**Figura 11. Pérdidas Vs. Posición de la válvula.**

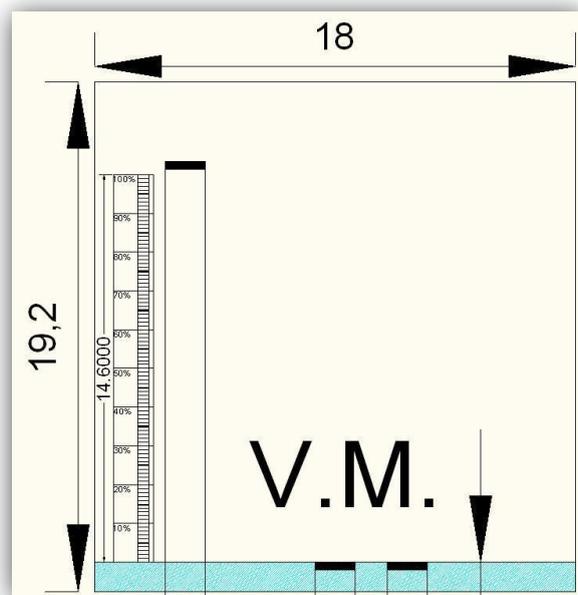
## 2.6. TANQUE DE ALMACENAMIENTO

El tanque de almacenamiento es donde se visualizará el nivel controlado según las especificaciones deseadas por el usuario. Dicho tanque de dimensiones largo=0.18m, ancho=0.113m y de alto=0.192m, con capacidad para albergar 0.00296964 metros cúbicos de agua.

Dicha capacidad de agua está dada por la capacidad máxima en el nivel a controlar dentro del tanque. Aunque tendría una capacidad superior ya que existe un espacio en el fondo del tanque donde nivela a 0% y en la parte superior después del 100% para poder visualizar un control en dicho valor.

El tanque posee 3 terminales de tubería en la parte inferior del tanque los cuales son:

- Entrada de líquido al tanque
- Salida de líquido en 0% por medio de la válvula manual
- Salida de líquido en la parte superior del tanque, por encima del 100% para evitar el rebose de agua en el tanque.



**Figura 13. Dimensiones y características del tanque**

## 2.7. BOMBA SUMERGIBLE

En muchas ocasiones el sistema al cual se necesita acoplar una bomba existe con anterioridad, y el trabajo se reduce a conocer y entender bien las características del mismo, para así poder determinar satisfactoriamente la bomba necesaria para poder cumplir con los requerimientos del proceso.

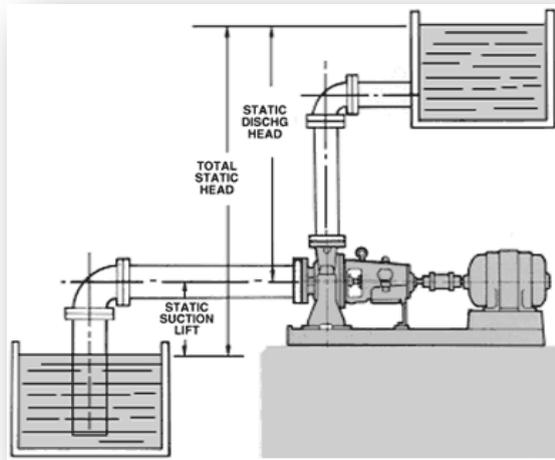
Asumiendo que se debe concebir el sistema para que satisfaga las necesidades del proceso, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Caudal requerido.
- Cabeza requerida (este aspecto está fuertemente influenciado por las características del sistema).
- Fluido a bombear.
- Temperatura del fluido.

La característica de un sistema está dada por la curva de cabeza-caudal, la cual está dada por dos componentes; la cabeza estática total, TSH, (Fija. Independiente del caudal manejado) y la Cabeza Dinámica, CD, (Variable. Dependiente del caudal manejado).

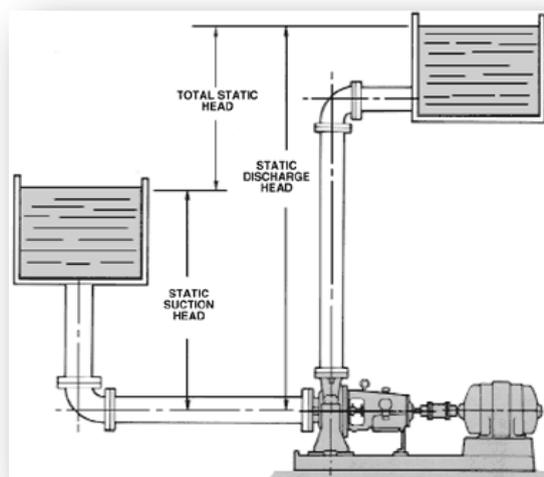
Esta Cabeza Estática Total (TSH) se determina físicamente sobre el sistema, y generalmente se dan las dos configuraciones siguientes:

- La bomba se encuentra por encima del nivel de succión (Fig.13).
- La bomba se encuentra por debajo del nivel de succión (Fig.3).



**Figura 13. Bomba por encima de la succión**

En este caso la Cabeza Estática Total (TSH) es la suma de la Elevación de Succión Estática (SSL), más la Cabeza Estática de Descarga (SDH).



**Figura 14. Bomba por debajo de la succión**

En este caso la Cabeza Estática Total (TSH) es la diferencia entre la Cabeza Estática de Descarga (SDH), menos la Cabeza Estática de Succión (SSH).

La Cabeza Dinámica es variable, ya que depende de varios factores, como son; caudal manejado por el sistema (velocidad de flujo), las características físicas de la tubería (diámetro y rugosidad) y la viscosidad del fluido (es función de la temperatura), forma general de la línea (accesorios y válvulas).

Dicha cabeza cuantifica las pérdidas de energía que se generan por fricción en la tubería, y cambios de dirección (o obstrucciones) producto de las válvulas y los accesorios.

- Para calcular las pérdidas por fricción en la tubería se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach:

—

- Para calcular las pérdidas por accesorios y válvulas se utiliza el método de Coeficiente de Resistencia K. Con la siguiente ecuación:

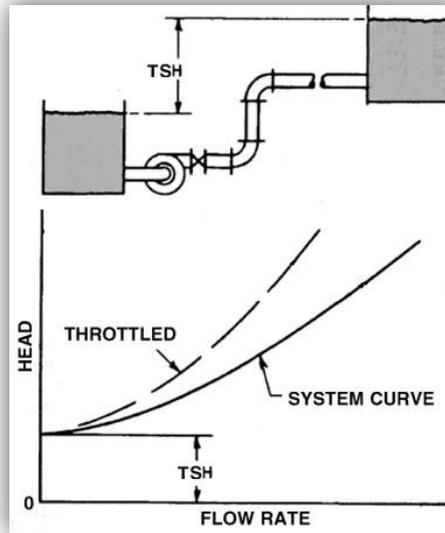
—

Así la cabeza dinámica es igual a la suma de las dos expresiones anteriores.

— —

— —

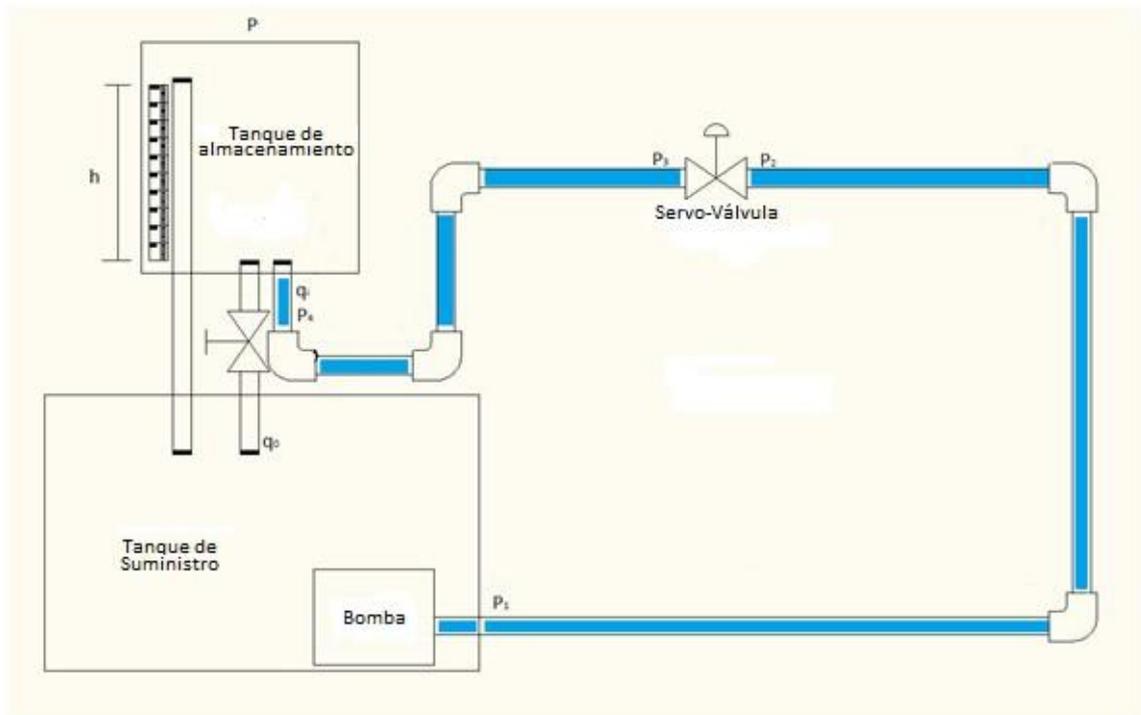
Ahora, la característica total del sistema está dada por (Fig. 15):



**Figura 15. Característica H-Q del sistema**

Ahora, ya que está determinado el comportamiento del sistema dependiendo del caudal manejado, revisaremos las características de la bomba, para así elegir la bomba más apropiada.

### 3. DESARROLLO MATEMÁTICO DEL SISTEMA



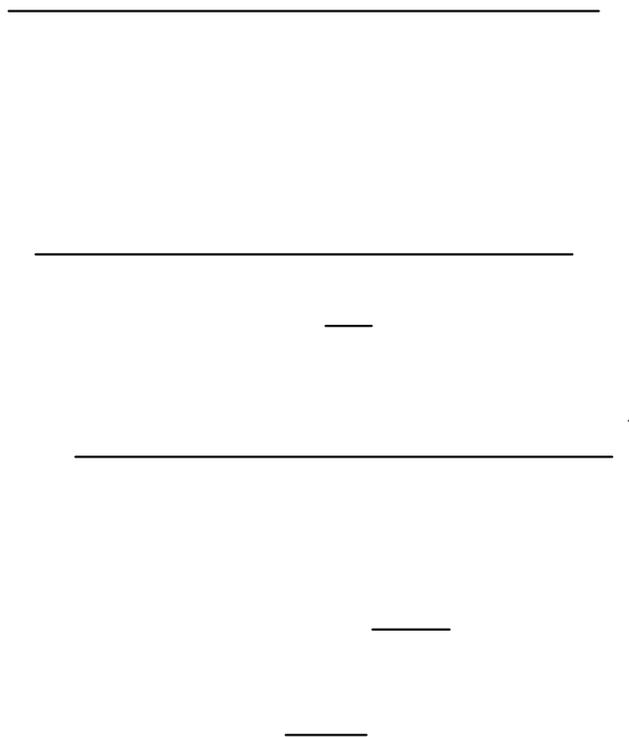
**Figura 16. Diagrama utilizado para desarrollo matemático del sistema**

En estas ecuaciones se toma como despreciables las pérdidas a través de la tubería ya que estas pérdidas se tendrán en cuenta en la variación de presión en cada uno de los puntos de referencia ( $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  y  $P_4$ ).

La relación que se desea es posible obtenerla a partir de un balance de masa de estado dinámico alrededor del tanque:

(h) del tanque

tanque y la bomba



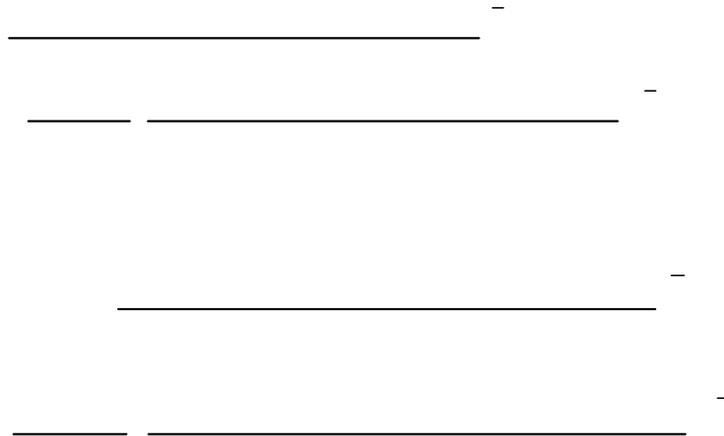
Como la ecuación 10 es independiente de la densidad puede estar en  $lpm$ ,  $A$  en  $in^2$  y  $h$  en  $in$  (pulgadas)

Linealizando la ecuación 1 se tiene:

$$\text{---} \quad \text{---}$$

Apertura de la válvula en  $ss$  (*estado estacionario*)

Altura de nivel en el tanque en ss (*estado estacionario*)



G=Gravedad específica. (Para el agua G=1)

La ecuación 1 linealizada es:

Reemplazando 12 en 10

\_\_\_\_\_

En estado estacionario ó estado estable:

Ecuación 13 – Ecuación 14

\_\_\_\_\_

Se definen las siguientes variables de desviación, es decir la desviación con respecto a su valor en estado estable.

**(16)**

, son los valores de las variables en estado estable, entonces cuando el sistema opera en estado estable

Reemplazando 16 en 15

\_\_\_\_\_

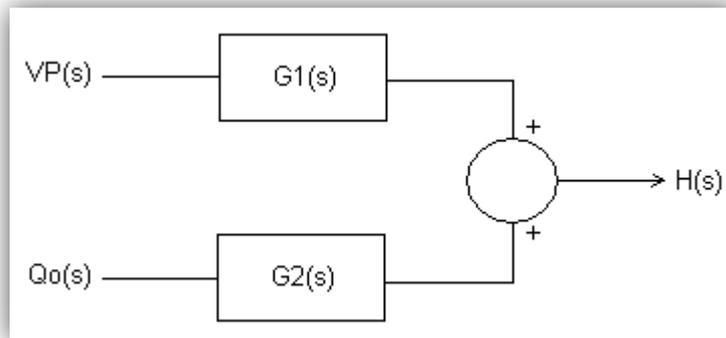
Obtenemos nuestra ecuación H(S) en función de la posición de la válvula y el caudal de salida.

$$\frac{\text{_____}}{\text{_____}} = \frac{\text{_____}}{\text{_____}}$$

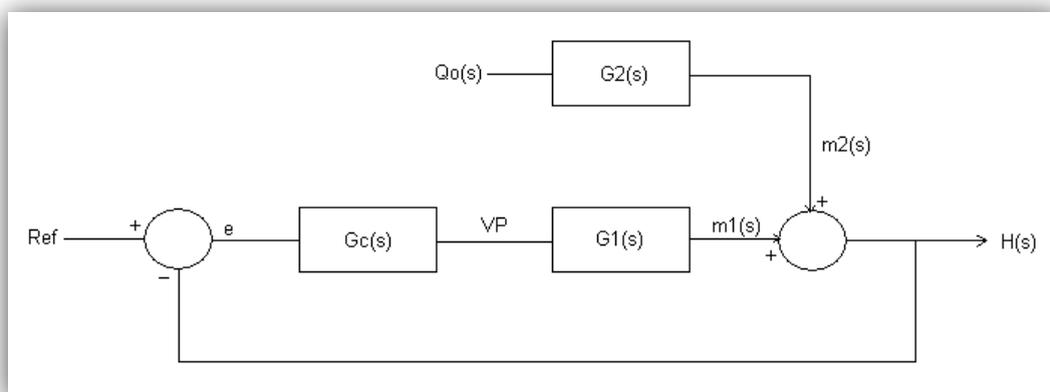
Para facilidad de notación en la ecuación final de la función de transferencia, realizamos el siguiente reemplazo de elementos.

$$\frac{\text{_____}}{\text{_____}} = \frac{\text{_____}}{\text{_____}}$$

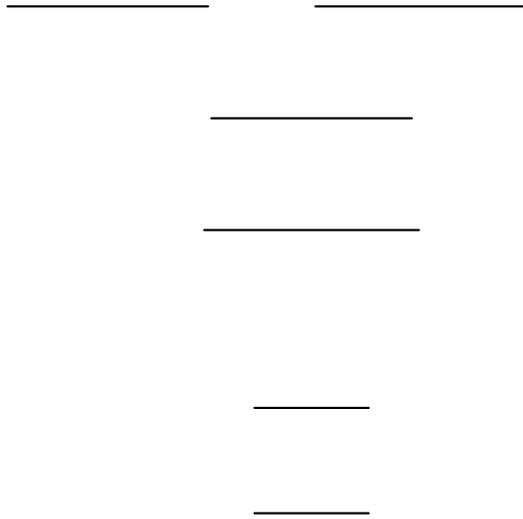
Y obtenemos las dos funciones de transferencia del sistema.



La configuración del sistema con un controlador  $G_c(s)$  para la servo válvula es la siguiente:



Como el sistema es lineal hay superposición de las respuestas por Ref y  $Q_o(s)$ . Ambas son variables de desviación con respecto al valor en estado estable.



Los siguientes son análisis de los casos críticos del sistema con el fin de observar el comportamiento del sistema:

1. Sistema en lazo abierto con válvula de salida cerrada, es decir  $Q_o=0$  y la servo válvula en cualquier posición de apertura

El nivel debe empezar a aumentar



Del balance de masa se tiene



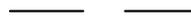
Si

Si está en —



A en  $\text{cm}^2$  y h en cm

Pasando a Laplace



Ahora en función de  $VP(t)$



2. Qué pasa si el tanque está en un determinado nivel  $H_{\text{barra}}$ , se cierra la servo válvula  $q_i(t)=0$  y se deja abierta la válvula de salida siendo  $q_o(t) = \text{ctte} = 1 \text{ lpm}$ .



Si

Si está en —



A en  $\text{cm}^2$  y h en cm

Pasando a Laplace

Ajuste de unidades de las ecuaciones.

Si Cv está en  $\frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$  las unidades de:

$$\frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \cdot \frac{\text{s}}{\text{cm}^2} = 1$$

Área en ft<sup>2</sup>  
H en ft  
q en gpm  
Cv en \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

De la ecuación 9

\_\_\_\_\_

C1=0.9811  
C2=3.1058  
As=0.2131  
Área del tanque en ft<sup>2</sup>  
Cv en \_\_\_\_\_  
H del tanque en ft

\_\_\_\_\_

### Ecuación 10

La ecuación 11 es válida si H en ft, A en ft<sup>2</sup> y Cv en \_\_\_\_\_

Si se da Cv en \_\_\_\_\_

Área en cm<sup>2</sup>

H en cm



Capacidad del tanque:  $(18 \times 11 \times 15) \text{cm}^3 = 2970 \text{cm}^3$



Con 7 lpm la altura cambia:



La altura cambia:



15 cm con  $Q=7\text{ lpm}$ , se llena el tanque en 25.5 seg ó 0.42 min.

#### **4. DESARROLLO DE SOFTWARE**

Este módulo virtual se desarrolla en dos ambientes de programación distintos.

En MATLAB se desarrolla toda la parte matemática del sistema y en LABVIEW es donde se implementa la parte gráfica y el proceso de control del sistema.

Ambos programas utilizados son de gran importancia en el desarrollo del módulo ya que se agilizan los procesos de desarrollo matemático y modelamiento del sistema.

## 4.1 PLATAFORMA EN LABVIEW

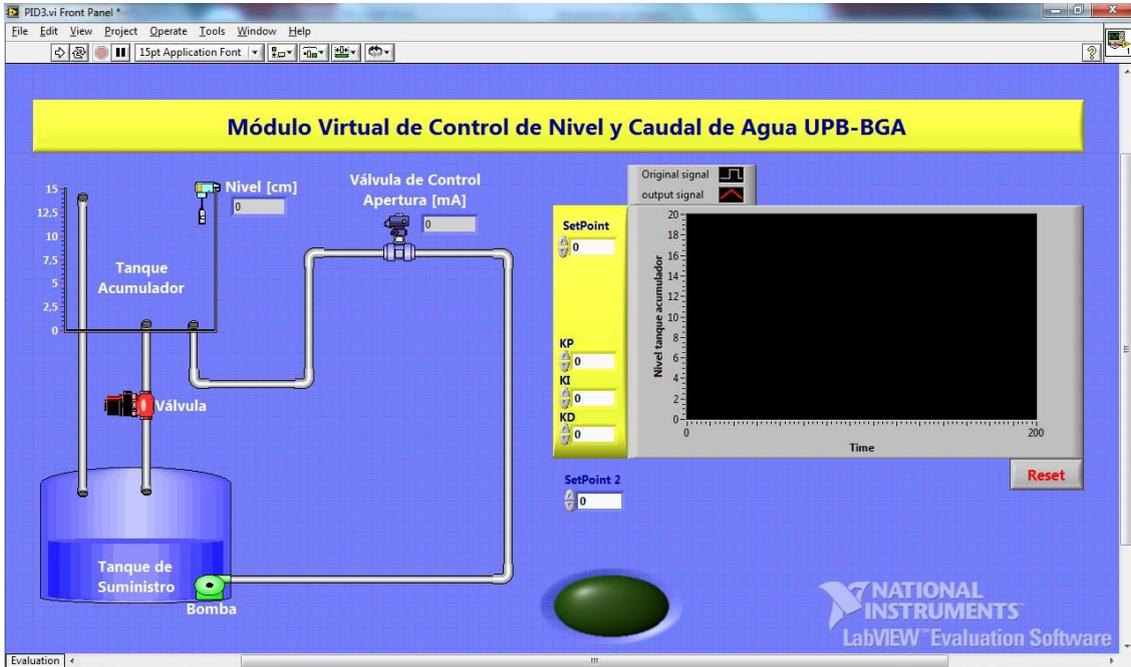


Figura 17. Interfaz Gráfica

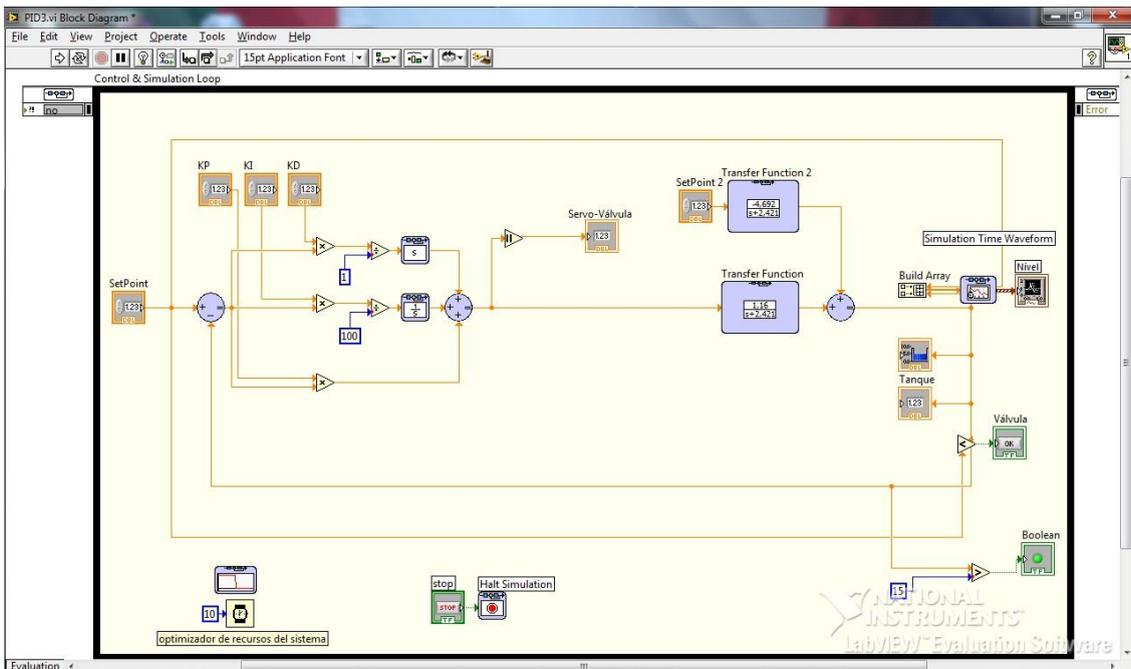


Figura 18. Interfaz de Programación Gráfica

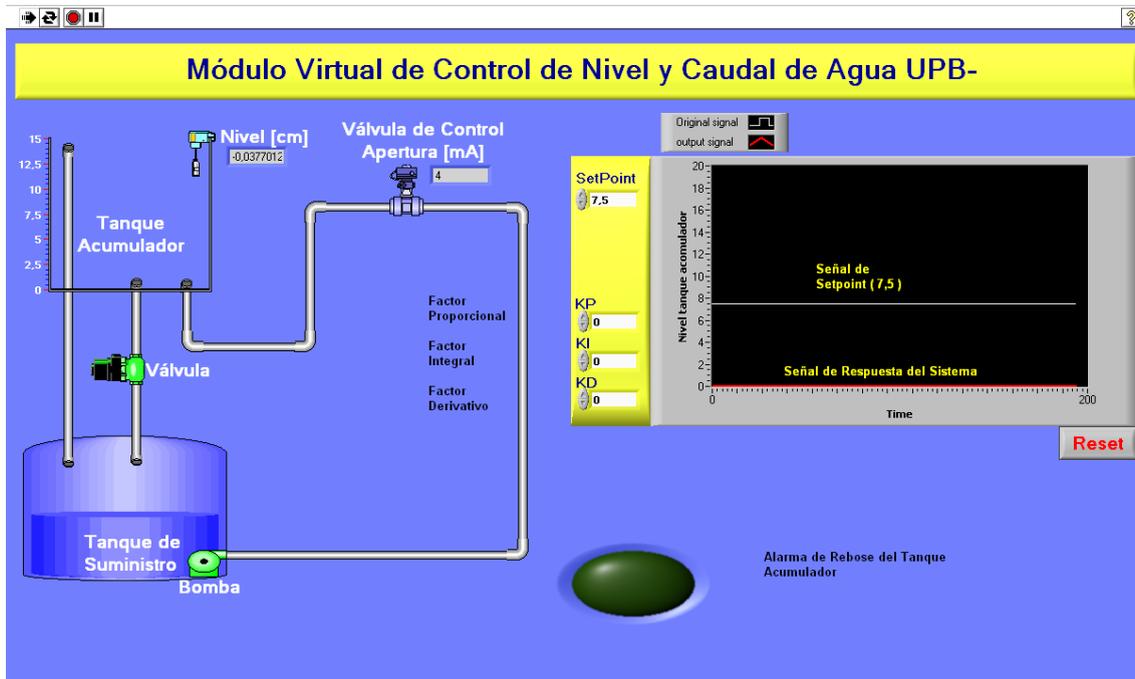


Figura 19. Panel Frontal

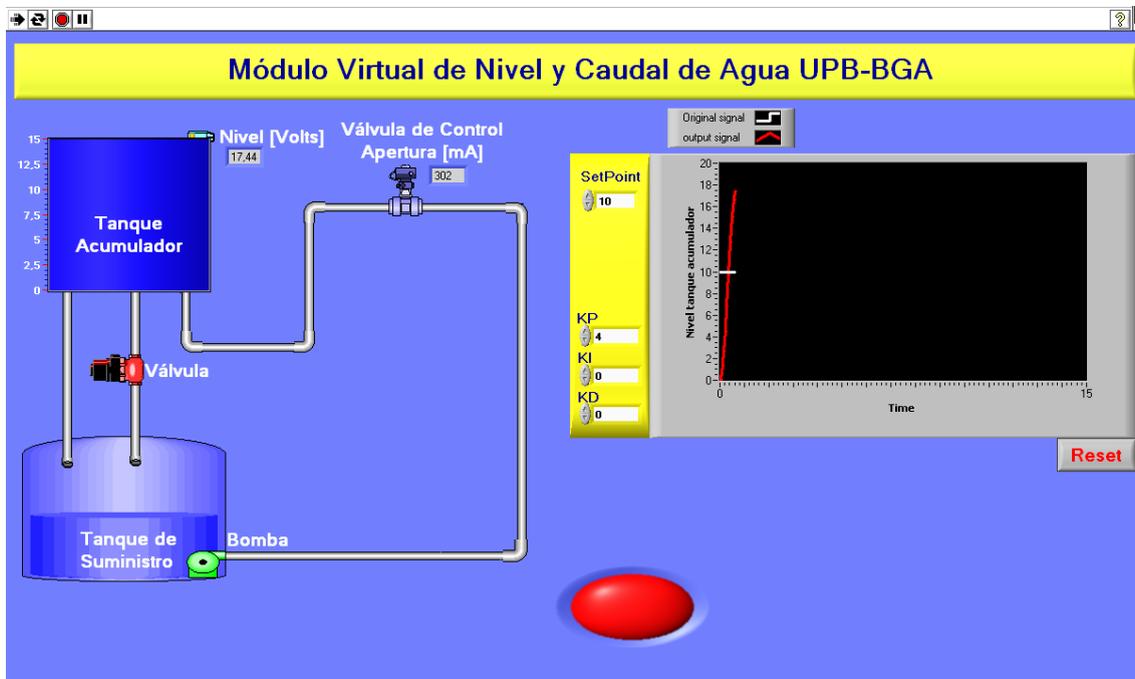


Figura 20. Alarma de nivel en el Tanque

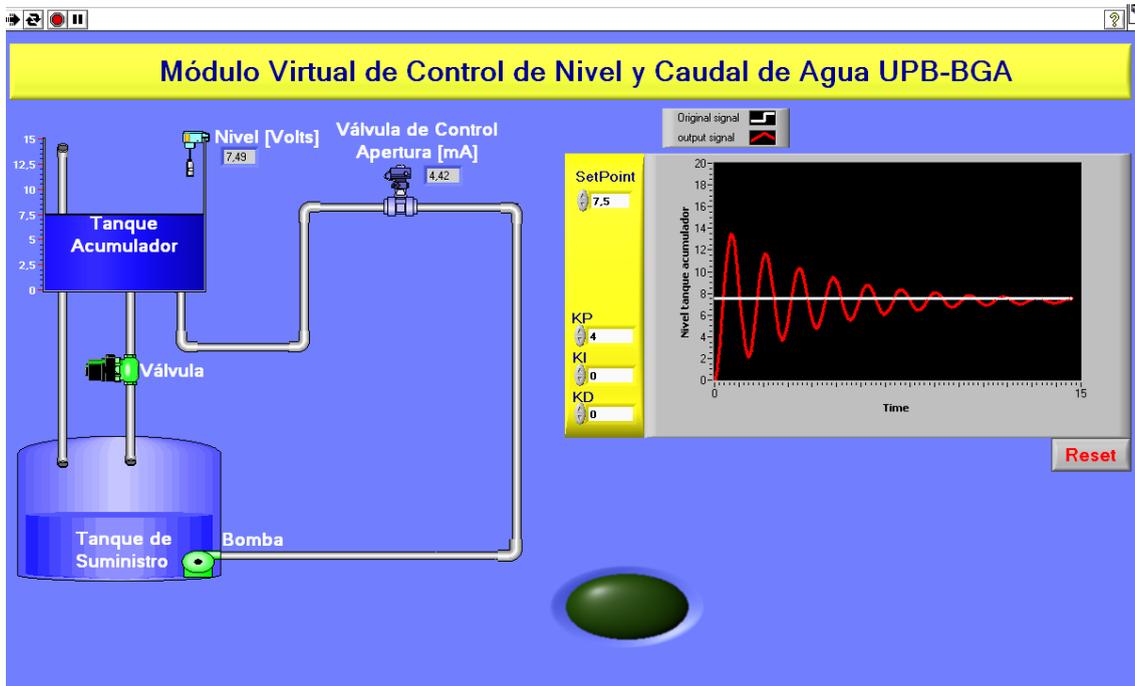


Figura 21. Control Proporcional

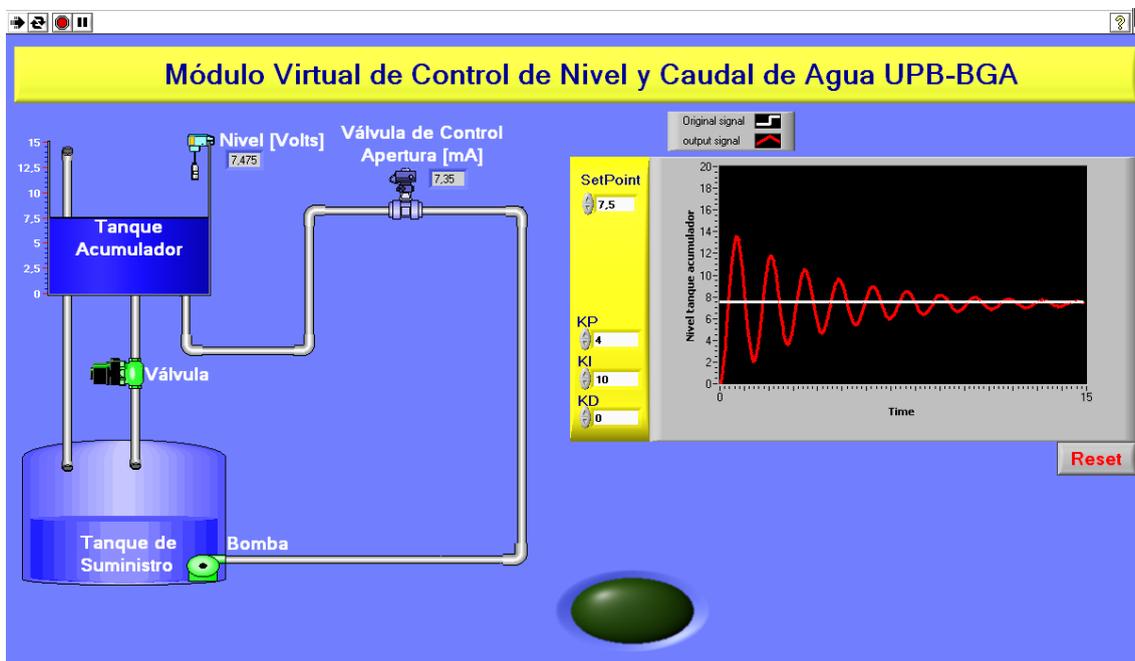
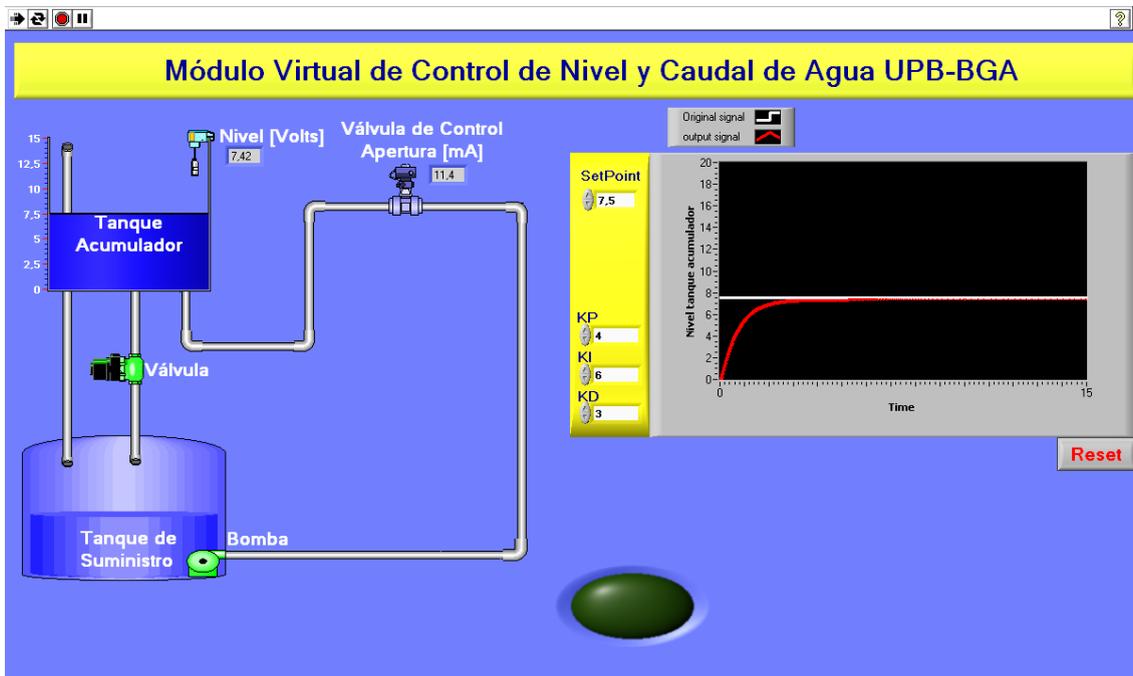


Figura 22. Control Proporcional Integral



**Figura 23. Control Proporcional Integral Derivativo**

El módulo virtual proporciona una interfaz de gran similitud con el módulo real de control de nivel y caudal de agua PROCON, donde se puede observar el tanque de suministro de agua que abastece la bomba sumergible, los ductos de la tubería, la servo válvula de control, el tanque acumulador y el sensor de nivel tipo flotador.

A diferencia del módulo real, en el módulo virtual se podrá apreciar la gráfica real de la respuesta del sistema, según su setpoint y la variación de sus constantes proporcional, integral y derivativa.

Posee una alarma que indica el rebose en el tanque acumulador, que se activará cuando se sobrepase el nivel máximo permitido en este tanque.

La interfaz gráfica sólo se utilizará para suministrarle al sistema su setpoint y las constantes del controlador, ya que todo el desarrollo matemático de pérdidas en tubería, cabeza de la bomba y control de la servo válvula estará dado en las funciones de transferencia indexadas en la programación gráfica del mismo panel.

## 5. CONCLUSIONES

- Con el desarrollo e implementación del módulo virtual de control de nivel y caudal de agua, se dará una solución parcial al desarrollo de los laboratorios de control que se hacían en el módulo real y que por fallas en sus mecanismos no se encontraba disponible en la mayoría del tiempo.
- Se implementaron cuatro prácticas en las cuales se puede identificar y emplear los tipos de control Proporcional, Proporcional Integral y Proporcional Integral Derivativo; también una primera práctica en la que se familiariza al estudiante con el módulo virtual.
- El desarrollo matemático de todo el sistema del módulo virtual, es el agregado más importante de nuestra tesis de grado, ya que en este desarrollo se encuentran las similitudes con el módulo real, en las longitudes de las tuberías, diámetros y material de las mismas, de los accesorios con los cuales se hallaron las pérdidas por fricción en tuberías, accesorios y la servo válvula, para llegar a una respuesta de control similar al modulo real.
- Se da gran importancia a la aplicación de Ingeniería en el desarrollo de modelamiento matemáticos de sistemas de control.
- Se pudo demostrar con el desarrollo del modelado matemático del sistema, que dicho lazo de control debe ser realimentado, es decir en lazo cerrado, ya que al modelar el mismo sistema en lazo abierto, por más que el desarrollo matemático se encuentre bien, se verán perturbaciones en la salida del sistema.
- Se pretende impulsar la incorporación de la instrumentación virtual al plan de estudio de la ingeniería electrónica, ya que nos permite elevar la calidad del proceso de enseñanza y aprendizaje por las siguientes razones:

Permite la creación de ambientes de aprendizaje en los cuales los estudiantes están en contacto con problemas de ingeniería del mundo real. Esto contribuye a una mejor comprensión de los conceptos estudiados y a mejorar su preparación profesional con

miras a las demandas del mundo del trabajo, ya que estas tecnologías cada vez son más empleadas en la industria.

Permite disminuir los costos de los laboratorios al reemplazar equipos costosos por instrumentos virtuales que se ejecutan en un PC. Se resuelve el problema de la obsolescencia de los equipos existentes y posibilita mantener al día los laboratorios con los avances de las nuevas tecnologías.

La sencillez conceptual de la programación gráfica facilita su comprensión por parte de los estudiantes, permitiéndoles centrarse en los conceptos y no en arduas tareas de programación, demostrándose así que la instrumentación virtual se nos presenta como un campo para la investigación aplicada, con el objeto de dar respuestas a las demandas de la industria.

- Se realizó un artículo para la revista PUENTE de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga y se socializó el proyecto con estudiantes y profesores.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Rafael Chacón Rúgeles “La Instrumentación virtual en la enseñanza de la ingeniería electrónica”, pp. 80 – 81, 2002

[2] Feedback, “Manual de modulo de control de nivel y flujo procon serie 3800”, 1995

[3] LUDWIG, E. “Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants”. Gulf publishing Company, Tomo 1, pp. 53, 1995

[4] PERRY. “Manual del Ingeniero Químico”, Mc Graw-Hill, Sexta Edición, pp. 5-33, 1997

[5] WILKES. J, “Fluid Mechanics for Chemical Engineers”, Prentice-Hall, pp. 125, 1999

[6]” características de los fluidos” disponible:

<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/flujoentuberias/fricci%C3%B3n/darcy.htm>

[7] “Hydraulic Institute Standards book” disponible: [www.pumps.org](http://www.pumps.org)

[8] CASTELLVI. A “Circulación de agua en tuberías”, Montajes e instalaciones, pp. 208-209, 2000

[9] Carlos A. Smith y Armando B. Corripio, “Control automático de procesos teoría y práctica”, pp. 180, 2004.

[10] Carlos A. Smith y Armando B. Corripio, “Control automático de procesos teoría y práctica”, pp. 180-181, 2004.

[11] Carlos A. Smith y Armando B. Corripio, "Control automático de procesos teoría y práctica", pp. 181-183, 2004.

[12] MAVAINSA, "Control de Procesos", 2011 disponible:  
[http://pastranamoreno.files.wordpress.com/2011/03/control\\_procesos-valvulas.pdf](http://pastranamoreno.files.wordpress.com/2011/03/control_procesos-valvulas.pdf)

[13] Carlos A. Smith y Armando B. Corripio, "Control automático de procesos teoría y práctica", pp. 27-32, 2004.

[14] Colmenares Wilmer, "Series de Taylor y Fourier", instituto universitario de tecnología del estado bolívar, 2010. Disponible:  
<http://es.scribd.com/doc/30289839/Series-de-Fourier-y-Taylor>

[15] Carlos A. Smith y Armando B. Corripio, "Control automático de procesos teoría y práctica", pp. 180, 2004.

## 7. ANEXOS

### 7.1. ALGORITMOS

#### 7.1.1.1. ALGORITMO 1.

Cálculo de pérdidas por fricción en tuberías, pérdidas por altura hidrostática, pérdida por presión atmosférica, y pérdida en accesorios; obtención de funciones de transferencia del sistema empleando MATLAB.

```
function [LossesSpanH2O, LossesSpanPascal, LossesSpanPsi] =
Losses(Caudal, LengthPipe, elbows)
%L = Longitud de la tubería (m)
%D = Diametro interno de la tubería (m)
%Vel= Velocidad media del flujo del fluido(m/s)
%Ks = Rugosidad de la tubería (m)
%Q = Caudal (m3/s)
%A = Area transversal pi*D^2/4 (m2)
%Re = Número de Reynolds
%miu= Viscosidad dinámica del agua (25°C = 0.891 x 10-3 kg/m*s)
(tablas)
%RO = Densidad del agua = 997 kg/m3 a temperatura ambiente 25 °C
%g = Gravedad (m/s2)
%Ks = Rugosidad del acero inoxidable (m)
%KsOverD = Ks/D Relación de rugosidad de la tubería

%Información de entrada a la función.
    % Caudal en litros por minuto Q_lpm
    % Longitud de la tubería en metros L
    % Número de codos

Q_lpm = 4; %Caudal en litros por minuto
% LengthPipe longitud de la tubería en metros.
% elbows numero de codos de 90 grados en el tramo
g = 9.8; %m/seg2. Gravedad
Ks = 0.000045; %metros. Rugosidad absoluta para el acero inoxidable

Q_m3s = Q_lpm*0.001/60; % m3/seg
miu = 0.891e-3; %Viscosidad dinámica del agua kg/m*s
RO = 997; %Densidad del agua = 997 kg/m3 a t25 °C
D_in=(1/2); %Diámetro de la tubería en Pulgadas
D_m=D_in*0.0254; %Conversión pulgadas a metros (0.0127 m = 12.7mm)
A_m2 = pi*(D_m^2)/4; %Area sección transversal en m2
Vel_ms = Q_m3s/A_m2; %Vel = Q/A. Vel_ms es la velocidad del fluido en
m/s
Re = RO*Vel_ms*D_m/miu; %Número de Reynolds
KsOverD = Ks/D_m; %Ks/D Relación de rugosidad de la tubería
```

```
%Para Re=13087.92 y Ks/D=0.0035 el coeficiente de fricción f1=0.00825
%Por gráfica
```

```
f = 0.00825; %Coeficiente de fricción
sprintf('Coeficiente de Fricción = %f',f)
```

```
%Pérdidas en Tubería
%Tramo1 = 0.191m
LpipeMeterH2O=f*LengthPipe*(Vel_ms^2)/(2*g*D_m);
%Fórmula de Darcy para cálculo de pérdidas de presión en tubería dada
en
metros de agua
%1 Pa(Pascal) = 0.000145037738 Psi
%1 Psi = 6894.75 Pa
LpipePascal=LpipeMeterH2O*RO*g; %Pérdida en pascales
LpipePsi=LpipePascal/6894.75; %Pérdida en psi
sprintf('Pérdida de presión en metros de agua %f',LpipeMeterH2O);
sprintf('Pérdida de presión en pascales %f',LpipePascal);
sprintf('Pérdida de presión en Psi %f',LpipePsi);
```

```
%Perdida en los codos, Ts (Fitting pipe)
%h(ft)=K*Vel^2(ft/sec)^2/2g g=32(ft/sec^2)
%K es dado en tablas, tiene en cuenta el tipo de fitting y el
material.
gFt=32.17; %gravedad en ft/sec^2
velFt=Vel_ms/0.3048; %Velocidad el fluido en ft/sec
%K=2.1 para un codo de 90 grados de 1/2 inch de acero inoxidable
%hfit=pérdidas en el codo
```

```
%K se tomó de Hydraulic Institute Standards Book www.pumpd.org
K=2.1;
helbow=K*(velFt^2)/(2*gFt);
LelbowsH2O=elbows*helbow*0.3048; %Perdidas en metros de agua.
LelbowsPascal=LelbowsH2O*RO*g; %Pérdida en pascales
LelbowsPsi=LelbowsPascal/6894.75 %Pérdida en psi
sprintf('Pérdida de presión en metros de agua %f',LelbowsH2O);
sprintf('Pérdida de presión en pascales %f',LelbowsPascal);
sprintf('Pérdida de presión en Psi %f',LelbowsPsi);
LossesSpanH2O=LpipeMeterH2O+LelbowsH2O;
LossesSpanPascal=LpipePascal+LelbowsPascal;
LossesSpanPsi=LpipePsi+LelbowsPsi;
```

```

clear all
clc
close all
%P1 es la presión que suministra la bomba, la cabeza de la bomba.
%Patm es la presión atmosférica.
%L12 es la pérdida de presión en el tramo de la tubería que va de la
    %bomba a la servoválvula que regula el flujo de entrada al
tanque.
%L34 es la pérdida de presión en el tramo de la tubería que va de la
    %salida de la servoválvula a la entrada al tanque.
%H1 es la altura del tanque al que se le controla el nivel.
%H2 es la diferencia de alturas entre la salida de la bomba y la
    entrada
    %al tanque.
%H1max es el máximo valor de H1.
%Cv de la válvula.
%Cvmax es el máximo valor de Cv.
%vp es el porcentaje de apertura de la servoválvula.
%H1barra es el valor en estado estable de H1.
%vpbarra es el valor en estado estable de vp.
%G es la gravedad específica del líquido que fluye a través de la
válvula.
%RO = Densidad del agua = 997 kg/m3 a temperatura ambiente 25 °C.
%g = Gravedad (m/s2).
%1 Pa(Pascal) = 0.000145037738 Psi.
%1 Psi = 6894.75 Pa.

QLpm=4 %Caudal en litros por minuto del sistema.
Hmax=0.15 %Altura máxima del tanque en metros.
H1max=Hmax/0.3048; %Altura máxima del tanque en pies.
Hbarra=0.1 %Altura del nivel de agua en el tanque en estado
estable en metros.
vpBarra=0.3 %Porcentaje de apertura de la válvula.
Cv=7 %Cv máximo en lpm, servoválvula completamente
abierta.
Cvmax=Cv/3.785; %Cv en gpm. Válvula completamente abierta.
H2=1 %Diferencia de altura entre el tanque y la bomba.
LengthPipe12=1.038 %Long(metros)del tramo 1-2 de la bomba a la
servoválvula.
NoElbows12=2 %No de codos del tramo 1-2 de la bomba a la
servoválvula.
LengthPipe34=0.43 %Long(metros)del tramo 2-3 de la servoválvula al
tanque.
NoElbows34=3 %Número de codos del tramo 2-3 de la servoválvula
al tanque.

%Perdidas en el tramo 1-2
[LossesSpanH2O, LossesSpanPascal, LossesSpanPsi] =
Losses(QLpm, LengthPipe12, NoElbows12);
L12SH2O = LossesSpanH2O;
L12Pascal=LossesSpanPascal;
L12Psi=LossesSpanPsi;

```

```

%Perdidas en el tramo 3-4
[LossesSpanH2O, LossesSpanPascal, LossesSpanPsi] =
Losses (QLpm, LengthPipe34, NoElbows34);
L34SH2O = LossesSpanH2O;
L34Pascal=LossesSpanPascal;
L34Psi=LossesSpanPsi;

Patm=14.7; %Presion atmosfèrica en Psi.
L12=L12Psi %Pèrdidas en el tramo 1-2 en Psi.
L34=L34Psi %Pèrdidas en el tramo 3-4 en Psi.

G=1; %gravedad específica del agua.
g=9.8; %gravedad en m/s^2.
gg=32.2; %gravedad en ft/s^2.
RO = 997; %Densidad del agua = 997 kg/m3 a
temperatura ambiente 25 °C.
RRO=997*(0.3048^3)/0.45359; %densidad del agua en lbm por pie
cúbico.
RRO=62.2410; %densidad del agua en lbm/ft^3.
PHmax=Hmax*RO*g/6894.75; %Presión en Psi que ejerce el nivel del
agua.
PH2=H2*RO*g/6894.75; %Presión hidrostática por diferencia de
altura entre el tanque y la bomba.

%Lmax es la cantidad màxima de presión que debe vencer la bomba
Lmax_overG=(Patm+L12+L34+PHmax+PH2)/G; %en Psi
PPump_Psi=(Lmax_overG+1)*G; %Presión de la bomba en psi
PPump_Pascal=PPump_Psi*6894.75; %Presión de la bomba en
Pascales
Eficiencia=0.7
QQ=QLpm*0.001/60; %Caudal en m3 por sec que
corre por el sistema
PotPump=QQ*PPump_Pascal/Eficiencia %Potencia mínima de la bomba
en Watts

%LservoValve son las pèrdidas en la servovalvula
LServoValve=((PPump_Psi/G) - (Lmax_overG)); %Caída de presión en la
servoválvula
%Pèrdida de presión en la
servoválvula en Psi

%Un gallon tiene 3.785 liters
Altura=Hbarra/0.3048; %Altura del nivel de agua en el tanque en pies
A=(18*11)/(2.54*2.54); %Area de la base del tanque en in^2
A1=(18*11) %Area de la base del tanque en cm^2
A5=(18*11)*0.00107639; %Area de la base del tanque en ft^2
CC1=sqrt(LServoValve);
vp=0.3; %Porcentaje de apertura de la servoválvula
Qi=(Cv/3.785)*vp*CC1;

```

## Resultados

$$QLpm = 4$$

$$Hmax = 0.1500$$

$$Hbarra = 0.1000$$

$$vpBarra = 0.3000$$

$$Cv = 7$$

$$H2 = 1$$

$$LengthPipe12 = 1.0380$$

$$NoElbows12 = 2$$

$$LengthPipe34 = 0.4300$$

$$NoElbows34 = 3$$

$$\text{Coeficiente de Fricción} = 0.008250$$

$$LelbowsPsi = 0.0841$$

$$\text{Coeficiente de Fricción} = 0.008250$$

$$LelbowsPsi = 0.1261$$

$$Patm = 14.7000$$

$$L12 = 0.0976$$

L34 =  
0.1317

PHmax =  
0.2126

PH2 =  
1.4171

PPump\_Psi =  
17.5589

Eficiencia =  
0.7000

PotPump =  
11.5299

A1 =  
198

vp =  
0.3000

Transfer function:  
1.16

-----  
S + 2.421

Transfer function:  
-4.692

-----  
s + 2.421  
>>

Una vez obtenida las funciones de transferencia, estas se ingresan en la interfaz grafica de programación en LABVIEW.

## 7.2 CONTROL DE PROCESOS, CONTROL P, PI Y PID

### CONTROL DE PROCESOS

El objeto de todo proceso industrial será la obtención de un producto final, de unas características determinadas de forma que cumpla con las especificaciones y niveles de calidad exigidos por el mercado, cada día más restrictivos. Esta constancia en las propiedades del producto sólo será posible gracias a un control exhaustivo de las condiciones de operación, ya que tanto la alimentación al proceso como las condiciones del entorno son variables en el tiempo. La misión del sistema de control de proceso será corregir las desviaciones surgidas en las variables de proceso respecto de unos valores determinados, que se consideran óptimos para conseguir las propiedades requeridas en el producto producido.

El sistema de control nos permitirá una operación del proceso más fiable y sencilla, al encargarse de obtener unas condiciones de operación estables, y corregir toda desviación que se pudiera producir en ellas respecto a los valores de ajuste.

Las principales características que se deben buscar en un sistema de control serán:

1. Mantener el sistema estable, independiente de perturbaciones y desajustes.
2. Conseguir las condiciones de operación objetivo de forma rápida y continua.
3. Trabajar correctamente bajo un amplio abanico de condiciones operativas.
4. Manejar las restricciones de equipo y proceso de forma precisa.

La implantación de un adecuado sistema de control de proceso, que se adapte a las necesidades de nuestro sistema, significará una sensible mejora de la operación.

Principalmente los beneficios obtenidos serán:

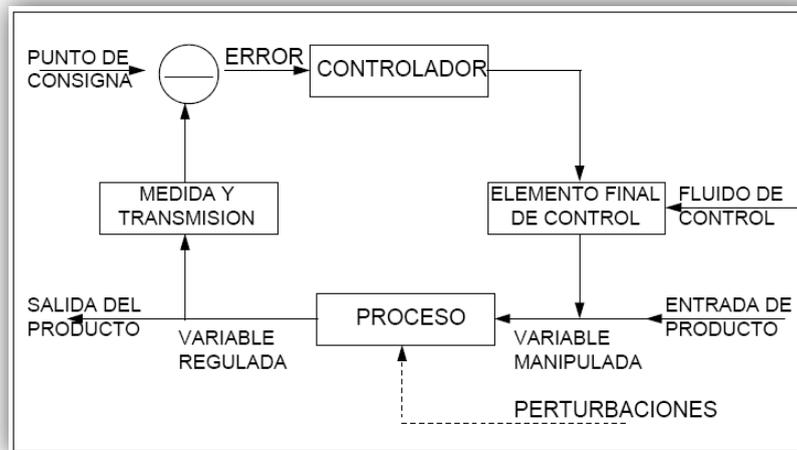
- Incremento de la productividad
- Mejora de los rendimientos
- Mejora de la calidad
- Ahorro energético
- Control medioambiental
- Seguridad operativa
- Optimización de la operación del proceso/ utilización del equipo
- Fácil acceso a los datos del proceso

El control del proceso consistirá en la recepción de unas entradas, variables del proceso, su procesamiento y comparación con unos valores predeterminados por el usuario, y posterior corrección en caso de que se haya producido alguna desviación respecto al valor preestablecido de algún parámetro de proceso.

El bucle de control típico estará formado por los siguientes elementos, a los que habrá que añadir el propio proceso.

- Elementos de medida (*Sensores*) Generan una señal indicativa de las condiciones de proceso.
- Elementos de control lógico (*Controladores*): Leen la señal de medida, comparan la variable medida con la deseada (*punto de consigna*) para determinar el error, y estabilizan el sistema realizando el ajuste necesario para reducir o eliminar el error.
- Elementos de actuación (*Válvulas y otros elementos finales de control*): Reciben la señal del controlador y actúan sobre el elemento final de control, de acuerdo a la señal recibida.

Esta serie de operaciones de medida, comparación, cálculo y corrección, constituyen una cadena cerrada constituyen ciclo cerrado. El conjunto de elementos que hacen posible este control reciben el nombre de *bucle de control (control loop)*.



**Figura 24. Partes del control**

## TIPOS DE CONTROL

Se puede hacer una clasificación de los sistemas de control atendiendo al procedimiento lógico usado por el controlador del sistema para regular la evolución del proceso. Los principales tipos de control utilizados en los procesos industriales serán:

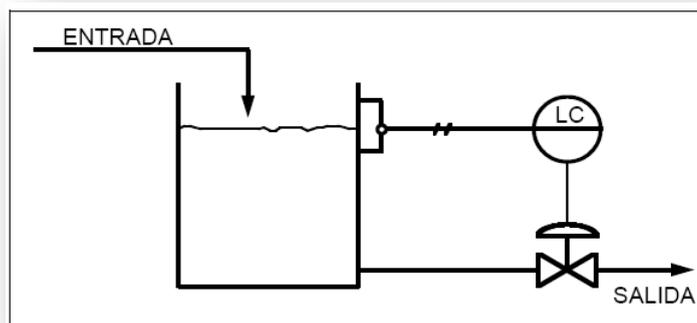
### *Normales:*

- Sistemas de realimentación. (*Feed-back*)
- Proporcional
- Integral
- Derivativo
- Sistema anticipativo (*Feed-Foward*)
- Sistema en cascada (*Cascade*)
- Sistema selectivo (*Over-Ride*)

### *Avanzados*

- Control de restricciones (*Constraint Control*)
- Control del modelo de referencia (*Model Reference Control*)
- Optimización de unidades

A continuación se explicará el fundamento de actuación de algunos de ellos, aquellos de mayor importancia y aplicación. Para ello se recurrirá al ejemplo práctico de un depósito de cierta capacidad en el que es necesario regular el nivel de líquido.



**Figura 25. Sistema de control de nivel**

## SISTEMA DE CONTROL CON REALIMENTACIÓN

Son sistemas de control de bucle cerrado en los que existe una realimentación continua de la señal de error del proceso al controlador, actuando éste conforme a esta señal buscando una reducción gradual del error hasta su eliminación.

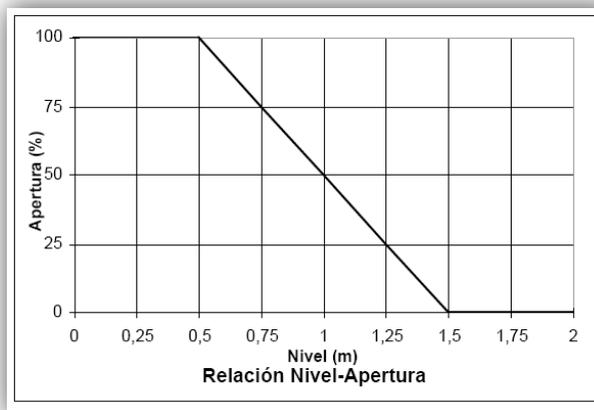
Es el tipo de sistemas que más extendido se encuentra en la actualidad.

Existen diversos diagramas de actuación con la característica común de la realimentación de la señal de error. Sin embargo, seguirán distintos fundamentos de actuación para conseguir la eliminación del error del sistema.

## CONTROL PROPORCIONAL

El sistema de control proporcional se basa en establecer una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control. Así, la válvula de control se moverá el mismo valor para cada unidad de desviación.

En el ejemplo del depósito, el control de nivel abrirá más o menos la válvula de drenaje en función de la desviación existente en el nivel respecto del valor de consigna. Si el nivel ha subido a valores muy altos tendremos una gran apertura de la válvula. Por el contrario, para un nivel inferior al de ajuste la válvula se encontrará en una posición más cerrada que la que correspondería al set-point (ajuste).



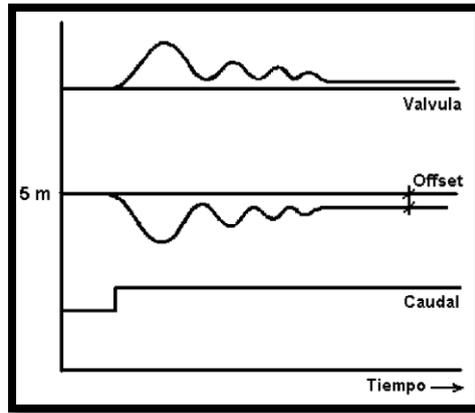
**Figura 26. Curva de porcentaje de apertura Vs nivel del tanque**

El principal problema de este sistema es la imposibilidad de alcanzar de nuevo el punto de consigna cuando se varían las variables de entrada al proceso.

Imaginemos que el nivel de nuestro equipo está ajustado a un metro y el caudal de entrada es de  $5 \text{ m}^3/\text{h}$ , encontrándose la válvula de drenaje en la posición correspondiente al nivel de ajuste seleccionado. Así para que exista constancia de nivel la posición de la válvula de drenaje permitirá que se evacuen los  $5 \text{ m}^3/\text{h}$  de caudal entrante.

Si el caudal de entrada aumenta a  $7 \text{ m}^3/\text{h}$  en un primer momento el nivel del depósito subirá rebasando el de ajuste, el controlador tendrá que abrir la válvula de drenaje buscando restablecer el nivel del depósito. Sin embargo, ahora el caudal a evacuar será superior al anterior por lo que la válvula tendrá que estar más abierta, valor que correspondería a un nivel diferente al de ajuste. De esta forma el sistema de control tendería a estabilizarse en un nivel distinto al de ajuste, donde el paso de la válvula permita evacuar los  $7 \text{ m}^3/\text{h}$  de

caudal entrantes al sistema. La desviación existente entre el valor de ajuste y la estabilización se denominará *offset*.



**Figura 27. Respuesta del sistema a un step**

## CONTROL INTEGRAL

El control integral basa su funcionamiento en abrir o cerrar la válvula, a una velocidad constante, hasta conseguir eliminar la desviación. La velocidad de accionamiento será proporcional al error del sistema existente.

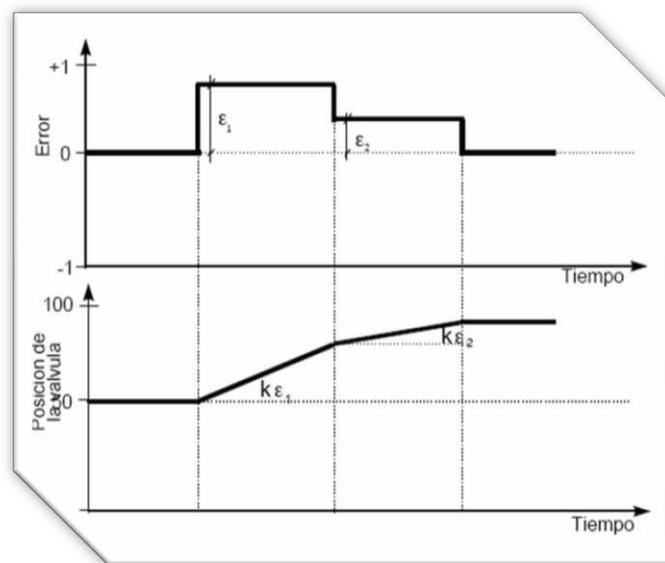
Volviendo al caso de nuestro depósito, debido a la variación de nivel ocasionada por el paso del caudal entrante de 5 a 7 m<sup>3</sup>/h el controlador del sistema actuará de forma que se recupere el nivel de consigna. Por control integral el controlador actuará sobre la válvula de drenaje a una velocidad constante, proporcional a la desviación existente, durante el tiempo necesario para recuperar el valor de ajuste.

Analizaremos lo que ocurre realmente en la válvula, en un primer momento el paso de la válvula permitirá la circulación de los 5 m<sup>3</sup>/h de la alimentación. Al variar el caudal de alimentación a las nuevas condiciones se produce un aumento de nivel al existir una acumulación de materia en el tanque. El controlador del sistema irá aumentando la sección de paso de la válvula a velocidad constante llegándose a alcanzar valores de caudal de salida superiores a los 7 m<sup>3</sup>/h entrantes para conseguir extraer la acumulación de materia producida. Cuando se llegue de nuevo a restablecer el nivel de ajuste,

el controlador actuará sobre la válvula de la forma necesaria para conseguir de nuevo la estabilidad del sistema.

Este sistema presenta la ventaja de carecer de *offset*, por lo que resulta posible recuperar las condiciones de operación de ajuste después de producirse una variación en las entradas del sistema.

A continuación se representará gráficamente cómo evolucionan la posición de la válvula, el error del sistema y la variable de control en el tiempo.

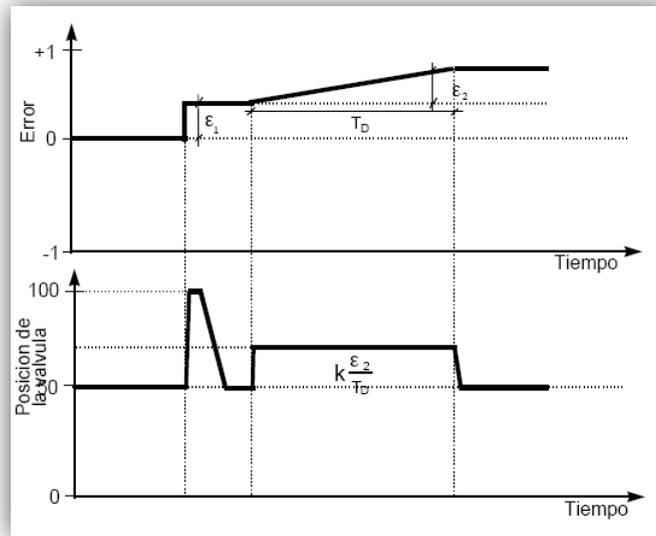


**Figura 28. Error en el sistema**

### CONTROL DERIVATIVO

En la regulación derivada la posición de la válvula será proporcional a la velocidad de cambio de la variable controlada. Así, la válvula sufrirá un mayor o menor recorrido dependiendo de la velocidad de cambio del error del sistema.

Nos remitimos a las curvas de variación de las variables del sistema para una mejor comprensión del fundamento operativo de este modo de regulación.



**Figura 29. Error del sistema Vs Posición de la válvula**

Volviendo al ejemplo del depósito, la regulación de la válvula dependerá de cómo se haya producido la variación de nivel del sistema. Si el nivel varía lentamente la válvula tendrá un paso menor, al que tendría en caso de mayores velocidades de variación de nivel.

Supongamos que la variación de caudal entrante de 5 a 7 m<sup>3</sup>/h nos produce que el nivel suba 1 metro cada diez minutos, regulándose el sistema de forma que se extraen 8 m<sup>3</sup>/h hasta recuperar las condiciones de ajuste. Sin embargo, si tuviéramos el caso de que el nivel variase 2 metros cada cinco minutos sería necesario regular la válvula para tener una extracción de unos 15 m<sup>3</sup>/h con objeto de recuperar las condiciones de consigna de forma más rápida y eficiente.

La adopción de este sistema de control nos permitirá una regulación sin *offset*. El control derivativo nos permite tener una mayor velocidad de corrección de las desviaciones del sistema, contribuye a una operación más estable y continua.

Normalmente en las aplicaciones de control no se recurre solamente al empleo de un solo tipo de regulación, dando lugar a sistemas de control combinados.



### 7.3 TRANSFORMADA DE LAPLACE

La transformada de Laplace de una función del tiempo,  $f(t)$ , se define mediante la siguiente ecuación:

Donde:

$f(t)$  = es una función del tiempo

$F(s)$  = es la transformada de Laplace correspondiente

$S$  = es la variable de la transformada de Laplace

$t$  = es el tiempo

En la aplicación de la transformada de Laplace al diseño de sistemas de control, las funciones del tiempo son las variables del sistema, inclusive la variable manipulada y la controlada, las señales del transmisor, las perturbaciones, las posiciones de la válvula de control, el flujo a través de la válvula y cualquier otra variable o señal intermedia. Por lo tanto, es muy importante darse cuenta que la transformada de Laplace se aplica a las variables y señales y no a los procesos o instrumentos.

Para lograr la familiarización con la definición de la transformada de Laplace, se buscara la transformada de varias señales de entrada comunes. [13]

$f(t)$	$F(s) = \mathcal{L}[f(t)]$
$\delta(t)$	1
$u(t)$	$\frac{1}{s}$
$t$	$\frac{1}{s^2}$
$t^n$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
$e^{-at}$	$\frac{1}{s+a}$
$te^{-at}$	$\frac{1}{(s+a)^2}$
$t^n e^{-at}$	$\frac{n!}{(s+a)^{n+1}}$
$\text{sen } \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
$\text{cos } \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
$e^{-at} \text{sen } \omega t$	$\frac{\omega}{(s+a)^2 + \omega^2}$
$e^{-at} \text{cos } \omega t$	$\frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2}$

**Figura 25. Transformada de Laplace de funciones más usuales**

## 7.4 SERIES DE TAYLOR

Recibe su nombre del matemático británico Brook Taylor, quien lo enunció con mayor generalidad en 1712, aunque previamente James Gregory lo había descubierto en 1671. Este teorema permite obtener aproximaciones polinómicas de una función en un entorno de cierto punto en que la función sea diferenciable. Además el teorema permite acotar el error obtenido mediante dicha estimación.

Este teorema permite aproximar una función derivable en el entorno reducido alrededor de un punto  $a$ :  $E(a, d)$  mediante un polinomio cuyos coeficientes dependen de las derivadas de la función en ese punto. Más formalmente, si  $n \geq 0$  es un entero y una función que es derivable veces en el intervalo cerrado  $[a, a+d]$  y  $n+1$  veces en el intervalo abierto  $(a, a+d)$ , entonces se cumple que: [14]

$$f(x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x-a) + \frac{f^{(2)}(a)}{2!}(x-a)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x-a)^n + R_n(f)$$