



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN  
CONTROL Y REDES INDUSTRIALES**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO  
DIDÁCTICO DE CONTROL DE CAUDAL PARA EL  
LABORATORIO DE CONTROL DE LA EIE-CRI DE LA  
ESPOCH”**

**TESIS DE GRADO**

**Previo a la obtención del título de  
INGENIERO EN ELECTRÓNICA CONTROL Y REDES INDUSTRIALES**

**Presentado por:**

**EDISON DARWIN GAVILEMA OROSCO**

**Riobamba-Ecuador**

**2012**

## AGRADECIMIENTO

*A Dios por darme la vida, la salud, la fuerza  
y sabiduría para encaminar por el sendero del bien  
con responsabilidad y entereza en todo ámbito.*

*Al Ingeniero Pablo Guevara,  
director del proyecto de titulación,  
por impartir sus conocimientos y  
experiencia para el desarrollo del mismo*

*A mis hermanos por haberme apoyado  
en los momentos más difíciles que he pasado*

*A mi madre Marlene Nelly que siempre estuvo  
apoyándome en todo momento, gracias por su apoyo  
económico y moral he logrado cumplir mis metas.*

Edison D.

## **DEDICATORIA**

*A mi madre Marlene Nelly Orosco Oñate,  
por todo el apoyo brindado durante mi vida  
y carrera estudiantil, gracias por su comprensión,  
cariño y por ser mi sustento.*

*A mi hermano Darío Benjamín  
por ser el mejor hermano y darme ejemplo de lucha  
y superación, por alegrarme mi vida a pesar de los problemas  
siempre estará presente en mi corazón como los mejores recuerdos.*

Edison D.

**NOMBRE**

**FIRMA**

**FECHA**

Ing. Iván Menes.

**DECANO DE LA FACULTAD  
DE INFORMÁTICA Y  
ELECTRÓNICA**

.....

.....

Ing. Paúl Romero

**DIRECTOR DE LA  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
ELECTRÓNICA CONTROL  
REDES INDUSTRIALES**

.....

.....

Ing. Pablo Guevara

**DIRECTOR DE TESIS**

.....

.....

Ing. Paul Romero

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

.....

.....

Lcdo. Carlos Rodríguez

**DIRECTOR DPTO.  
DOCUMENTACIÓN**

.....

.....

**NOTA DE LA TESIS**

.....

## **TEXTO DE RESPONSABILIDAD**

Yo Edison Darwin Gavilema Orosco soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta tesis; y el patrimonio intelectual de la tesis de Grado pertenece a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO.

---

Edison Darwin Gavilema Orosco

# ÍNDICE GENERAL

PORTADA	
DEDICATORIA	
FIRMAS	
HOJA DE RESPONSABILIDAD	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE TABLAS	

## CAPÍTULO I

### MARCO REFERENCIAL

1.1	Antecedentes.....	15
1.2	Justificación del proyecto de tesis.....	16
1.3	Objetivos	
	1.3.1 Objetivos Generales.....	16
	1.3.2 Objetivos Específicos.....	16
1.4	Hipótesis.....	17

## CAPÍTULO II

### DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CONTROL DE CAUDAL

2.1	Definición de fluido .....	18
2.2	Propiedades de los fluidos .....	20
	2.2.1 Viscosidad.....	20
	2.2.2 Compresibilidad.....	23
	2.2.3 Tensión superficial.....	24
	2.2.4 Masa específica.....	24
	2.2.5 Peso específico.....	25
	2.2.6 Densidad.....	25

2.3	Fluidos ideales y reales .....	25
2.4	Estática de fluidos.....	26
2.5	Dinámica de fluidos.....	29
2.5.1	Flujos incompresibles y sin rozamiento .....	30
2.5.2	El teorema de Bernoulli.....	30
2.5.3	Flujos viscosos: movimiento laminar y turbulento.....	32
2.5.4	Número de Reynolds .....	33
2.5.5	Flujos compresibles.....	35
2.5.6	Ley de Poiseuille.....	36
2.5.7	Perfil de velocidades.....	37
2.6	Teoría de la medición de caudales y volúmenes de agua e instrumental necesario disponible en el mercado.....	38
2.6.1	Medidores volumétricos.....	39
2.6.1.1	Medidores de presión diferencial.....	39
2.6.1.2	Medidores de área variable.....	41
2.6.1.3	Medidores de fuerza.....	42
2.6.1.4	Medidores de desplazamiento positivo.....	43
2.6.1.5	Medidor de velocidad.....	44
2.6.1.6	Medidores de tensión inducida.....	46
2.7	Bombas.....	48
2.7.1	Clasificación.....	48
2.7.1.1	Bombas de desplazamiento positivo o volumétrico.....	49
2.7.1.2	Bombas rotodinámicas.....	49
2.7.2	Punto de operación.....	53
2.7.3	Curvas de isoeficiencia.....	53
2.8	Descripción de la planta su funcionamiento.....	54

## CAPÍTULO III

### DISEÑO DEL MÓDULO DE CONTROL DE CUDAL

3.1	Estructura del módulo control de caudal.....	56
3.1.1	Soporte y tubería.....	57
3.1.2	Selección de la bomba centrífuga.....	59
3.1.3	Selección del actuador.....	62
3.1.4	Selección del sensor de flujo.....	64
3.1.5	Sistemas de Adquisición de Datos.....	65
3.1.6	Tarjeta de Adquisición de Datos NI myDAQ.....	67
3.1.6.1	Entradas y elementos de la NI my DAQ.....	69
3.1.6.1.1	Entrada analógica (AI).....	69
3.1.6.1.2	La salida analógica (AO).....	69
3.1.6.1.3	Entradas / salidas digitales (DIO).....	69
3.1.6.1.4	Fuentes de alimentación.....	70
3.1.7	Selección de los instrumentos y protecciones.....	70
3.1.8	Sensores de nivel.....	71
3.2	Construcción del circuito de potencia, activación .....	72
3.2.1	Elementos Principales del Circuito de Potencia.....	73
3.2.1.1	Triac.....	73
3.2.1.2	Optoacoplador Moc 3021.....	74
3.2.1.3	Funcionamiento.....	75
3.2.2	Funcionamiento del Circuito de Potencia.....	75
3.3	Alimentación de red y descripción de fuente.....	76

## CAPÍTULO IV

### DISEÑO DEL ALGORITMO DE CONTROL

4.1	Introducción.....	78
4.2	Sistemas lineales de primer orden.....	80
4.2.1	Ganancia en Estado Estacionario K.....	80
4.2.2	Efecto de la Constante de Tiempo sobre la Respuesta del Sistema.....	81

4.3	Diseño del sistema de control automático.....	82
4.4	Medición de frecuencia correspondiente al flujo de salida.....	83
4.5	Programación del variador de frecuencia.....	84

## **CAPÍTULO V**

### **PRUEBAS Y RESULTDOS**

5.1	Introducción.....	87
5.2	Interfaces desarrolladas en labview® 2009.....	89
5.2.1	Panel frontal de la pantalla principal.....	89
5.2.2	Pantalla de proceso.....	90
5.2.3	Panel frontal de historicos.....	93

## **CAPÍTULO VI**

### **PRUEBAS Y RESULTDOS**

6.1	Pruebas de comunicación.....	94
6.2	Pruebas de control de usuarios.....	96
6.3	Respuesta dinámica del control PID.....	97
6.4	Pruebas de control de velocidad de la bomba desde el variador.....	98

### **CONCLUSIONES**

### **RECOMENDACIONES**

### **RESUMEN**

### **SUMMARY**

### **GLOSARIO**

### **BIBLIOGRAFÍA**

### **ANEXOS**

## INDICE DE FIGURAS

Figura II.1	Comportamiento de un fluido sometido a una fuerza de corte o tangencial	18
Figura II.2	Moléculas de un líquido	19
Figura II.3	Moléculas de un gas.	20
Figura II.4.	Comportamiento de un fluido	21
Figura II.5	Dos capas de fluido con $dx$ y $dv$	21
Figura II.6	Variación de la viscosidad en función de la presión para un fluido de bajo índice de viscosidad (A) y elevado índice de viscosidad (B)	23
Figura II.7	Principio de Pascal	27
Figura II.8	Transmisión de la presión aplicada sobre un fluido	28
Figura II.9	Teorema de Bernoulli	31
Figura II.10	a) Flujo principal b) Remolinos c) Flujo turbulento	33
Figura II.11	Flujo viscoso dentro de una tubería de radio $R$ y longitud $L$	36
Figura II.12	Capa de fluido comprendida entre $r$ y $r+dr$	37
Figura II.13	Perfil de velocidades	38
Figura II.14	Rotámetro de tubo de vidrio cónico y flotador	41
Figura II.15	El principio de funcionamiento del medidor de placa de resistencia.	42
Figura II.16	Sección transversal de un medidor de turbina para líquidos.	45

Figura II.17	Diagrama simplificado de la velocidad para un medidor de turbina ideal.	45
Figura II.18	Curva de comportamiento de un medidor de turbina para líquidos.	46
Figura II.19	Elementos de un medidor electromagnético.	47
Figura II.20	Bomba centrífuga.	50
Figura II.21	Punto de operación de una bomba.	53
Figura II.22	Curvas de isoeficiencia	54
Figura II.23	Esquema del módulo de control de flujo	55
Figura III.24	Control en lazo cerrado implementado para el control de flujo.	56
Figura III.25	Soporte, tubería y panel de instrumentos del módulo de control de flujo.	59
Figura III.26	Bomba.	62
Figura III.27	Curva torque vs velocidad de una bomba.	63
Figura III.28	Variador de frecuencia.	63
Figura III.29	Terminales de E/S del variador de frecuencia	64
Figura III.30	Medidor de Caudal Tipo Turbina.	65
Figura III.31	NI myDAQ National Instruments	68
Figura III.32	Composición interna de La NI MyDAQ	68
Figura III.33	Circuito de potencia del módulo de control de caudal.	71
Figura III.34	Sensor de nivel.	72
Figura III.35	Esquemático del circuito de potencia.	73

Figura III.36	Voltaje en la carga vs ángulo de conducción del triac	74
Figura III.37	Esquemático del MOC 3021	75
Figura III.38	Fuente de 9 vdc	77
Figura IV.39	Control PID cuando se ha producido un cambio brusco en la referencia.	78
Figura IV.40	Respuesta del sistema con ganancia K	81
Figura IV.41	Constante de tiempo en la respuesta del sistema	81
Figura IV.42	Sistema de control automático a implementarse.	82
Figura IV.43	Diagrama de frecuencia vs caudal del sensor	83
Figura IV.44	Parámetros de la bomba	85
Figura V.45	Pantalla de usuario	90
Figura V.46	Pantalla del proceso	92
Figura V.47	Pantallas de históricos	93
Figura VI.48	Panel indicador de caudal mínimo encendido	94
Figura VI.49	Pantalla HMI indicador caudal mínimo encendido	95
Figura VI.50	Panel indicador de caudal mínimo apagado	95
Figura VI.51	Pantalla HMI indicador caudal mínimo apagado	96
Figura VI.52	Pantalla usuario correcto	96
Figura VI.53	Pantalla usuario incorrecto	97
Figura VI.54	$K_p=0,55$ , $T_I=0,025$ y $T_d=0$	98

Figura VI.55	caudal de 5 a 2gpm	98
Figura VI.56	Pruebas del variador desde al panel del variador a 20 HZ	99
Figura VI.57	HMI con control de velocidad desde el panel del variador.	99

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla II.I	Propiedades de fluidos más usuales	24
Tabla III.II	Longitud equivalente de conexiones a tubería en metros.	60
Tabla IV.III	Relación frecuencias de bomba y sensor vs galones por minutos.	83

# **CAPÍTULO I**

## **MARCO REFERENCIAL**

### **1.1 ANTECEDENTES**

La gran mayoría de los procesos industriales requieren controles cada vez más óptimos que permitan tener un dominio sobre todas las variables físicas que estos manejan, entre una de ellas está el caudal.

El caudal es una variable preponderante en gran número de procesos industriales; su control debe ser preciso y estable.

El control de caudal en dosificación de líquidos es uno de las aplicaciones más comunes para controlar procesos de: llenado de botellas, dosificación de productos químicos, petroquímicos, llenado de combustibles, etc.

Todos los procesos citados tienen en común la medida del caudal y difieren en aspectos tecnológicos de su control, de forma especial según sea la forma del líquido a controlar. Muchos controles de caudal se los realiza a través de herramientas virtuales que facilitan el desarrollo de innumerables procesos industriales los cuales al ser monitoreados en tiempo real permiten corregir de manera óptima diversos parámetros del sistema de control y así estabilizarlo de forma oportuna.

El laboratorio de Electrónica de la EIE-CRI en la ESPOCH no cuenta con un módulo educativo de caudal capaz de ser controlado ni monitoreado para distintos procesos industriales evidenciándose un vacío en la parte experimental para el control de procesos.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO DE TESIS**

La elaboración del módulo de caudal tiene como finalidad dotar de un módulo didáctico al laboratorio de Control de la ESPOCH, donde los estudiantes puedan apreciar el uso de un sensor de caudal; así mismo permite la utilización de una bomba trifásica, variador de frecuencia, y válvulas, como también la monitorización, control e ingreso y salida de señales mediante una HMI en LabVIEW® a través de una tarjeta de adquisición de datos.

La construcción del módulo de caudal cubre las necesidades de aprendizaje de los estudiantes de electrónica en control, permitiendo este módulo reflejar una visión clara y concisa de como se realiza un proceso de control de caudal a nivel industrial, fortaleciendo así los conocimientos adquiridos mediante prácticas experimentales, siendo muy ilustrativo al momento de impartir clases de instrumentación y sensores , control de procesos industriales y demás materias relacionadas a la área de control a través de un manual de prácticas de laboratorio, en el cual se podrán implementar y comprobar los distintos algoritmos de control .

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1 General**

- Diseñar y construir un módulo didáctico de control de caudal para el laboratorio de control de la EIE-CRI de la ESPOCH.

### **1.3.2 Específicos**

- Construir la estructura metálica para ubicar los elementos del módulo de caudal.
- Construir un panel operador que permitirá ubicar los diferentes elementos del módulo de caudal.
- Diseñar un algoritmo PID para controlar el caudal.

- Diseñar una interfaz en LabVIEW® para monitorear y controlar el módulo de caudal mediante una tarjeta de adquisición de datos NI MyDaQ.
- Realizar pruebas del sistema.

#### **1.4. HIPÓTESIS**

Con la construcción del módulo educativo de caudal para el laboratorio de Control de la EIE-CRI de la ESPOCH, se desea que el nivel técnico adquirido por los estudiantes en el transcurso de su carrera se encuentre fortalecido bajo sólidos conocimientos teóricos prácticos dentro del área de control industrial.

## CAPÍTULO II

### DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CONTROL DE CAUDAL

#### 2.1 DEFINICIÓN DE FLUIDO

Considerando el comportamiento que exhiben los fluidos, mas no la composición de los mismos, estos se definen de la siguiente manera: "Fluido es una sustancia que se deforma continuamente cuando está sometido a un esfuerzo de corte, por tanto, en ausencia de éste, no habrá deformación". De ésta definición se desprende que un fluido en reposo no soporta ningún esfuerzo de corte.

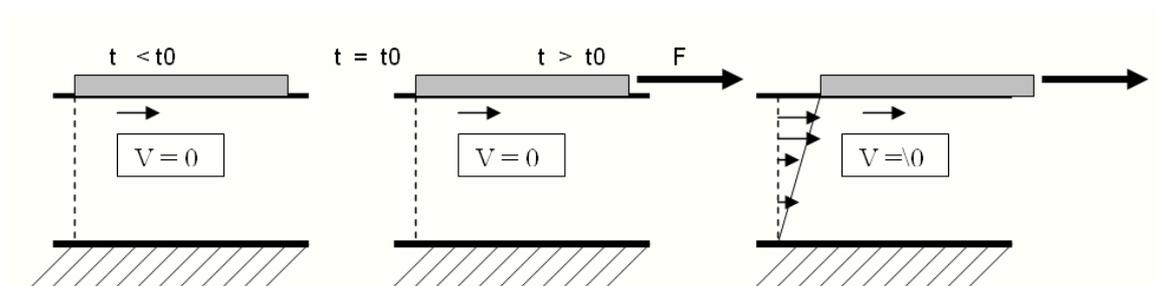


Figura II.1 Comportamiento de un fluido sometido a una fuerza de corte o tangencial.

Los fluidos reaccionan de una manera característica a las fuerzas. Si se compara lo que le ocurre a un sólido y a un fluido cuando son sometidos a un esfuerzo de corte, se tienen reacciones particulares que se pueden verificar experimentalmente y que permiten diferenciarlos.

La materia se nos presenta en muchas fases o estados, todos con propiedades y características diferentes, y aunque los más conocidos y observables cotidianamente son cuatro: Fase Sólida, Fase Líquida, Fase Gaseosa y Fase Plasma; otros estados son observables en condiciones extremas de presión y temperatura.

En física y química se observa que, para cualquier cuerpo o estado material, modificando las condiciones de temperatura y/o presión, pueden obtenerse distintos estados o fases de agregación, denominados estados de agregación de la materia, relacionadas con las fuerzas de unión de las partículas (moléculas, átomos o iones) que constituyen la misma.

En los líquidos, los átomos se encuentran más alejados unos de otros, en comparación con los átomos de un sólido y, por tanto, las fuerzas de cohesión que existen entre ellos son más débiles.

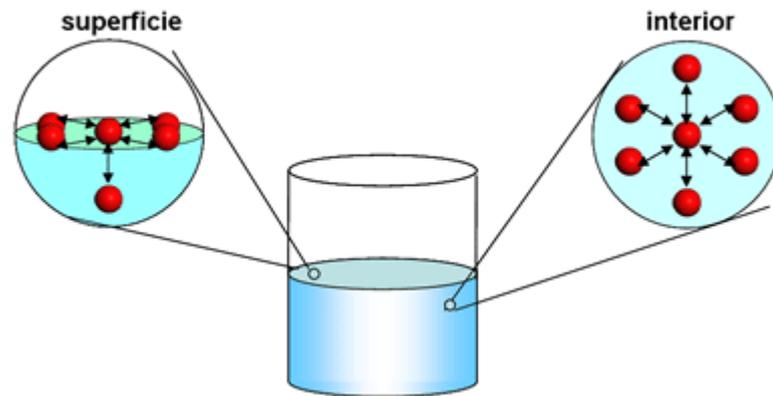


Figura II.2 Moléculas de un líquido.

Los gases son muy compresibles, porque son capaces de reducir su volumen cuando se les aplica una fuerza, por lo que se les considera elásticos, mientras que los líquidos son prácticamente incompresibles, puesto que conservan su volumen fijo, siempre que no se altere su temperatura.

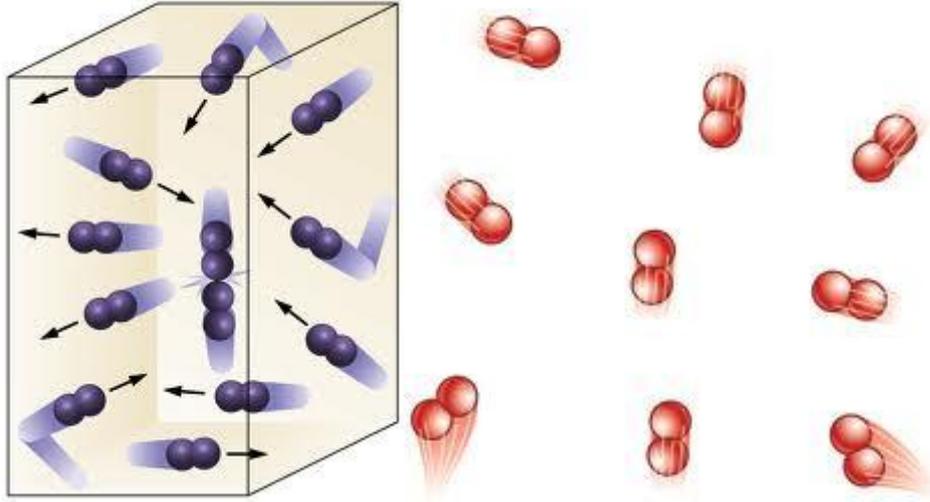


Figura II.3 Moléculas de un gas.

## 2.2 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Los fluidos, como todos los materiales, tienen propiedades físicas que permiten caracterizar y cuantificar su comportamiento así como distinguirlos de otros. Algunas de estas propiedades son exclusivas de los fluidos y otras son típicas de todas las sustancias. Características como la viscosidad, compresibilidad y tensión superficial solo se pueden definir en los líquidos y gases.

### 2.2.1 Viscosidad

La viscosidad es una propiedad distintiva de los fluidos. Está ligada a la resistencia que opone un fluido a deformarse continuamente cuando se somete a un esfuerzo de corte. Esta propiedad es utilizada para distinguir el comportamiento entre fluidos y sólidos. Además los fluidos pueden ser en general clasificados de acuerdo a la relación que existe entre el esfuerzo de corte aplicado y la velocidad de deformación.

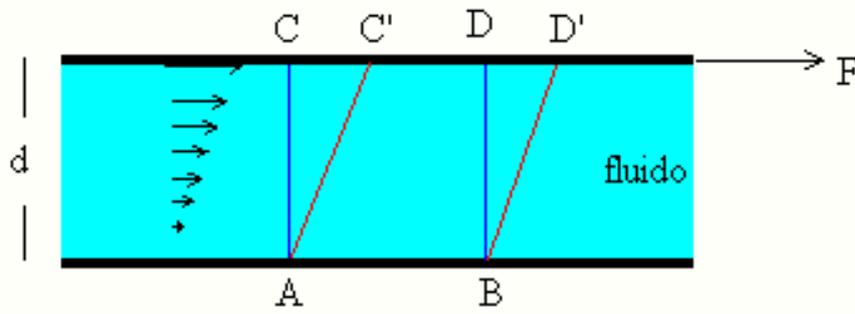


Figura II.4. Comportamiento de un fluido.

La capa de fluido en contacto con la lámina móvil tiene la misma velocidad que ella, mientras que la adyacente a la pared fija está en reposo. La velocidad de las distintas capas intermedias aumenta uniformemente entre ambas láminas tal como sugieren las flechas. Un flujo de éste tipo se denomina laminar.

Como consecuencia de éste movimiento, una porción de líquido que en un determinado instante tiene la forma ABCD, al cabo de un cierto tiempo se deformará y se transformará en la porción A'B'C'D'.

Sean dos capas de fluido de área  $S$  que distan  $dx$  y entre las cuales existe una diferencia de velocidad  $dv$ .

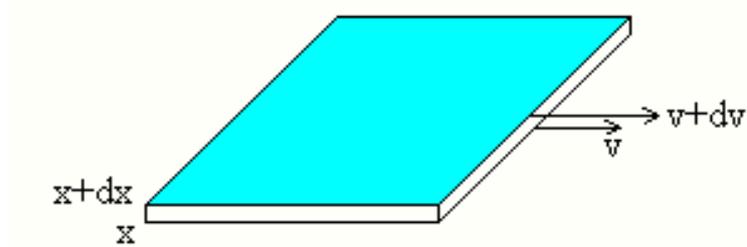


Figura II.5 Dos capas de fluido con  $dx$  y  $dv$ .

La fuerza por unidad de área que hay que aplicar es proporcional al gradiente de velocidad. La constante de proporcionalidad se denomina viscosidad.

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx}$$

(Ecuación II.1)

En el caso particular, de que la velocidad aumente uniformemente, como se indicó en la Figura II.4, la (Ecuación II.1) se escribe.

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{v}{d}$$

(Ecuación II.2)

### **Índice de viscosidad**

La finalidad de este índice es medir la viscosidad de un fluido en relación a la variación de temperatura.

Si un líquido se hace muy viscoso a temperaturas bajas y muy fluido a temperaturas altas, posee un índice de viscosidad muy bajo. Si la viscosidad de un líquido se mantiene casi inalterable con los cambios de temperatura, su índice es muy alto (varia poco la viscosidad).

La escala de índice viscosidad varía de 0 a 100.

### **Punto de fluidez**

Es la temperatura más baja a la que un líquido puede fluir. Este dato es vital si el sistema hidráulico trabaja a temperaturas bajas. Por norma de seguridad, el punto de fluidez suele estar 10 °C por debajo de la temperatura más baja de utilización.

La viscosidad depende también de la presión como muestra la Figura II.6

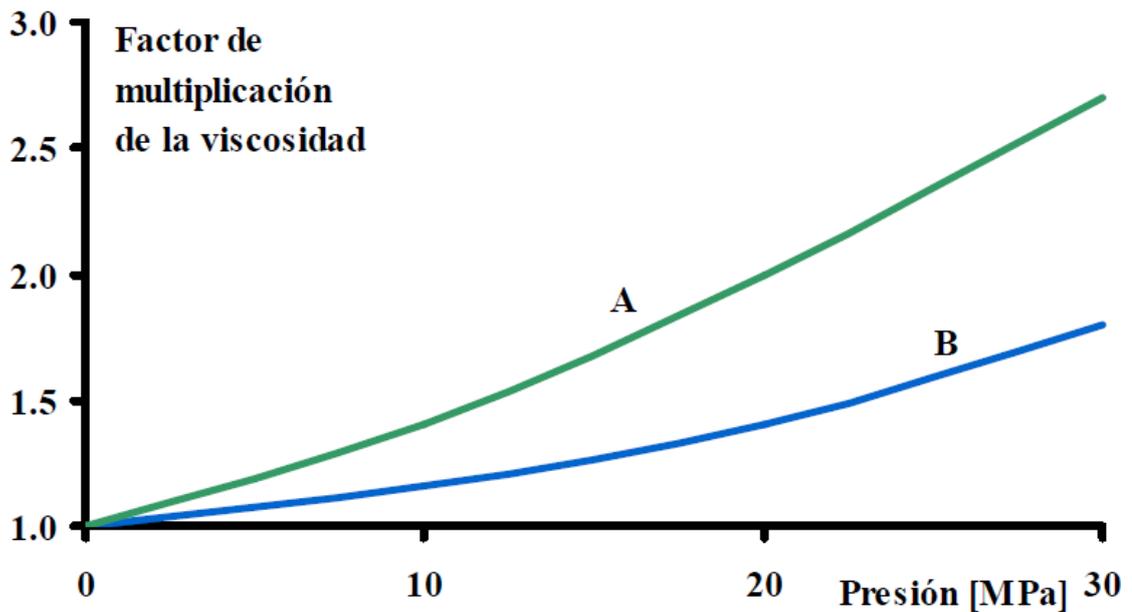


Figura II.6 Variación de la viscosidad en función de la presión para un fluido de bajo índice de viscosidad (A) y elevado índice de viscosidad (B)

### 2.2.2 Compresibilidad

La compresibilidad representa la relación entre los cambios de volumen y los cambios de presión a los que se someten un fluido. Las variaciones de volumen pueden relacionarse directamente con variaciones de la masa específica si la cantidad de masa permanece constante. En general se sabe que en los fluidos la masa específica depende tanto de la presión como de la temperatura de acuerdo a la ecuación de estado.

$$PV = nRT \quad (\text{Ecuación II.3})$$

Donde:

$P$ : Presión

$V$ : Volumen

$n$ : Moles de Gas.

$R$ : Constante universal de los gases ideales

$T$ : Temperatura absoluta

### 2.2.3 Tensión superficial

A nivel microscópico, la tensión superficial se debe a que las fuerzas que afectan a cada molécula son diferentes en el interior del líquido y en la superficie. Así, en el seno de un líquido cada molécula está sometida a fuerzas de atracción que en promedio se anulan. Esto permite que la molécula tenga una energía bastante baja. Sin embargo, en la superficie hay una fuerza neta hacia el interior del líquido. El valor de ella dependerá de los fluidos en contacto y de la temperatura. Los efectos de la tensión superficial son solo apreciables en fenómenos de pequeñas dimensiones, como es el caso de tubos capilares, burbujas, gotas y situaciones similares.

#### Valores típicos de las propiedades de fluidos más usuales

Propiedad	Designación	Unidades	Valores	
			Agua	Aire
Masa específica	P	kg/m <sup>3</sup>	1.000	1,2
Viscosidad	β	g/ms	1,0	0,02
Calor específico	Cp	J/kg <sup>°</sup> K	4.200	1.008
Presión de vapor (20°)	Pv	bar	0,023	-
Tensión Superficial	Ö	mN/m	72,8	-

Tabla II.I Propiedades de fluidos más usuales

Sin embargo, la masa específica, el peso específico y la densidad son atributos de cualquier materia.

### 2.2.4 Masa específica

Se denomina masa específica a la cantidad de materia por unidad de volumen de una sustancia. Se designa por  $P$  y se define:

$$P = \lim_{v \rightarrow 0} \left( \frac{m}{v} \right)$$

(Ecuación II.4)

### 2.2.5 Peso específico

El peso específico corresponde a la fuerza con que la tierra atrae a una unidad de volumen. Se designa por  $\beta$ . La masa y el peso específico están relacionados por:

$$\beta = g * P$$

(Ecuación II.5)

Donde:

$g$ : Representa la intensidad del campo gravitacional.

### 2.2.6 Densidad

Se denomina densidad a la relación que existe entre la masa específica de una sustancia cualquiera y una sustancia de referencia. para los líquidos se utiliza la masa específica del agua a 4°C como referencia, que corresponde a 1 [g/cm<sup>3</sup>] y para los gases se utiliza al aire con masa específica a 20°C y 1,013 bar de presión la cual es 1,204 [kg/m<sup>3</sup>].

## 2.3 FLUIDOS IDEALES Y REALES

Los fluidos ideales son aquellos en los que la viscosidad es nula o despreciable, en su comportamiento no se observa esfuerzos de corte y por lo tanto no existen fuerzas de fricción con las paredes de los sólidos.

El movimiento de un fluido real es muy complejo. Para simplificar su descripción se considera el comportamiento de un fluido ideal cuyas características son las siguientes:

- **Fluido no viscoso.** Se desprecia la fricción interna entre las distintas partes del fluido
- **Flujo estacionario.** La velocidad del fluido en un punto es constante con el tiempo

- **Fluido incompresible.** La densidad del fluido permanece constante con el tiempo
- **Flujo irrotacional.** No presenta torbellinos, es decir, no hay momento angular del fluido respecto de cualquier punto.

## 2.4 ESTÁTICA DE FLUIDOS

Según el investigador John Miller: "La estática de los fluidos estudia las condiciones de equilibrio bajo las cuales un fluido está en reposo", sabiendo que para ello se requiere que todos los elementos que lo forman se muevan a la misma velocidad; es decir, que no se desplacen los unos de los otros y por lo tanto no haya escurrimiento. El fluido está entonces detenido o se mueve como si fuera un cuerpo rígido sin deformarse. La ausencia de escurrimiento, y por lo tanto de deformación angular, lleva implícita la ausencia de corte.

Bajo estas condiciones, sobre las superficies que están en contacto con el fluido solo se desarrollan esfuerzos normales. Debido a la ausencia de esfuerzos tangenciales la viscosidad no tiene importancia, de modo que los principios de la hidrostática son aplicables a cualquier tipo de fluido viscoso o real, ideal o perfecto.

### ESTÁTICA DE FLUIDOS O HIDROSTÁTICA

Una característica fundamental de cualquier fluido en reposo es que la fuerza ejercida sobre cualquier partícula del fluido es la misma en todas direcciones. Si las fuerzas fueran desiguales, la partícula se desplazaría en la dirección de la fuerza resultante. De ello se deduce que la fuerza por unidad de superficie, la presión, que el fluido ejerce contra las paredes del recipiente que lo contiene, sea cual sea su forma, es perpendicular a la pared en cada punto. Si la presión no fuera perpendicular, la fuerza tendría una componente tangencial no equilibrada y el fluido se movería a lo largo de la pared.

Este concepto fue formulado por primera vez en una forma un poco más amplia por el matemático y filósofo francés Blaise Pascal en 1647.

### Principio de Pascal.

La presión aplicada a un fluido confinado se transmite íntegramente en todas las direcciones y ejerce fuerzas iguales sobre áreas iguales, actuando estas fuerzas perpendicularmente a las paredes del recipiente, siempre que se puedan despreciar las diferencias de presión debidas al peso del fluido y a la profundidad.

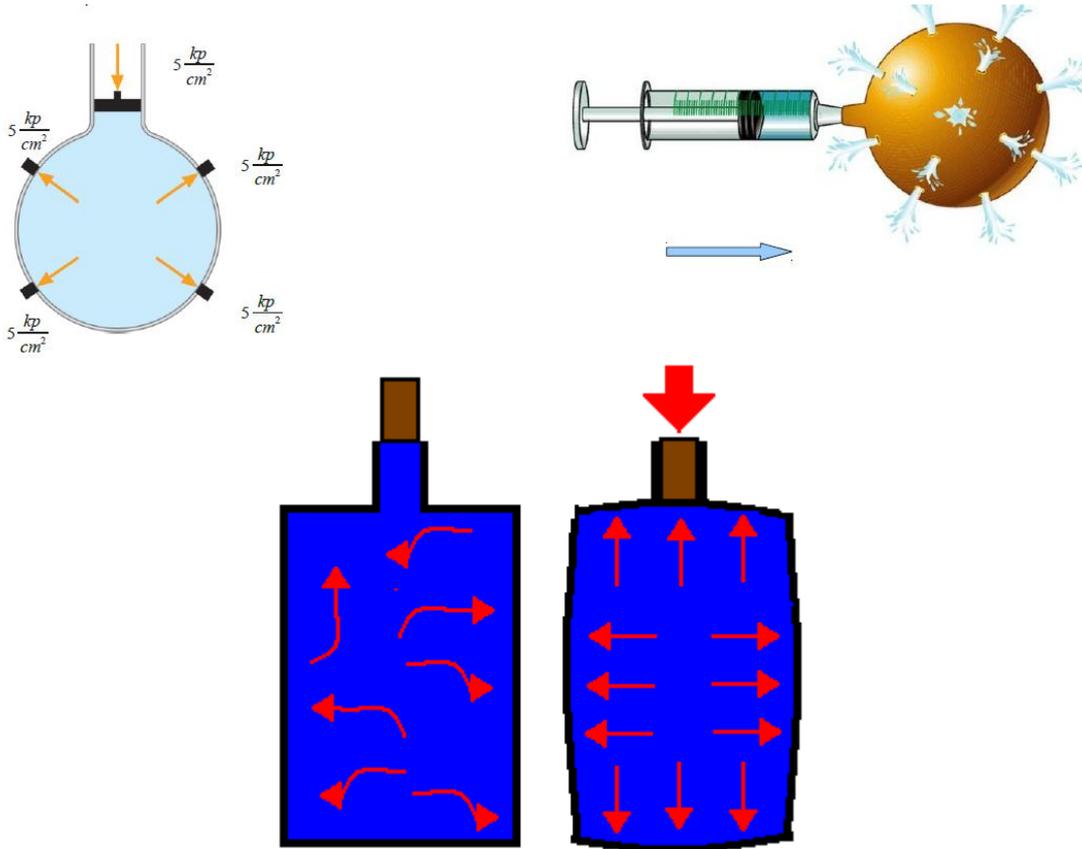


Figura II.7 Principio de Pascal

Dicho principio, que tiene aplicaciones muy importantes en hidráulica, la más común la prensa hidráulica utilizada para levantar grandes pesos con poco esfuerzo.

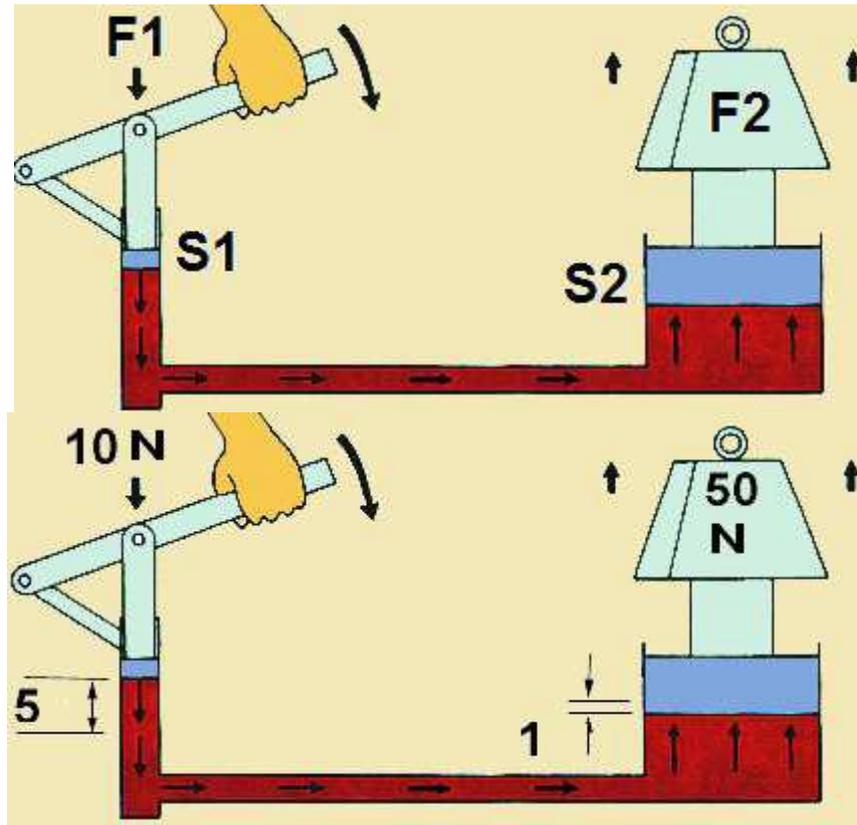


Figura II.8 Transmisión de la presión aplicada sobre un fluido.

Como  $p_1 = p_2$  (porque la presión interna es la misma para todos los puntos) entonces:  $F_1/A_1$  es igual  $F_2/A_2$  por lo que despejando un término se tiene que:

$$F_2 = F_1 \cdot (A_2/A_1) \quad (\text{Ecuación II.6})$$

### Principio de Arquímedes

El segundo principio importante de la estática de fluidos fue descubierto por el matemático y filósofo griego Arquímedes. El cual afirma que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta una fuerza hacia arriba igual al peso del volumen de fluido desplazado por dicho cuerpo. Esto explica por qué flota un barco muy cargado; el peso del agua desplazada por el barco equivale a la fuerza hacia arriba que mantiene el barco a flote.

## 2.5 DINÁMICA DE FLUIDOS

### DINÁMICA DE FLUIDOS O HIDRODINÁMICA

Esta rama de la mecánica de fluidos se ocupa de las leyes de los fluidos en movimiento. Estas leyes son enormemente complejas, y aunque la hidrodinámica tiene una importancia práctica, mayor que la hidrostática, sólo se tratan aquí algunos conceptos básicos.

El interés por la dinámica de fluidos se remonta a las aplicaciones más antiguas de los fluidos en ingeniería. Arquímedes realizó una de las primeras contribuciones con la invención, que se le atribuye tradicionalmente, del tornillo sin fin. La acción impulsora del tornillo de Arquímedes es similar a la de la pieza semejante a un sacacorchos que tienen las picadoras de carne manuales. Los romanos desarrollaron otras máquinas y mecanismos hidráulicos; no sólo empleaban el tornillo de Arquímedes para bombear agua en agricultura y minería sino que también construyeron extensos sistemas de acueductos, algunos de los cuales todavía funcionan. En el siglo I A.C., el arquitecto e ingeniero romano Vitrubio inventó la rueda hidráulica horizontal, con lo que revolucionó la técnica de moler grano.

A pesar de estas tempranas aplicaciones de la dinámica de fluidos, apenas se comprendía la teoría básica, por lo que su desarrollo se vio frenado. Después de Arquímedes pasaron más de 1800 años antes de que se produjera el siguiente avance científico significativo, debido al matemático y físico italiano Evangelista Torricelli, que inventó el barómetro en 1643 y formuló el teorema de Torricelli, que relaciona la velocidad de salida de un líquido a través de un orificio de un recipiente, con la altura del líquido situado por encima de dicho agujero. El siguiente gran avance en el desarrollo de la mecánica de fluidos tuvo que esperar a la formulación de las leyes del movimiento por el matemático y físico inglés Isaac Newton. Estas leyes fueron aplicadas por primera vez a los fluidos por el matemático suizo Leonhard Euler, quien dedujo las ecuaciones básicas para un fluido sin rozamiento (no viscoso).

Euler fue el primero en reconocer que las leyes dinámicas para los fluidos sólo pueden expresarse de forma relativamente sencilla si se supone que el fluido es incompresible e

ideal; es decir, si se pueden despreciar los efectos del rozamiento y la viscosidad. Sin embargo, como esto nunca es así en el caso de los fluidos reales en movimiento, para Gareth Williams los resultados de dicho análisis sólo pueden servir como estimación para flujos en los que los efectos de la viscosidad son pequeños.

### 2.5.1 Flujos incompresibles y sin rozamiento

Un fluido incompresible es cualquier fluido cuya densidad siempre permanece constante con el tiempo, y tiene la capacidad de oponerse a la compresión del mismo bajo cualquier condición.

La densidad se utiliza para determinar si un fluido es incompresible o compresible. Si la densidad del fluido es fija (constante), el fluido es incompresible; esto quiere decir que ni la masa ni el volumen del fluido puede cambiar.

### 2.5.2 El teorema de Bernoulli

El principio de Bernoulli, también denominado ecuación de Bernoulli o Trinomio de Bernoulli, describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente. Fue expuesto por Daniel Bernoulli en su obra Hidrodinámica (1738) y expresa que en un fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento) en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido y posee tres tipos de energía diferentes.

- **Energía hidrostática**,  $(p \cdot v)$ ,  $p$ : presión,  $v$ : volumen del líquido.
- **Energía potencial o estática**,  $(mgh)$ , debido a la altura respecto a un nivel cero de referencia,  $h$ : altura,  $g$ : gravedad,  $m$ : masa del líquido.
- **Energía cinética o hidrodinámica**,  $(1/2mv^2)$ , a causa de su velocidad,  $v$ : velocidad,  $m$ : masa del líquido.

El teorema de Bernoulli explica, por ejemplo, la fuerza de sustentación que actúa sobre el ala de un avión en vuelo. Para explicar la creación de la fuerza de levantamiento o sustentación, Bernoulli relaciona el aumento de la velocidad del flujo del fluido con la disminución de presión y viceversa.

Un líquido no viscoso, en régimen laminar, de acuerdo al principio de conservación de energía, cumple que la suma de las tres energías es constante a lo largo de la conducción.

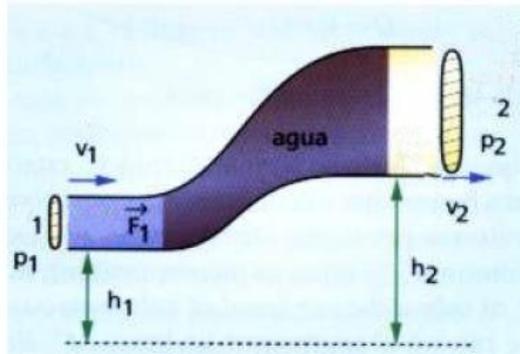


Figura II.9 Teorema de Bernoulli

$$p_1 \cdot V_1 + m \cdot g \cdot h_1 + \frac{1}{2} m \cdot v_1^2 = p_2 \cdot V_2 + m \cdot g \cdot h_2 + \frac{1}{2} m \cdot v_2^2$$

(Ecuación II.7)

Pongamos esta ecuación en función de la densidad  $d=m/v$ .

$$p_1 + d \cdot g \cdot h_1 + \frac{1}{2} d \cdot v_1^2 = p_2 + d \cdot g \cdot h_2 + \frac{1}{2} d \cdot v_2^2$$

(Ecuación II.8)

Supongamos que las condiciones hidráulicas se mantienen todas a la misma altura, en posición horizontal, en este caso  $h_1=h_2$ , con lo cual,  $dgh_1=dgh_2$

La ecuación de Bernoulli se simplifica como:

$$p_1 + \frac{1}{2} d \cdot v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} d \cdot v_2^2$$

(Ecuación II.9)

**Interpretación:** Si la velocidad del fluido disminuye al atravesar una conducción, la presión del fluido aumenta. Por el contrario, si la velocidad del fluido aumenta, la presión del fluido disminuye.

### 2.5.3 Flujos viscosos: movimiento laminar y turbulento

Los primeros experimentos cuidadosamente documentados del rozamiento en flujos de baja velocidad a través de tuberías fueron realizados independientemente en 1839 por el fisiólogo francés Jean Louis Marie Poiseuille, que estaba interesado por las características del flujo de la sangre y en 1840 por el ingeniero hidráulico alemán Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen. El primer intento de incluir los efectos de la viscosidad en las ecuaciones matemáticas se debió al ingeniero francés Claude Louis Marie Navier en 1827 e, independientemente, al matemático británico George Gabriel Stokes, quien en 1845 perfeccionó las ecuaciones básicas para los fluidos viscosos incompresibles. Actualmente se las conoce como ecuaciones de Navier-Stokes, y son tan complejas que sólo se pueden aplicar a flujos sencillos. Uno de ellos es el de un fluido real que circula a través de una tubería recta. El teorema de Bernoulli no se puede aplicar aquí, porque parte de la energía mecánica total se disipa como consecuencia del rozamiento viscoso, lo que provoca una caída de presión a lo largo de la tubería.

Las ecuaciones sugieren que, dados una tubería y un fluido determinados, ésta caída de presión debería ser proporcional a la velocidad de flujo. Los experimentos realizados por primera vez a mediados del siglo XIX demostraron que esto sólo era cierto para velocidades bajas; para velocidades mayores, la caída de presión era más bien proporcional al cuadrado de la velocidad.

Este problema no se resolvió hasta 1883, cuando el ingeniero británico Osborne Reynolds demostró la existencia de dos tipos de flujo viscoso en tuberías. A velocidades bajas, las partículas del fluido siguen las líneas de corriente (flujo laminar), y los resultados experimentales coinciden con las predicciones analíticas. A velocidades más elevadas, surgen fluctuaciones en la velocidad del flujo, o remolinos (flujo turbulento), en una forma que ni siquiera en la actualidad se puede predecir completamente.

Reynolds también determinó que la transición del flujo laminar a turbulento era función de un único parámetro, que desde entonces se conoce como número de Reynolds.

Si el número de Reynolds que carece de dimensiones es el producto de la velocidad, la densidad del fluido y el diámetro de la tubería dividido entre la viscosidad del fluido es menor de 2.100, el flujo a través de la tubería es siempre laminar; cuando los valores son más elevados suele ser turbulento. El concepto de número de Reynolds es esencial para gran parte de la moderna mecánica de fluidos.

Según James A. Fay: “Los flujos turbulentos no se pueden evaluar exclusivamente a partir de las predicciones calculadas, y su análisis depende de una combinación de datos experimentales y modelos matemáticos”. Gran parte de la investigación moderna en mecánica de fluidos está dedicada a una mejor formulación de la turbulencia. Puede observarse la transición del flujo laminar al turbulento y la complejidad del flujo turbulento cuando el humo de un cigarrillo asciende en aire muy tranquilo. Al principio, sube con un movimiento laminar a lo largo de líneas de corriente, pero al cabo de cierta distancia se hace inestable y se forma un sistema de remolinos entrelazados.

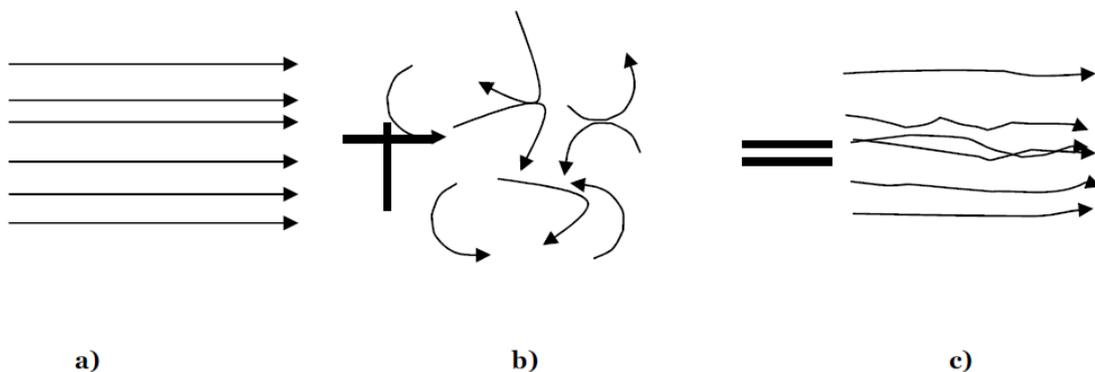


Figura II.10. a) Flujo principal b) Remolinos c) Flujo turbulento.

#### 2.5.4 Número de Reynolds

El número de Reynolds es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos, diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido.

Como todo número adimensional es un cociente, una comparación. En éste caso es la relación entre los términos convectivos y los términos viscosos de las ecuaciones que gobiernan el movimiento de los fluidos.

El número de Reynolds permite predecir el carácter turbulento o laminar en ciertos casos. Así por ejemplo en conductos si el número de Reynolds es menor de 2000 el flujo será laminar y si es mayor de 4000 el flujo será turbulento. El mecanismo y muchas de las razones por las cuales un flujo es laminar o turbulento es todavía hoy objeto de especulación.

- Para valores de  $Re \leq 2000$  el flujo se mantiene estacionario y se comporta como si estuviera formado por láminas delgadas, que interactúan solo en base a esfuerzos tangenciales, por eso a éste flujo se le llama flujo laminar. El colorante introducido en el flujo se mueve siguiendo una delgada línea paralela a las paredes del tubo.
- Para valores de  $2000 < Re < 4000$  la línea del colorante pierde estabilidad formando pequeñas ondulaciones variables en el tiempo, manteniéndose sin embargo delgada. Este régimen se denomina de transición.
- Para valores de  $Re \geq 4000$ , después de un pequeño tramo inicial con oscilaciones variables, el colorante tiende a difundirse en todo el flujo. Este régimen es llamado turbulento; es decir caracterizado por un movimiento desordenado, no estacionario y tridimensional.

Este número recibe su nombre en honor de Osborne Reynolds (1842-1912), el mismo viene dado por siguiente fórmula:

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu} \quad (\text{Ecuación II.10})$$

$$Re = \frac{v_s D}{\nu} \quad (\text{Ecuación II.11})$$

Donde:

$\rho$ : densidad del fluido

$V_s$ : velocidad característica del fluido

$D$ : Diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido

$\mu$ : viscosidad dinámica del fluido

$\nu$ : viscosidad cinemática del fluido

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} .$$

(Ecuación II.12)

### 2.5.5 Flujos compresibles

El interés por los flujos compresibles comenzó con el desarrollo de las turbinas de vapor por el inventor británico Charles Algernon Parsons y el ingeniero sueco Carl Gustaf Patrik de Laval durante la década de 1880. En esos mecanismos se descubrió por primera vez el flujo rápido de vapor a través de tubos, y la necesidad de un diseño eficiente de turbinas llevó a una mejora del análisis de los flujos compresibles.

Pero los avances modernos tuvieron que esperar al estímulo que supuso el desarrollo de la turbina de combustión y la propulsión a chorro en la década de 1930. El interés por los flujos de alta velocidad sobre superficies surgió de forma temprana en los estudios de balística, donde se necesitaba comprender el movimiento de los proyectiles. Los avances más importantes comenzaron hacia el final del siglo XIX, con Prandtl y sus discípulos, entre otros, y crecieron con la introducción de los aviones de alta velocidad y los cohetes en la II Guerra Mundial.

Uno de los principios básicos del flujo compresible es que la densidad de un gas cambia cuando el gas se ve sometido a grandes cambios de velocidad y presión.

Al mismo tiempo, su temperatura también cambia, lo que lleva a problemas de análisis más complejos.

El comportamiento del flujo de un gas compresible depende de si la velocidad de flujo es mayor o menor que la velocidad del sonido. El sonido es la propagación de una pequeña perturbación, u onda de presión, dentro de un fluido. Para un gas, la velocidad del sonido es proporcional a la raíz cuadrada de su temperatura absoluta. La velocidad del sonido en el aire a 20 °C es de unos 344 metros por segundo. Si la velocidad de flujo es menor que la velocidad del sonido (flujo subsónico), las ondas de presión pueden transmitirse a través de todo el fluido y así adaptar el flujo que se dirige hacia un objeto. Por tanto, el flujo subsónico que se dirige hacia el ala de un avión se ajustará con cierta distancia de antelación para fluir suavemente sobre la superficie. En el flujo supersónico, las ondas de presión no pueden viajar corriente arriba para adaptar el flujo. Por ello, el aire que se dirige hacia el ala de un avión en vuelo supersónico no está preparado para la perturbación que va a causar el ala y tiene que cambiar de dirección repentinamente en la proximidad del ala, lo que conlleva una compresión intensa u onda de choque. El ruido asociado con el paso de ésta onda de choque sobre los observadores situados en tierra constituye el estampido sónico de los aviones supersónicos. Frecuentemente se identifican los flujos supersónicos por su número de Mach, que es el cociente entre la velocidad de flujo y la velocidad del sonido. Por tanto, los flujos supersónicos tienen un número de Mach superior a 1.

### 2.5.6 Ley de Poiseuille

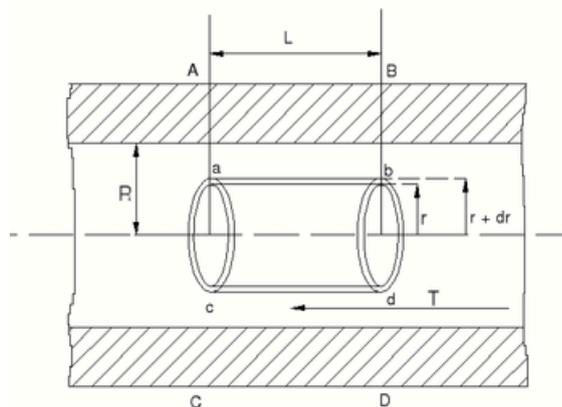


Figura II.11 Flujo viscoso dentro de una tubería de radio  $R$  y longitud  $L$ .

Se considera ahora un fluido viscoso que circula en régimen laminar por una tubería de radio interior  $R$ , y de longitud  $L$ , bajo la acción de una fuerza debida a la diferencia de presión existente en los extremos del tubo.

Entonces:

$$F = (p_1 - p_2) \pi r^2$$

(Ecuación II.13)

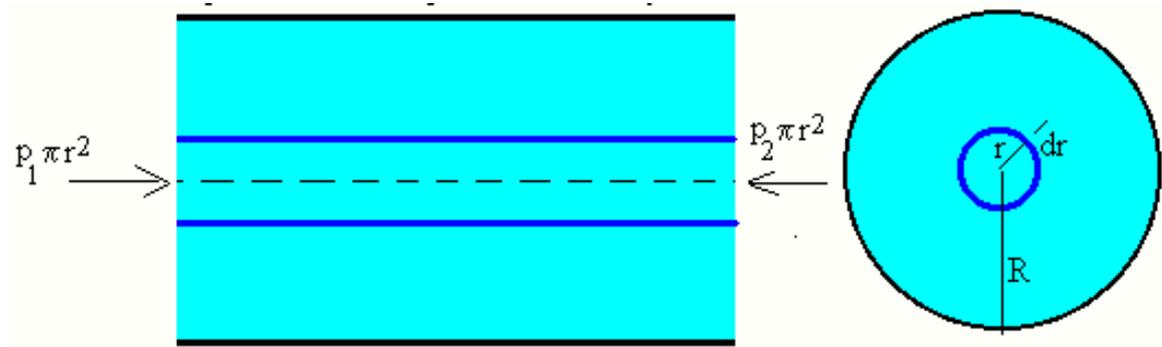


Figura II.12 Capa de fluido comprendida entre  $r$  y  $r+dr$ .

Sustituyendo  $F$  en la fórmula (1) y teniendo en cuenta que el área  $A$  de la capa es ahora el área lateral de un cilindro de longitud  $L$  y radio  $r$ .

$$\frac{(p_1 - p_2) \pi r^2}{2 \pi r L} = -\eta \frac{dv}{dr}$$

(Ecuación II.14)

El signo negativo se debe a que  $v$  disminuye al aumentar  $r$ .

### 2.5.7 Perfil de velocidades

Integrando ésta ecuación, se obtiene el perfil de velocidades en función de la distancia radial, al eje del tubo. Se ha de tener en cuenta que la velocidad en las paredes del tubo  $r=R$  es nula.

$$-\int_v^0 dv = \frac{P_1 - P_2}{2\eta L} \int_r^R r dr \quad (\text{Ecuación II.15})$$

$$v = \frac{P_1 - P_2}{4\eta L} (R^2 - r^2) \quad (\text{Ecuación II.16})$$

Que es la ecuación de una parábola.

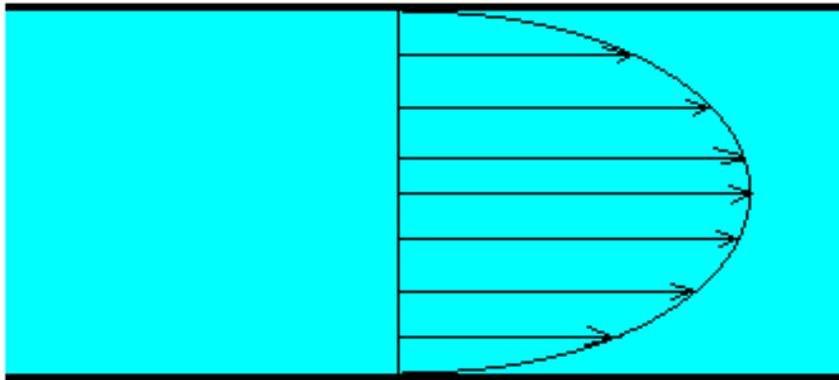


Figura II.13 Perfil de velocidades.

El flujo tiene por tanto un perfil de velocidades parabólico, siendo la velocidad máxima en el centro del tubo.

## 2.6 TEORÍA DE LA MEDICIÓN DE CAUDALES Y VOLÚMENES DE AGUA E INSTRUMENTAL NECESARIO DISPONIBLE EN EL MERCADO

La selección eficaz de un medidor de caudal exige un conocimiento práctico de la tecnología del medidor, además de un profundo conocimiento del proceso y del fluido que se quiere medir.

Cuando la medida del caudal se utiliza con el propósito de facturar un consumo, deberá ser lo más precisa posible, teniendo en cuenta el valor económico del fluido que pasa a través del medidor, y la legislación obligatoria aplicable en cada caso.

Existen dos tipos de medidores, los volumétricos para la medida general de caudal y los medidores de caudal másico, destinados para aquellas aplicaciones en que la exactitud de la medida es importante.

Entre los principales medidores volumétricos se tiene: Presión diferencial, Área variable, Fuerza, Desplazamiento positivo, Velocidad, Tensión inducida, Torbellino y Oscilante.

Entre los principales medidores de caudal másico se tiene: Compensación de presión y temperatura en medidores volumétricos, Térmico, Momento y Fuerza de Coriolis.

Se analizará el medidor tipo turbina, basado en la medición de velocidad, puesto que el módulo didáctico de control de flujo será implementado con éste medidor.

Los medidores de caudal másico no serán objeto de análisis.

## **2.6.1 Medidores volumétricos**

### **2.6.1.1 Medidores de presión diferencial**

La medida de caudal en conducciones cerradas, consiste en la determinación de la cantidad de masa o volumen que circula por el conducto por unidad de tiempo.

Los instrumentos que llevan a cabo la medida de un caudal se denominan, habitualmente, caudalímetros o medidores de caudal, constituyendo una modalidad particular los contadores, los cuales integran dispositivos adecuados para medir y justificar el volumen que ha circulado por la conducción.

Los medidores de caudal volumétrico pueden determinar el caudal de volumen de fluido de dos formas:

- **Directamente**, mediante dispositivos de desplazamiento positivo, o
- **Indirectamente**, mediante dispositivos de: presión diferencial, área variable, velocidad, fuerza, etc.

Puesto que la medida de caudal volumétrico en la industria se realiza, generalmente, con instrumentos que dan lugar a una presión diferencial al paso del fluido. Esta clase de medidores presenta una reducción de la sección de paso del fluido, dando lugar a que el fluido aumente su velocidad, lo que origina un aumento de su energía cinética y, por consiguiente, su presión tiende a disminuir en una proporción equivalente, de acuerdo con el principio de la conservación de la energía, creando una diferencia de presión estática entre las secciones aguas arriba y aguas abajo del medidor.

#### Principales medidores de presión diferencial

Entre los principales tipos de medidores de presión diferencial se pueden destacar los siguientes:

- Placas de orificio,
- Toberas,
- Tubos Venturi,
- Tubos Pitot,
- Tubos Annubar,

Se estima que, actualmente, al menos un 75% de los medidores industriales en uso son dispositivos de presión diferencial, siendo el más popular el de placa orificio.

Las principales ventajas de dichos medidores son:

Su sencillez de construcción, no incluyendo partes móviles, su funcionamiento se comprende con facilidad, no son caros, particularmente si se instalan en grandes tuberías y se comparan con otros medidores.

Pueden utilizarse para la mayoría de los fluidos, y hay abundantes publicaciones sobre sus diferentes usos.

Sus principales desventajas son:

La amplitud del campo de medida es menor que para la mayoría de los otros tipos de medidores, pueden producir pérdidas de carga significativas, la señal de salida no es

lineal con el caudal, deben respetarse unos tramos rectos de tubería aguas arriba y aguas abajo del medidor que, según el trazado de la tubería y los accesorios existentes, pueden ser grandes, pueden producirse efectos de envejecimiento, es decir, acumulación de depósitos o la erosión de las aristas vivas, la precisión suele ser menor que la de medidores más modernos, especialmente si, como es habitual, el medidor se entrega sin calibrar.

### 2.6.1.2 Medidores de área variable

Los medidores de área variable funcionan sobre la base de mantener una presión diferencial constante, permitiendo aumentar el área eficaz de flujo con el caudal. Existen varios tipos de medidores de orificio variable, pero el más utilizado es el que está formado por un tubo cónico de eje vertical y un flotador. Como se muestra en la Figura II.14, el fluido circula en sentido ascendente por el tubo desplazando un flotador que, habitualmente, lleva unas ranuras que dan lugar a que el flotador gire, proporcionándole la estabilidad y efecto de centrado necesario. Esta rotación es la que ha dado origen al nombre de rotámetro.

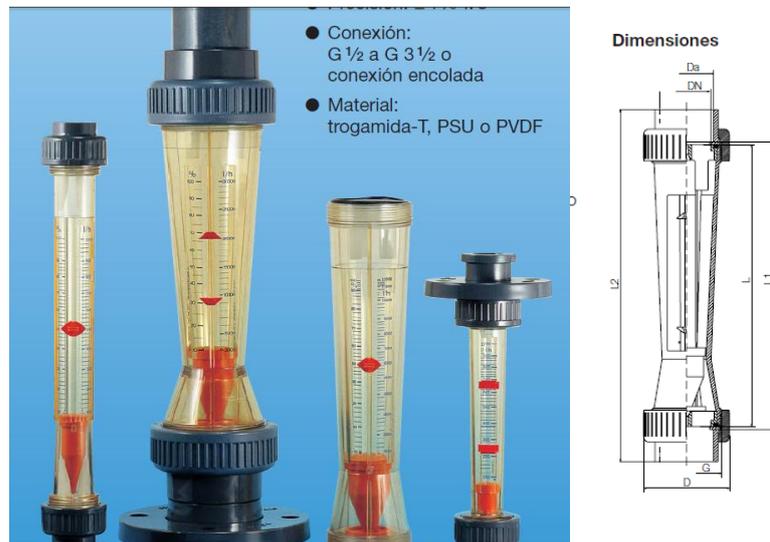


Figura II.14 Rotámetro de tubo de vidrio cónico y flotador.

Cuando no hay flujo el flotador descansa en la parte baja del tubo, pero al pasar el fluido hace ascender el flotador de su posición de reposo, a fin de mantener la caída de presión a través del flotador en equilibrio con los efectos de empuje hidrostático y

gravitatorio que actúan sobre el mismo. Puesto que el peso del flotador sumergido es una constante para un fluido dado, la caída de presión también tiene que permanecer constante. Por consiguiente, cuando el caudal aumenta, el flotador ascenderá en el tubo con el fin de proporcionar una sección anular de paso mayor, para que el fluido pueda pasar a través de ella.

La altura que alcanza el flotador es así una indicación del caudal que está pasando y, en el caso de tratarse de un tubo transparente, puede graduarse directamente sobre el tubo en unidades de caudal. Cuando las condiciones de trabajo son más severas, el tubo se fabrica de metal.

La precisión que puede conseguirse con los medidores de área variable no suele ser mejor que  $\pm 2\%$  de desviación a plena escala, por lo que no son aconsejables cuando se requiere una elevada precisión.

### 2.6.1.3 Medidores de fuerza

Placa de impacto.

El principio de funcionamiento del medidor de placa de resistencia al avance de la corriente se muestra en la Figura II.15.

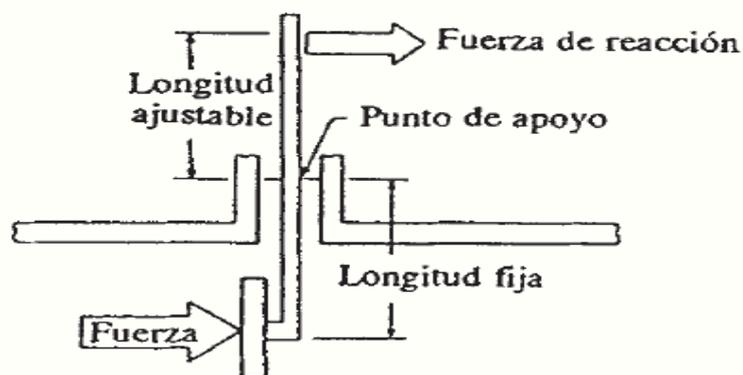


Figura II.15 El principio de funcionamiento del medidor de placa de resistencia.

Una placa circular se mantiene en el centro de la tubería por medio de una barra normal al flujo. Teniendo en cuenta que la aceleración del fluido en el espacio anular entre la

placa y la tubería crea una presión reducida sobre la cara aguas abajo de la placa, la fuerza ejercida por el fluido sobre la placa será la diferencia entre las presiones sobre las superficies aguas arriba y aguas abajo de la placa, la cual tiende a mover la placa en la dirección del flujo. A ésta fuerza se opone un par antagonista producido por la articulación, y el movimiento es detectado por un elemento secundario, es decir, un transmisor neumático de equilibrio de fuerzas o un transductor eléctrico de galgas extensométricas, situado al final de la barra soporte. La señal del dispositivo de equilibrio de fuerzas es proporcional a la fuerza sobre la placa, y por tanto proporcional al cuadrado del caudal.

Presenta la ventaja de no precisar conexiones para la medida de la presión diferencial, pero debido a la fuerza que tiene que soportar el sistema de equilibrio de fuerzas, está limitada a tamaños de tubería hasta 100 mm.

#### **2.6.1.4 Medidores de desplazamiento positivo**

Los medidores de desplazamiento positivo miden la cantidad de fluido que circula por un conducto, dividiendo el flujo en volúmenes separados y sumando los volúmenes que pasan a través del medidor.

En cada medidor, se pueden destacar tres componentes comunes:

Cámara, que se encuentra llena de fluido, desplazador, que, bajo la acción del fluido circulando, transfiere el fluido desde el final de una cámara a la siguiente, y mecanismo (indicador o registrador), conectado al desplazador, que cuenta el número de veces que el desplazador se mueve de una parte a otra en la cámara de trabajo.

Un problema importante que se debe tener en cuenta al fabricar un medidor de desplazamiento positivo es conseguir una buena estanqueidad de las partes móviles, evitando un par de rozamiento inaceptable y que la cantidad de líquido de escape a través del medidor sea moderada. Por ésta razón, es necesario calibrar el medidor de desplazamiento a varios caudales, dentro del margen de utilización, con un fluido de viscosidad conocida.

## **Medidores de desplazamiento positivo para líquidos**

En principio, los medidores de desplazamiento positivo para gases deberían ser similares a los utilizados para líquidos, sin embargo, en la práctica hay una diferencia importante. La energía de un fluido en movimiento es proporcional a su densidad, lo que significa que un gas no puede suministrar con facilidad la energía suficiente para hacer funcionar un medidor con una mecánica compleja.

Por consiguiente, los medidores de desplazamiento positivo para gases tienen que tener una baja resistencia a la fricción.

Dentro de los diferentes tipos de medidores para líquidos se considerarán los siguientes:

- Medidores de tipo pistón,
- Medidores de paletas deslizantes, y
- Medidores de engranajes.

Los medidores de tipo pistón se utilizan, habitualmente, para medidas precisas de pequeños caudales, siendo una de sus aplicaciones en unidades de bombeo de distribución de petróleo. Los medidores de paletas deslizantes se usan para medir líquidos de elevado coste, siendo instalados, generalmente, en camiones cisternas para la distribución de combustible para la calefacción. Los medidores de engranajes encuentran aplicaciones para un amplio margen de líquidos y condiciones de funcionamiento, aunque la precisión de la medida no es tan elevada.

### **2.6.1.5 Medidor de velocidad**

#### **Medidores de turbina**

Los medidores para gas y para líquido funcionan bajo el mismo principio. La Figura II.16 muestra la sección transversal de un medidor de turbina típico para líquidos. Consta de una longitud de tubería en el centro de la cual hay un rotor de paletas múltiple, montado sobre cojinetes, para que pueda girar con facilidad, y soportado aguas arriba y aguas abajo por un dispositivo de centrado tipo cruceta que, habitualmente, incorpora un enderezador de la vena fluida. La energía cinética del fluido circulando

hace girar el rotor con una velocidad angular que, en el margen lineal del medidor, es proporcional a la velocidad media axial del fluido y, por tanto, al caudal volumétrico.

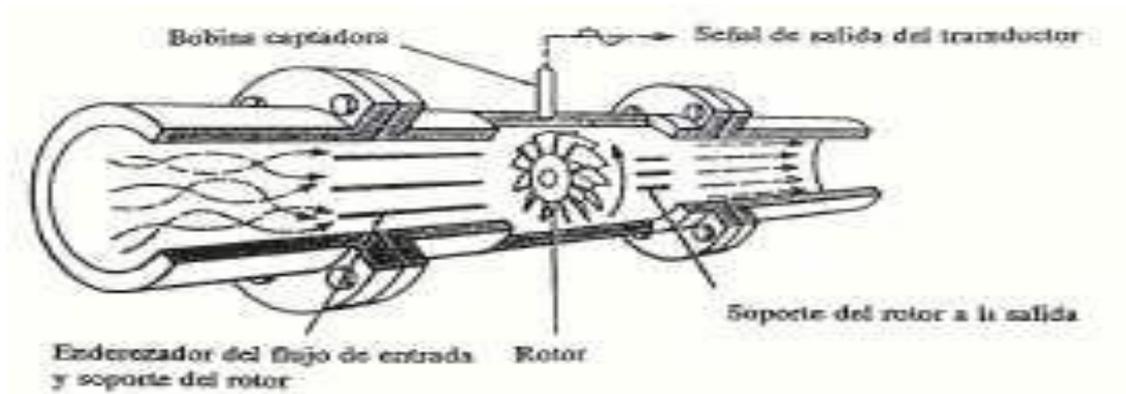


Figura II.16 Sección transversal de un medidor de turbina para líquidos.

Una teoría sencilla sobre el funcionamiento de los medidores de turbina puede comprenderse mediante la Figura II.17, que muestra un diagrama simplificado de la velocidad para una paleta de un medidor ideal.

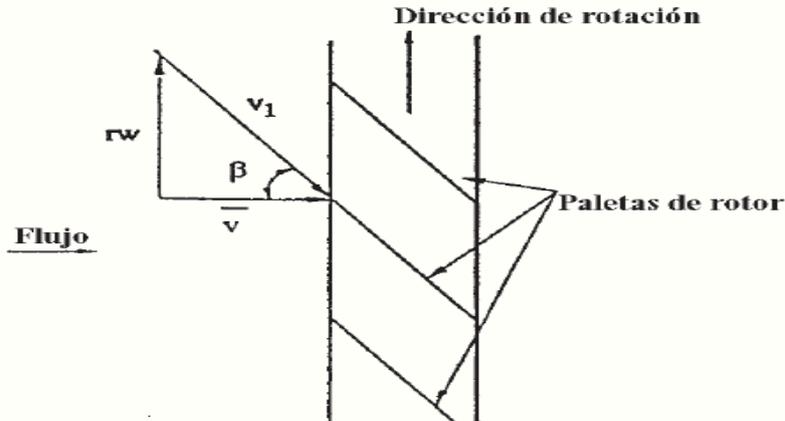


Figura II.17 Diagrama simplificado de la velocidad para un medidor de turbina ideal.

Los medidores de turbina para gas o líquido difieren fundamentalmente en el diseño del rotor.

Una salida mediante impulsos eléctricos se produce cuando se detecta el paso de cada paleta alrededor de uno o más sensores situados en el campo del medidor.

El punto más débil en un medidor de turbina para líquidos son los cojinetes, ya que tienen que soportar el peso del rotor.

Para predecir la característica de comportamiento de un medidor de turbina es necesario que sea calibrado, de modo que la relación entre el número de impulsos emitidos y el volumen de fluido que ha pasado pueda determinarse experimentalmente. Esto da como resultado una curva de calibración de la forma mostrada en la Figura II.18.

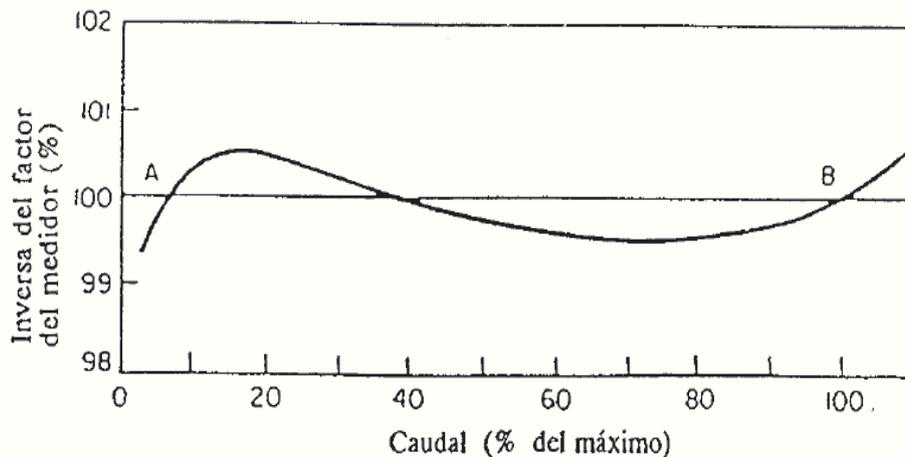


Figura II.18 Curva de comportamiento de un medidor de turbina para líquidos.

Se puede estimar que en el margen entre los puntos A y B el medidor de turbina tiene una salida lineal y el volumen de líquido que pasa a través del medidor es casi proporcional al número de impulsos recibidos, dejando de ser preciso para caudales inferiores al punto A y superiores al B.

#### 2.6.1.6 Medidores de tensión inducida

##### Medidores de caudal electromagnéticos

El medidor de caudal electromagnético utiliza el mismo principio básico que el electro generador, es decir, cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético se genera una fuerza electromotriz en el conductor, siendo su magnitud directamente proporcional a la velocidad media del conductor en movimiento. Si el conductor es una sección de un líquido conductor circulando por un tubo aislado eléctricamente, a través de un campo magnético y se montan los electrodos diametralmente opuestos en la pared

de la tubería, tal como se muestra en la Figura II.19, la fuerza electromotriz generada a través de los electrodos es directamente proporcional a la velocidad media del fluido.

Es importante señalar que la diferencia de potencial entre los electrodos es del orden de milivoltios, por lo que dicha señal tiene que ser amplificada mediante un dispositivo secundario denominado convertidor, que proporciona una señal de salida en miliamperios, en voltios o en impulsos.

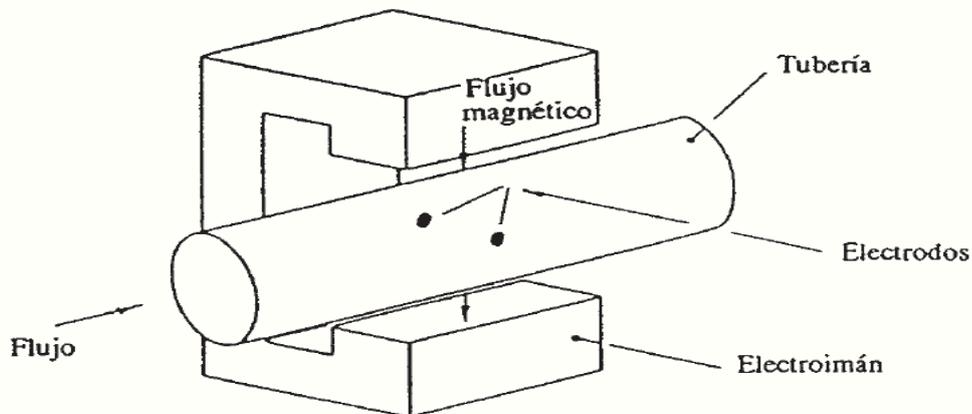


Figura II.19 Elementos de un medidor electromagnético.

Puesto que los electrodos tienen que hacer un contacto con el fluido, su material tiene que ser compatible con las propiedades químicas del fluido que circula.

Entre los materiales más utilizados se pueden citar los siguientes: acero inoxidable no magnético, platino/iridio, monel, hasteloy, titanio, y circonio para líquidos particularmente agresivos.

Entre las ventajas más fundamentales se pueden señalar las siguientes:

- No presentan obstrucciones al flujo, por lo que son adecuados para la medida de todo tipo de suspensiones, barros, melazas, etc.

- No dan lugar a pérdidas de carga, por lo que son adecuados para su instalación en grandes tuberías de suministro de agua, donde es esencial que la pérdida de carga sea pequeña.
- Se fabrican en una gama de tamaños superior a la de cualquier otro tipo de medidor.
- No son prácticamente afectados por variaciones en la densidad, viscosidad, presión temperatura y dentro de ciertos límites conductividad eléctrica.
- No son seriamente afectados por perturbaciones del flujo aguas arriba del medidor.
- La señal de salida es, habitualmente, lineal.
- Pueden utilizarse para la medida del caudal en cualquiera de las dos direcciones.

Entre las desventajas se pueden destacar las siguientes:

- El líquido cuyo caudal se mide tiene que tener una razonable conductividad eléctrica.
- El costo de estos medidores es muy elevado respecto al de los anteriores.

## **2.7 BOMBAS**

Siempre que se trate temas como procesos químicos, o de cualquier circulación de fluidos se está, de alguna manera, entrando en el tema de bombas. El funcionamiento en si de la bomba es el de un convertidor de energía; es decir, transformar la energía mecánica en energía cinética, generando presión y velocidad en el fluido.

Existen muchos tipos de bombas para diferentes aplicaciones.

Los factores más importantes que permiten escoger un sistema de bombeo adecuado son: presión final, presión de proceso, velocidad de bombeo, tipo de fluidos a bombear (la eficiencia de cada bomba varía según el tipo de fluido).

### **2.7.1 Clasificación**

Según el principio de funcionamiento

La principal clasificación de las bombas se realiza atendiendo al principio de funcionamiento en el que se basan:

- Bombas de desplazamiento positivo o volumétrico.
- Bombas rotodinámicas

### 2.7.1.1 Bombas de desplazamiento positivo o volumétrico

Su principio de funcionamiento está basado en la hidrostática, de modo que el aumento de presión se realiza por el empuje de las paredes de las cámaras que varían su volumen. En este tipo de bombas, en cada ciclo el órgano propulsor genera de manera positiva un volumen dado o cilindrada, por lo que también se denominan bombas volumétricas. En caso de poder variar el volumen máximo de la cilindrada se habla de bombas de volumen variable. Si ese volumen no se puede variar, entonces se dice que la bomba es de volumen fijo. A su vez este tipo de bombas pueden subdividirse en:

- **Bombas de émbolo alternativo**, en las que existe uno o varios compartimentos fijos, pero de volumen variable, por la acción de un émbolo o de una membrana. En estas máquinas, el movimiento del fluido es discontinuo y los procesos de carga y descarga se realizan por válvulas que abren y cierran alternativamente.

Algunos ejemplos de este tipo de bombas son la bomba alternativa de pistón, la bomba rotativa de pistones o la bomba pistones de accionamiento axial.

- **Bombas volumétricas rotativas o rotoestáticas**, en las que una masa fluida es confinada en uno o varios compartimentos que se desplazan desde la zona de entrada (de baja presión) hasta la zona de salida (de alta presión) de la máquina. Algunos ejemplos de este tipo de máquinas son la bomba de paletas, la bomba de lóbulos, la bomba de engranajes, la bomba de tornillo o la bomba peristáltica.

### 2.7.1.2 Bombas fotodinámicas

Su principio de funcionamiento está basado en el intercambio de cantidad de movimiento entre la máquina y el fluido, aplicando la hidrodinámica. En éste tipo de bombas hay uno o varios rodets con álabes que giran generando un campo de presiones

en el fluido. En éste tipo de máquinas el flujo del fluido es continuo. Estas turbomáquinas hidráulicas generadoras pueden subdividirse en:

- **Radiales o centrífugas**, cuando el movimiento del fluido sigue una trayectoria perpendicular al eje del rodete impulsor.
- **Axiales**, cuando el fluido pasa por los canales de los álabes siguiendo una trayectoria contenida en un cilindro.
- **Diagonales o helicocentrífugas** cuando la trayectoria del fluido se realiza en otra dirección entre las anteriores, es decir, en un cono coaxial con el eje del rodete.

Se estudiará, en forma particular, la bomba centrífuga por ser la bomba utilizada en el módulo didáctico de control de flujo.

### Bombas centrífuga

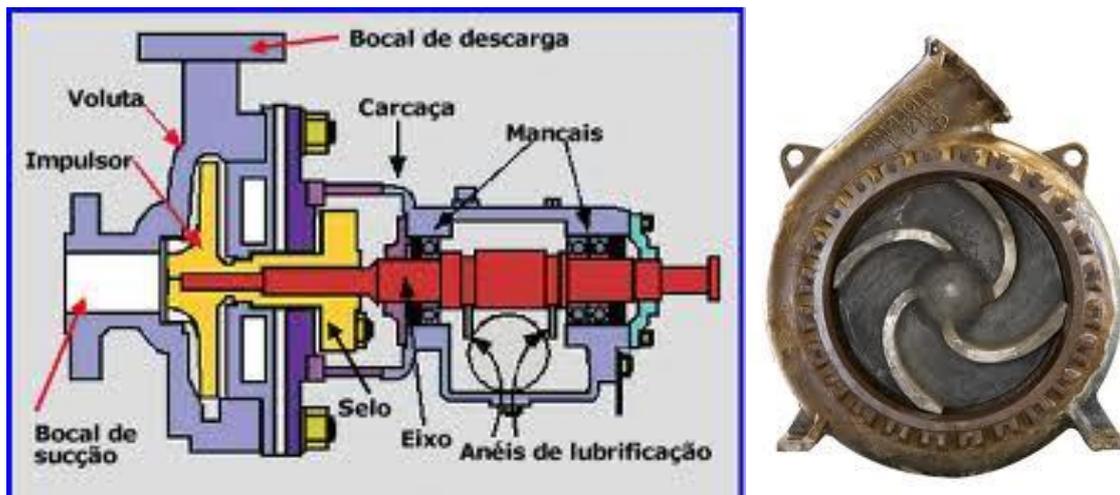


Figura II.20 Bomba centrífuga.

Son el tipo más corriente de bombas rotodinámicas, y se denomina así porque la cota de presión que crean es ampliamente atribuible a la acción centrífuga. Pueden impulsar caudales tan pequeños como 1 gal/min. o tan grandes como 4.000.000 gal/min, mientras que la cota generada puede variar desde algunos pies hasta 400. El rendimiento de las de mayor tamaño puede llegar al 90%. El rodete consiste en cierto número de

álabes curvados en dirección contraria al movimiento y colocados entre dos discos metálicos.

El agua entra por el centro u ojo del rodete y es arrastrada por los álabes y lanzada en dirección radial. Esta aceleración produce un apreciable aumento de energía de presión y cinética. A la salida, el movimiento del fluido tiene componentes radial y transversal.

Para que no haya una pérdida notable de energía, y por tanto de rendimiento, es esencial transformar en la mayor medida posible la considerable cota cinemática a la salida del rodete en la más útil cota de presión.

Normalmente, esto se consigue construyendo la carcasa en forma de espiral, con lo que la sección del flujo en la periferia del rodete va aumentando gradualmente.

Para caudales grandes se usa el rodete de doble aspiración, que es equivalente a dos rodetes de simple aspiración ensamblados dorso con dorso; ésta disposición permite doblar la capacidad sin aumentar el diámetro del rodete.

Es más cara de fabricar, pero tiene la ventaja adicional de solucionar el problema del empuje axial.

En ambos casos, las superficies de guía están cuidadosamente pulimentadas para minimizar las pérdidas por rozamiento.

El montaje es generalmente horizontal, ya que así se facilita el acceso para el entretenimiento. Sin embargo, debido a la limitación del espacio, algunas unidades de gran tamaño se montan verticalmente.

Las proporciones de los rodetes varían dentro de un campo muy amplio, lo que permite hacer frente a una dilatada gama de condiciones de funcionamiento.

Por ejemplo, los líquidos con sólidos en suspensión (aguas residuales) pueden ser bombeados siempre que los conductos sean suficientemente amplios. Inevitablemente habrá alguna disminución de rendimiento. Para que la bomba centrífuga esté en

disposición de funcionar satisfactoriamente, tanto la tubería de aspiración como la bomba misma, han de estar llenas de agua.

Si la bomba se encuentra a un nivel inferior a la del agua del pozo de aspiración, siempre se cumplirá ésta condición, pero en los demás casos hay que expulsar el aire de la tubería de aspiración y de la bomba y reemplazarlo por agua; ésta operación se denomina cebado.

El mero giro del rodete, aún a alta velocidad, resulta completamente insuficiente para efectuar el cebado y sólo se conseguirá recalentar los cojinetes.

Los dos métodos principales de cebado exigen una válvula de retención en la proximidad de la base del tubo de aspiración, o en las unidades mayores, la ayuda de una bomba de vacío.

En el primer caso, se hace entrar el agua de la tubería de impulsión o de cualquier otra procedencia, en el cuerpo de bomba y el aire es expulsado por una llave de purga. Se ha desarrollado una bomba centrífuga, la cual fue concebida, teniendo como objetivos un rendimiento de trabajo que sea óptimo, una gran variedad de aplicaciones y una fácil mantención del equipo.

El cuerpo húmedo de ésta bomba está fabricado en un polímero de grandes cualidades mecánicas y de excelente resistencia química. Estos materiales evitan las incrustaciones de partículas, y además no son afectados por problemas de cavitación.

Las aplicaciones de ésta bomba son de óptimo rendimiento en plantas de ácido, agua de cola, aguas marinas, y en general en lugares con gran concentración de corrosivos. Además tiene una muy buena aplicación en la industria alimenticia dado que no contamina los productos. Las bombas están disponibles en materiales del acerothermoplástico e inoxidable, diseños del mecanismo impulsor para las aplicaciones horizontales y verticales.

La construcción rugosa proporciona una resistencia excelente al producto químico y a la corrosión. Las aplicaciones típicas son proceso químico, laminado de metal, piezas que

lavan sistemas, fabricación de la tarjeta de circuito impresa, foto que procesa, productos farmacéuticos, semiconductores, etc.

### 2.7.2 Punto de operación

El punto de operación es el punto de intersección de la curva de resistencia del sistema y la curva característica cabeza/descarga ( $H/Q$ ) de la bomba, graficadas en el mismo sistema de coordenadas  $H$  Vs.  $Q$  como se muestra en la Figura II.21.

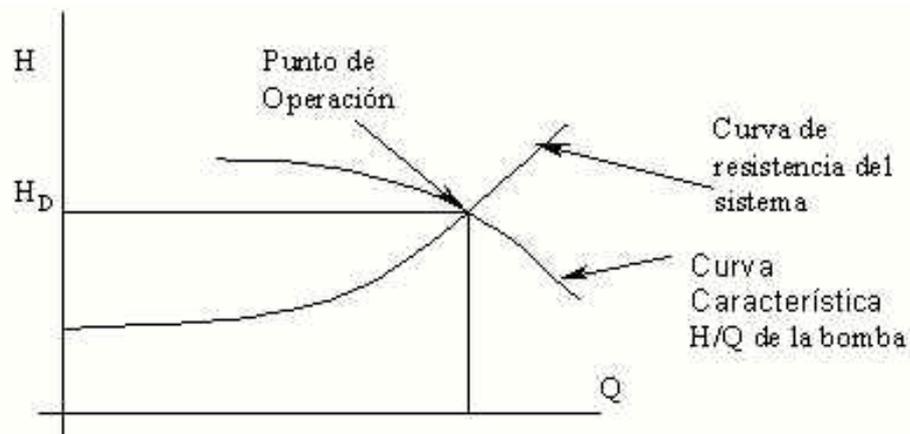


Figura II.21 Punto de operación de una bomba.

No siempre es posible ajustar el sistema a una bomba disponible de tal manera que el punto de operación coincida con el de mayor eficiencia. Las casas manufactureras de bombas suministran diagramas que indican el rango adecuado de operaciones para cada bomba.

### 2.7.3 Curvas de isoeficiencia

Si es posible probar una bomba para diferentes velocidades, la relación  $H/Q$  para cada velocidad puede ser graficada como se muestra en la Figura II.22. Si los valores de eficiencia para los puntos probados se ubican en las curvas  $H/Q$ , entonces las líneas de igual eficiencia se pueden dibujar como se observa y son conocidas como curvas de

isoeficiencia. De ésta manera se muestra en un sólo diagrama la relación entre cabeza, descarga, velocidad y eficiencia.

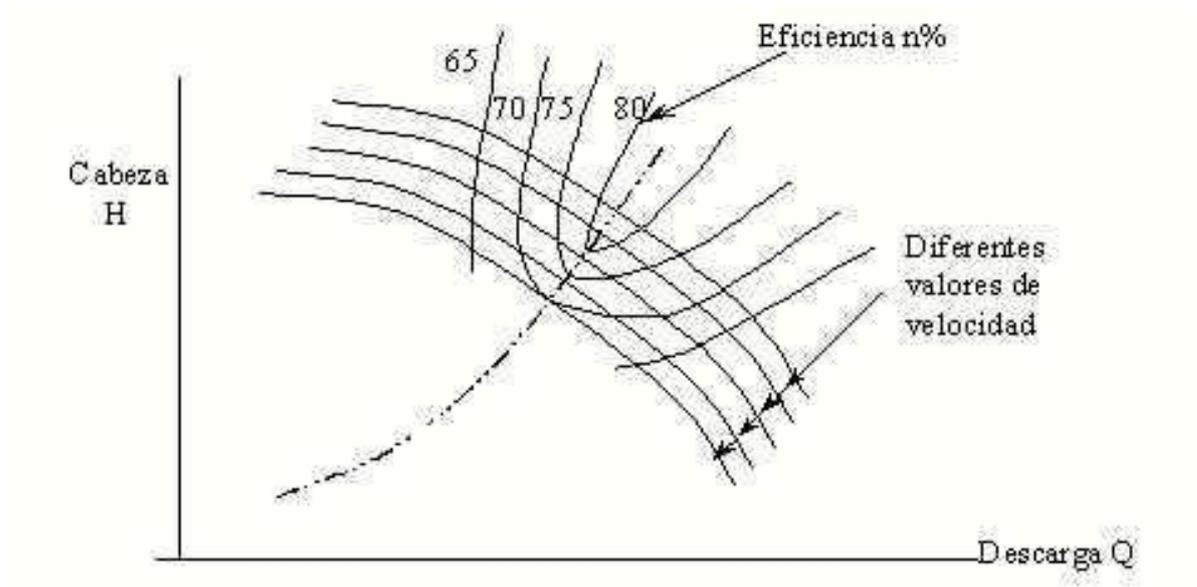


Figura II.22 Curvas de isoeficiencia

## 2.8 descripción de la planta su funcionamiento

El proceso consiste en el transporte de fluido a través de tuberías y está formado por los siguientes elementos: un conjunto de tubería de pvc de  $\frac{3}{4}$ ", sensor de caudal tipo turbina con rango de caudal de 2 a 40 l/min de agua con salida de pulsos en función al caudal, una tarjeta de adquisición de datos MyDAQ de National Instruemntal, una bomba centrífuga, 2 tarjetas electrónicas para el acondicionamiento de señales y activación de indicadores luminosos, variador de velocidad, una válvula de bola y una válvula check de  $\frac{3}{4}$ ", un tanque de suministro de fluido, relé térmico de 10vac y 330 Vac, protecciones e indicadores de luminosos de función.

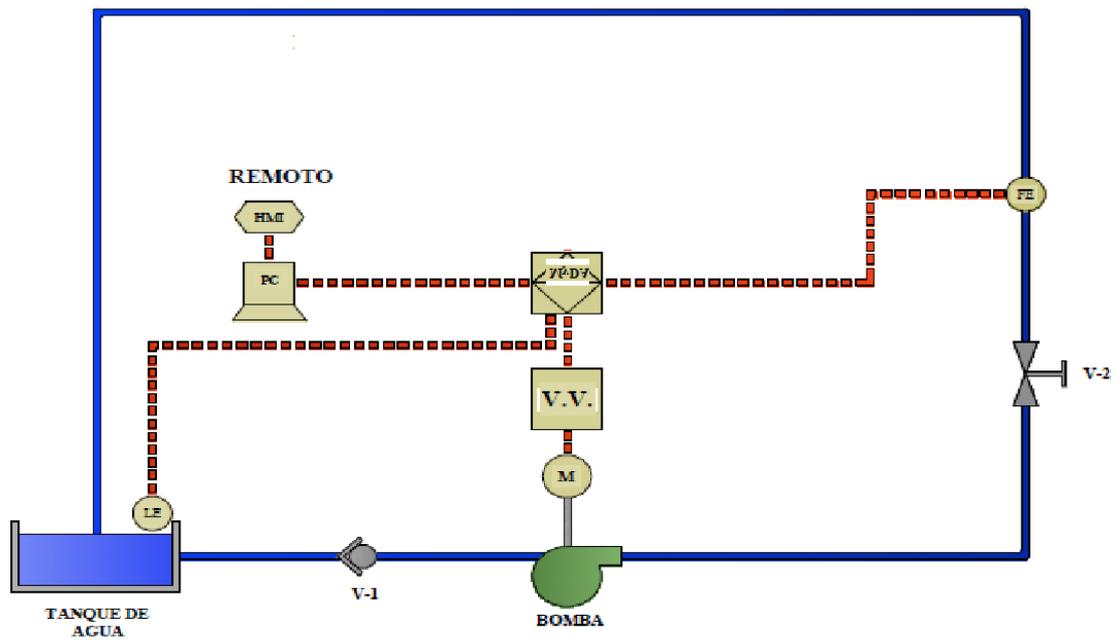


Figura II.23 Esquema del módulo de control de flujo

En la figura III.23 se muestra el diagrama de instrumentación del proceso de caudal, incluye los elementos que está formado así como el lazo de control realimentado.

# CAPÍTULO III

## DISEÑO DEL MÓDULO DE CONTROL DE CUDAL

Teniendo en cuenta el fin didáctico del módulo de control de caudal, se ha procedido a realizar un diseño que procure producir un conjunto dotado de esas características.

### 3.1 ESTRUCTURA DEL MÓDULO CONTROL DE CAUDAL

Para el módulo de control de caudal se optó por un esquema en lazo cerrado con realimentación negativa con los componentes que se muestran en la Figura II.24. En lazo cerrado se trabaja con la señal de error, que es la diferencia entre el punto de consigna “sep point” y la señal realimentada “señal del sensor”, para reducir el error y de esta forma producir a la salida del sistema un valor conveniente. En el Capítulo 4 se realizará el diseño del software del controlador y sus componentes asociados.

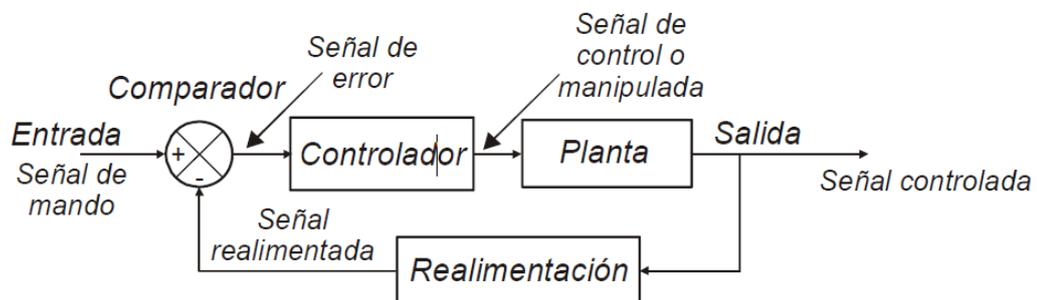


Figura III.24 Control en lazo cerrado implementado para el control de flujo.

Tanto el controlador como el actuador se encuentran ubicados dentro de un panel denominado Panel de Instrumentos, el mismo que también posee las protecciones y accionamientos de encendido y apagado.

El sensor y la planta se encuentran dispuestos en un soporte y tubería de fácil acceso. Para analizar el diseño de cada componente, se ha dividido el módulo didáctico de control de flujo en las siguientes partes.

- Soporte y tubería.
- Instrumentos y protecciones.
- Elementos de Control.
- Conexiones del panel de instrumentos y protecciones.

### **3.1.1 Soporte y tubería**

El soporte fue diseñado pensando en la óptima ubicación de los elementos que van a constituir el módulo, de tal manera que sean de fácil acceso y manipulación. El soporte está hecho de tubo rectangular de hierro de:  $\frac{3}{4}$  de pulgada de 1.5mm de grosor, y dos planchas de MDF de 6 [mm] de grosor. Este conjunto forma una estructura suficiente para soportar el peso del panel de instrumentos, la bomba centrífuga y el tanque de agua que descansan sobre él.

Se ha utilizado tubería circular para transportar el flujo puesto que tiene mayor área con el menor perímetro y por lo tanto requiere menos material para su construcción.

La determinación de la demanda es muy importante debido a que a partir de ésta se establece la capacidad de todos los componentes del módulo de control de flujo. Existen muchos métodos para determinar la demanda de un sistema de suministro de agua, que prevén a futuro variaciones excesivas de la demanda y que están diseñadas en función de la aplicación, del tipo de fluido, entre otros factores.

Sin embargo, considerando las aplicaciones didácticas y de observación de circulación de fluido, además de tomar como referencia el flujo manejado por módulos didácticos contruidos por casas comerciales, se ha decidido trabajar con un flujo máximo de 5 [GPM].

Para evitar ruidos molestos en la tubería se recomienda trabajar con una velocidad no mayor a 2 [m/s] ó 2.5 [m/s].

Teniendo en cuenta la ecuación de la continuidad:

$$A1 * V1 = A2 * V2 = A3 * V3$$

(Ecuación III.1)

O también:

$$Q = A * V$$

(Ecuación III.2)

Donde:

A: es la sección transversal del tubo.

V: velocidad del fluido.

De la ecuación III.2 se deduce que para un flujo máximo de 5 [GPM] y una velocidad de 2.5 [m/s] se necesita una tubería de 0.49 pulgadas de diámetro. Mientras que para una velocidad de 2 [m/s] se necesita una tubería de 0.55 pulgadas.

De estas dos opciones se recomienda utilizar la tubería más grande y así tener capacidad suficiente para poder asumir y compensar los efectos futuros de algún cambio en el proceso y/o obstrucciones de la tubería.

Adicionalmente a lo anterior, al utilizar la tubería de mayor diámetro se disminuye la velocidad de flujo y se alarga la vida útil de la tubería ya que se evitan problemas de abrasión por altas velocidades, si se diera, en el caso que el fluido manejado tenga sólidos en suspensión.

Es por esto que se ha decidido utilizar manguera de  $\frac{3}{4}$  de pulgada. La disposición de la tubería es de tal forma que ésta es de fácil acceso al operador. En la Figura III.25 se observa la disposición del soporte y la tubería.



Figura III.25 Soporte, tubería y panel de instrumentos del módulo de control de flujo.

### 3.1.2 Selección de la bomba centrífuga

La bomba que se seleccionó es de tipo centrífuga. Esta se puede utilizar en el transporte de agua limpia y líquidos químicamente no agresivos. Son aptas especialmente en sistemas domésticos y para la distribución automática del agua. Para calcular la potencia de la bomba se requiere conocer el número de accesorios a utilizar, desde el punto de vista de succión hasta el punto más elevado o de impulsión (corresponde a la cota del punto más alto en la tubería), así como el diámetro de las mismas y posteriormente sumar la longitud equivalente de los accesorios más la altura de elevación.

Conociendo la altura, el caudal y la eficiencia se obtiene la potencia.

<i>Diámetro (pulgadas)</i>	<i>Codo 90°</i>	<i>Codo 45°</i>	<i>Te giro de 90°</i>	<i>Te paso recto</i>	<i>Válvula de compuerta</i>	<i>Válvula de globo</i>	<i>Válvula de ángulo</i>
3/8	0.30	0.20	0.45	0.10	0.06	2.45	1.20
1/2	0.60	0.40	0.90	0.20	0.12	4.40	2.45
3/4	0.75	0.45	1.20	0.25	0.15	6.10	3.65
1	0.90	0.55	1.50	0.27	0.20	7.60	4.60
1 1/4	1.20	0.80	1.80	0.40	0.25	10.50	5.50
1 1/2	1.50	0.90	2.15	0.45	0.30	13.50	6.70
2	2.15	1.20	3.05	0.60	0.40	16.50	8.50
2 1/2	2.45	1.50	3.65	0.75	0.50	19.50	10.50
3	3.05	1.80	4.60	0.90	0.60	24.50	12.20
3 1/2	3.65	2.15	5.50	1.10	0.70	30.00	15.00
4	4.25	2.45	6.40	1.20	0.80	37.50	16.50
5	5.20	3.05	7.60	1.50	1.00	42.50	21.00
6	6.10	3.65	9.15	1.80	1.20	50.00	24.50

Tabla III.II Longitud equivalente de conexiones a tubería en metros.

La ecuación para calcular la potencia de la bomba es la siguiente:

Donde:

$HP$  = potencia de la bomba en  $HP$

$Q$  = caudal o gasto en litros por segundo

$76$  = constante para convertir a  $HP$

$h$  = altura o carga a vencer ( $ADT$ )

$n$  = eficiencia

Nota; eficiencia  $n$  para bombas:

De  $1/4$  a  $2 HP$  = 50 a 60 %

De  $2 1/2$  a  $10 HP$  = 60 a 70%

Más de  $10 HP$  = 70 a 80%

Calculo de la altura dinámica total ( $ADT$ ).

La  $ADT$  de bombeo representa todos los obstáculos que tendrá que vencer un líquido impulsado por una maquina (expresado en metros de columna del mismo) para poder llegar hasta el punto específico considerado como la toma más desfavorable.

Donde:

$h$  = la altura geométrica entre el nivel inferior y el nivel superior del líquido,

$h_s$  (altura de succión),  $h_d$  (altura de descarga).

$h_f =$  la sumatoria de todas las pérdidas que sufre el fluido entre el nivel de succión y el de descarga.

$V^2/9.98 =$  energía cinética o presión dinámica.

Por tanto queda:

Para cada término:

$$(h_s + h_d) = 0.6 + 0.65 = 1.25\text{m}$$

$h_{fs} =$  considerando la tabla.

Succión = codo 90+ codo 90+v.check

$$h_{fs} = 0.75+0.75+3.65 = 5.15\text{m}$$

Descarga = v. de bola + codo 90+ codo 90

$$h_{fd} = 0.15+0.75+0.75 = 1.65\text{m}$$

$$(h_{fs}+h_{fd})=6.8\text{m}$$

Para evitar ruidos molestos en la tubería, se toma una velocidad del líquido de  $V= 2$  m/s.

$$ADT=1,25+6,8+4/(2*9,01) \quad \mathbf{ADT = 8.2538 \text{ m}}$$

Sustituyendo.

$$Q = 5\text{GPM}; Q=0,33\text{lt/seg}$$

$$HP =(0,33\text{lt/seg} * 8,2538\text{m})/(76*0,6)$$

$$\mathbf{HP=0.06 \text{ HP}}$$

De acuerdo al resultado obtenido se considerara una bomba trifásica de 1PH, debido que ésta es la de menor potencia existente en el mercado.

Es así que se adquiere una bomba marca BALDOR; de las siguientes características:

Voltaje de línea: 208-230/460 [VAC].

Frecuencia: 60 [Hz].

Corriente: 3.7-3.6/1.8 [A].

Revoluciones: 3450 [RPM].

Potencia: 1 [HP].

Flujo: 0.6 – 3 [m<sup>3</sup>/h].



Figura III.26 Bomba.

### 3.1.3 Selección del actuador

El actuador es el elemento que gobernará el funcionamiento de la bomba. Para ésta aplicación el actuador será un variador de velocidad con control SPWM. Puesto que se ha dimensionado la bomba de una potencia de 1 [HP], la potencia del variador de velocidad es de 1 1/2 [HP], de acuerdo a la naturaleza de la carga y su curva torque vs velocidad.



Los convertidores de frecuencia ABB para maquinaria general se han diseñado para satisfacer los requisitos de una amplia gama de aplicaciones de maquinaria. Los convertidores son ideales para aplicaciones relacionadas con alimentos y bebidas, manipulación de materiales, textiles, impresión, goma y plásticos y madera.

### Conexiones de control

El siguiente diagrama presenta un resumen de las conexiones de control del ACS350 y muestra las conexiones de E/S por defecto para la macro estándar de ABB. El ACS350 dispone de siete macros estándar y tres macros de usuario. Consulte el Manual del usuario del ACS350 para obtener una descripción más detallada de cada macro.

### Conexión de los cables de control

La siguiente figura muestra los conectores de E/S para trabajar con el variador de frecuencia

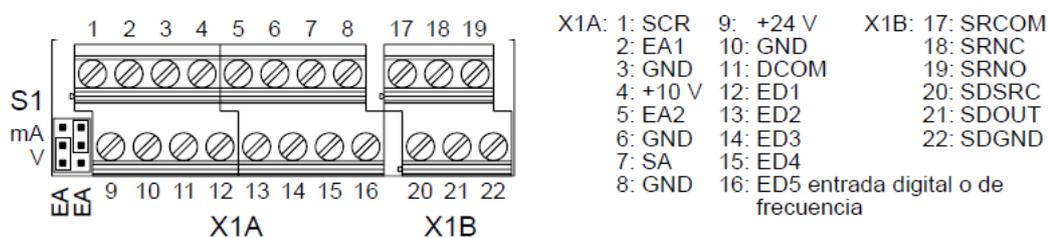


Figura III.29 Terminales de E/S del variador de frecuencia

### 3.1.4 Selección del sensor de flujo

Una vez dimensionada la bomba y el actuador, se procede a seleccionar el tipo de sensor. Tomando en cuenta las condiciones de trabajo, el sensor deberá cumplir con:

- Medición de flujo de hasta 5 [GPM].
- Rango de viscosidad del flujo baja, puesto que se controla flujo de agua.
- Conexión de  $\frac{3}{4}$  de pulgada.

El costo del sensor es un factor importante para su selección al tratarse de un proyecto de titulación. Ventajosamente se cuenta con una alta variedad de sensores, de los cuales se pudo apreciar el elevado costo de un transmisor de flujo ya sea de corriente o voltaje.

Es así que se decidió trabajar con un sensor con salida de frecuencia, ya que el mismo

presenta un costo considerablemente menor a los otros transmisores cotizados.

El sensor que se seleccionó es de tipo turbina, el cuál presenta una exactitud muy elevada, del orden de  $\pm 0.3\%$ . La máxima precisión se consigue con un régimen laminar, instalando el instrumento en una tubería recta de longitudes mínimas de 15 diámetros aguas arriba y 6 diámetros aguas abajo.

El sensor escogido es el tipo turbina de la marca KOBOLD, modelo DRS-0350 N5 K0000, el mismo que presenta las siguientes características:



Figura III.30 Medidor de Caudal Tipo Turbina.

#### Datos Técnicos:

Rango de Medición:	0.6 - 10.5 GPM Agua.
Conexión:	3/4" NPT.
P recisión de medición:	$\pm 1.5\%$ f.s.
Rango de viscosidad:	baja.
Material:	plástico (Noryl).
Max. Temperatura.	80 °C.
Salida de pulsos del sensor.	352 Hz a 10.5 GPM.
Protección.	IP65.

### 3.1.5 Sistemas de Adquisición de Datos.

Antes de que un sistema de medición basado en computador pueda medir una señal física, como el caudal, un sensor o transductor debe convertir la señal física en una eléctrica, sea esta de voltaje o de corriente.

Un dispositivo DAQ puede considerarse como un sistema de medición completo, aunque es sólo un componente del mismo.

LabVIEW® incluye un grupo de VIs que permiten configurar, adquirir datos y enviarlos a los dispositivos DAQ.

Frecuentemente un dispositivo puede ejecutar una variedad de funciones (conversión análogo a digital –A/D- , conversión digital a análogo – D/A-, E/S digital y operaciones de contador /temporizador), cada dispositivo soporta diferentes DAQ y velocidades de generación de señal.

No siempre puede conectarse señales directamente a un dispositivo DAQ. En estos casos se debe utilizar accesorios acondicionadores de señal para tratar las señales antes de que el dispositivo DAQ las convierta en información digital.

El software controla el sistema DAQ adquiriendo los datos puros, analizando y presentando los resultados.

Hay diversas opciones para un sistema DAQ:

- El dispositivo DAQ reside en el computador. Puede conectar el dispositivo en la ranura PCI de un computador de escritorio o en la ranura PCMCIA de un computador portátil para un sistema de medición DAQ portátil.
- El dispositivo DAQ es externo y se conecta al computador a través de un puerto existente, como el puerto serial, USB o el puerto Ethernet, lo que significa que se pueden ubicar fácilmente los nodos de medida cerca de los sensores.

El computador recibe los datos puros directamente en el dispositivo DAQ. La aplicación creada en LabVIEW® presenta y manipula los datos en una forma que el usuario pueda entender. El software también controla el sistema DAQ ordenando al dispositivo cuando y desde cuáles canales adquirir datos.

Típicamente el software DAQ incluye controladores y programas de aplicación. Los controladores son únicos para el dispositivo o tipo de dispositivo e incluyen un grupo de comandos que el dispositivo acepta.

Los programas de aplicación también presentan y analizan los datos adquiridos.

Los dispositivos de medición de NI incluyen el programa controlador NI – DAQ, una colección de Vis que se utilizan para configurar, adquirir datos y enviarlos hacia los dispositivos de medición o de control.

### **3.1.6 Tarjeta de Adquisición de Datos NI myDAQ.**

En este caso se ha optado por trabajar con una tarjeta de adquisición de datos de la NATIONAL INSTRUMENTAL.

NI myDAQ es un dispositivo de adquisición de datos cuyo software está basado en LabVIEW®, permitiendo a los estudiantes manejar señales del mundo real.

NI myDAQ es ideal para la medición de sensores, combinado con NI LabVIEW sobre una computadora, los estudiantes pueden analizar y procesar señales adquiridas y realizar procesos de controles simples y complejos.

La tarjeta NI myDAQ es una tarjeta de adquisición de datos multifuncional para Windows 2000/XP/Vista, MAC OS X, LINUX; posee alto rendimiento y alta velocidad de muestreo.

Las especificaciones de la tarjeta y el soporte de proveedores externos hacen ideal su uso para un amplio rango de aplicaciones en nuestro caso el de la adquisición de datos, para la industria, laboratorios, control de procesos y automatización de sistemas en las fábricas.

En la figura III.31 se muestra una vista frontal de la tarjeta NI myDAQ.



### **3.1.6.1 Entradas y elementos de la NI my DAQ**

NI myDAQ provee entradas análogas (AI), salidas análogas (AO), entradas y salidas digitales (DIO), fuentes de voltaje, y las funciones de un milímetro digital (DMM) en un dispositivo compacto USB.

#### **3.1.6.1.1 Entrada analógicas (AI)**

Hay dos canales de entrada analógica en la NI myDAQ, estos canales pueden ser configurados como de tensión diferencial o de entrada de audio. Las entradas analógicas son multiplexados, es decir, un solo convertidor analógico a digital (ADC) se utiliza para probar los dos canales, en modo de uso general, puede llegar a medir señales hasta  $\pm 10$  V a 16 bits.

Las entradas analógicas se pueden medir hasta 200 kS / s por canal, por lo que son útiles para la adquisición de diferentes formas de onda.

#### **3.1.6.1.2 La salida analógica (AO)**

Hay dos canales de salidas analógicas en la NI myDAQ, estos canales pueden configurarse como salida de tensión o de salida de audio.

Ambos canales tienen un convertidor digital a analógico (DAC), por lo que puede actualizar de forma simultánea.

Con la salida analógica se puede generar una señal e hasta  $\pm 10$  Voltios.

#### **3.1.6.1.3 Entrada / salida digital (DIO)**

Hay ocho líneas para entrada y salidas digitales (DIO), cada línea puede ser configura y programada para funcionar como salida o entrada digital, las cuales además pueden trabajar como un contador o temporizador.

Las líneas digitales presentan un nivel de 3.3 V LVTTTL y son tolerantes a entradas de 5V, además las salidas digitales no son compatibles con los niveles lógicos CMOS.

#### **3.1.6.1.4 Fuentes de alimentación**

Hay tres fuentes de alimentación disponibles en la NI myDAQ, donde dos fuentes de +15 y -15 V pueden ser usados para alimentar componentes analógicos de potencia, tales como amplificadores operacionales y reguladores lineales, además presenta una fuente de 5 V que puede ser utilizada para alimentar dispositivos digitales.

#### **3.1.7 Selección de los instrumentos y protecciones**

Los instrumentos y los elementos de control y maniobra, protecciones y visualizadores se encuentran en un panel.

De acuerdo al diseño electro-mecánico de la Figura III.33, se tiene los siguientes elementos para encendido, apagado y visualización.

- Botón de emergencia.
- Alimentación Lateral de 330[V] polarizada.
- Indicadores Luminosos de encendido de la bomba, paro de emergencia, caudal mínimo y nivel mínimo.

Protecciones.

Para el dimensionamiento de las protecciones se ha considerado la corriente y el voltaje de los elementos protegidos.

- Protección para el actuador:
- Protección general:

De acuerdo al circuito de potencia de la Figura III.32, ésta protección general será la suma de las dos protecciones anteriores, es decir, 5[A], 330 [VAC].

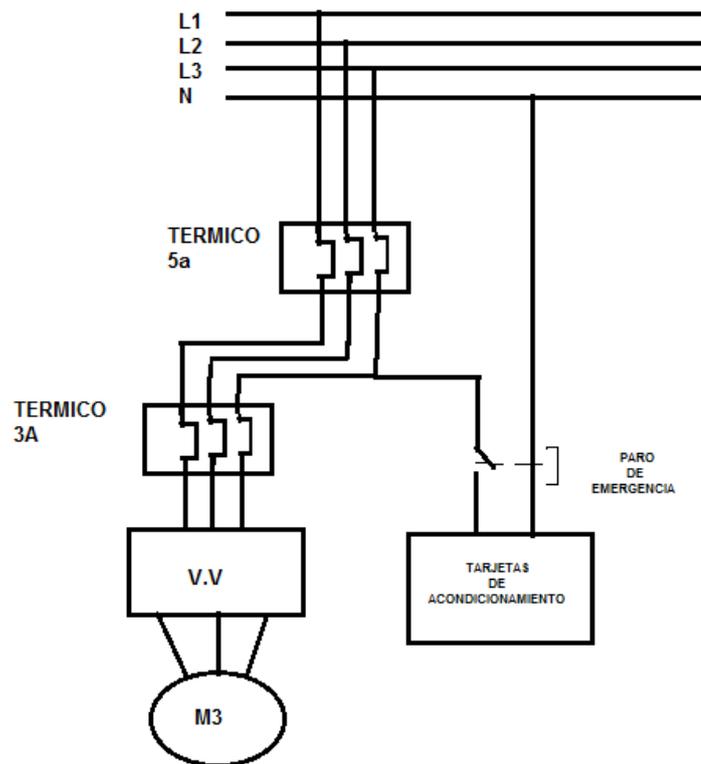


Figura III.33 Circuito de potencia del módulo de control de caudal.

### 3.1.8 Sensores de nivel

Para el nivel de líquidos existe una gran variedad de sensores entre los cual están: tipo flotador, conductivo, capacitivo, ultrasónico, radiación resistivo, peso, etc.

De estos se ha seleccionado el sensor tipo flotador, puesto que se necesita solamente el control ON/OFF para detectar el nivel mínimo dentro del tanque.

Acondicionamiento del sensor de nivel

Se ha diseñado un circuito regulador de voltaje, de 110 Vac que trabaja el sensor a 5vdc el cual lee la MyDAQ.



Figura III.34 sensor de nivel.

### **3.2 CIRCUITO DE POTENCIA Y ACTIVACIÓN**

El circuito de potencia está formado por un triac y un optoacoplador cuya señal de salida actuará directamente sobre los indicadores luminosos activados desde la interfaz de control de LabVIEW®, con lo cual se controla el encendido y apagado de los indicadores.

El aislamiento entre el circuito de control y la etapa de potencia lo proporciona generalmente un optoacoplador MOC-3021, la conmutación propiamente dicha puede ser realizada por transistores bipolares, MOSFET's de potencia, triacs etc.

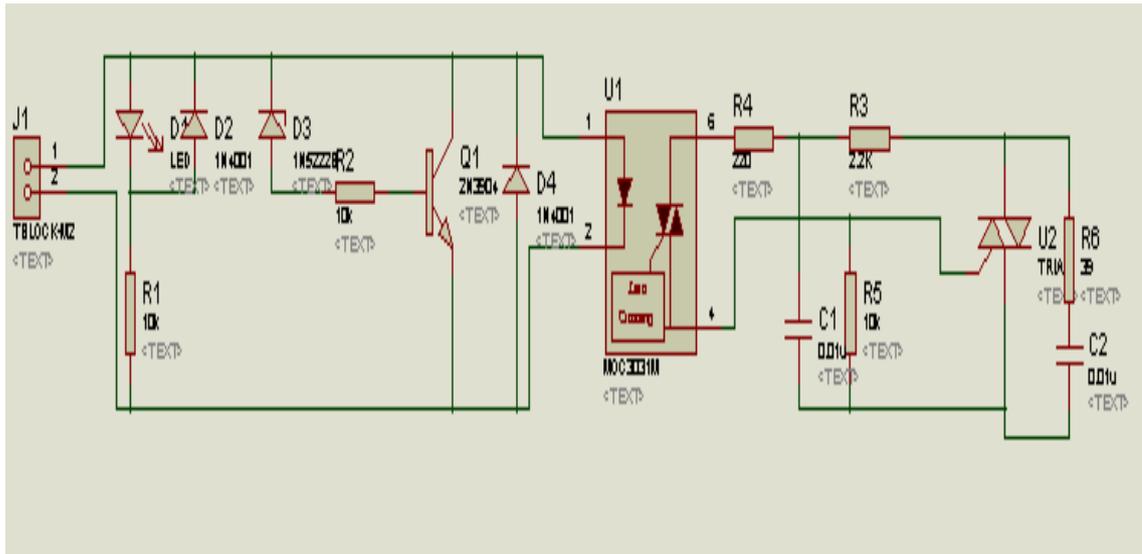


Figura III.35 Esquemático del circuito de potencia.

### 3.2.1 Elementos principales del circuito de potencia

El circuito de potencia encargado de encender y apagar los indicadores luminosos consta de varios elementos los cuales se detalla a continuación.

#### 3.2.1.1 Triac

El TRIAC es un interruptor de silicio de tres terminales que se puede disparar (hacer conducir) con impulsos positivos y negativos de la puerta cuando los potenciales del ánodo son positivos o negativos respectivamente, es decir pueden conducir en las dos semiondas de la corriente alterna.

Un relé de estado sólido en este caso un triac ofrece varias ventajas notables con respecto a los tradicionales relés y contactores electromecánicos:

- Son más rápidos, livianos y confiables.
- No se desgastan.
- Son inmunes a los choques y a las vibraciones.

- Pueden conmutar a altas corrientes y a altos voltajes sin producir arcos ni ionizar al aire circundante.
- Generan muy poca interferencia.
- Proporcionan varios kilovatios de aislamiento entre la entrada y la salida.

La figura III.36 muestra la relación del ángulo de conducción versus el voltaje aplicado a la carga para un triac típico.

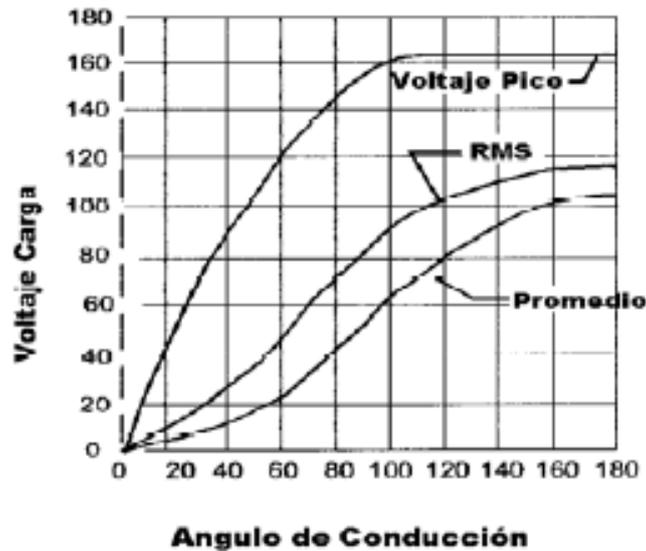


Figura III.36 Voltaje en la carga vs ángulo de conducción del triac

Las curvas muestran la tensión pico a pico, la tensión efectiva o RMS y el promedio de ambas.

### 3.2.1.2 Optoacoplador Moc 3021

Es un componente electrónico que combina en el mismo empaque un LED y un fotodetector, mostrado en la figura III.37.

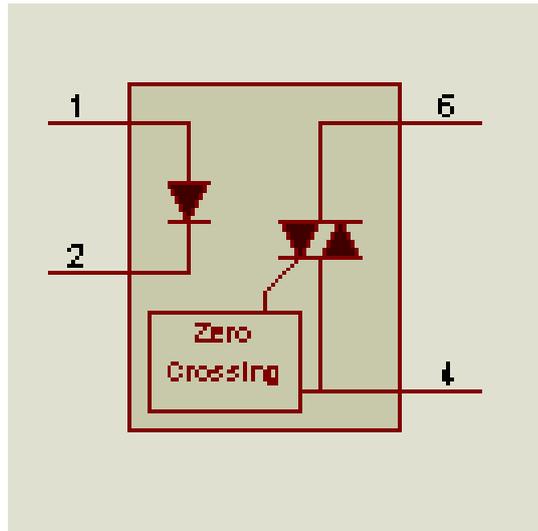


Figura III.37 Esquemático del MOC 3021

### 3.2.1.2.1 Funcionamiento

El Led emite un rayo de luz cuando es excitado por una corriente proveniente de un circuito de control.

Este es recibido por el detector, es cual es activado por dicho estímulo, haciendo que el circuito de salida o de potencia en el cual esté conectado entre en funcionamiento.

La principal ventaja de un optoacoplador es el aislamiento eléctrico entre los circuitos de entrada y salida ya que el único contacto entre ellos es un rayo de luz.

### 3.2.2. Funcionamiento del Circuito de Potencia.

Al aplicar un voltaje de control en la entrada del circuito, circula una corriente de polarización a través de led del optoacoplador y este emite una luz infrarroja en el interior de capsula.

Dicha radiación es captada por el fotodetector y convertida en corriente que se utiliza para impulsar directamente al triac encargado de conmutar la potencia de la carga.

Las resistencias R1 y R3 limitan la corriente a través del led indicador D3 y un led del optoacoplador a un valor seguro.

Los demás elementos cumplen funciones auxiliares como por ejemplo, los diodos D2 y D4 protegen los led's en caso de una inversión de la polaridad del voltaje de control y el transistor 2N3904 bloquea el paso de corriente hacia el optoacoplador cuando este es superior a 15 V, este umbral lo determina el diodo Zener. Esta regulación se la hace con el fin de proteger el led del optoacoplador.

En voltajes normales, con voltajes de entrada positivos (superiores a 5V e inferiores a 15 voltios), los diodos D1, D2, D4 y el transistor Q1 2N3904 permanecen en estado OFF y solamente circula corriente a través de los led's.

Cuando el voltaje de control supera la barrera de los 15 V, el diodo D1 se dispara, y permite la circulación de corriente en la base del transistor Q1 2N3904 a través de la resistencia R2.

Como resultado transistor Q1 2N3904 conduce y bloquea el paso de corriente hacia el optoacoplador. Algo similar sucede cuando se aplica un voltaje de entrada invertido. En este caso conducen los diodos D2 y D4 evitando que la tensión inversa de entrada quede aplicada a los led's.

La máxima tensión inversa que puede ser aplicada a los led's antes de destruirse es del orden de los 3 a 6 voltios.

El circuito de salida utiliza un triac de compuerta aislada gobernado por el diac del optoacoplador. Una vez disparado el optoacoplador por efecto del voltaje de control aplicado a la entrada, circula una corriente por el mismo y por la compuerta del triac, provocando que este entre en conducción, permitiendo a la vez que circule corriente a través del calefactor.

La red formada por la resistencia R7 y el capacitor C1, llamada red snubber, evita que los cambios rápidos en el voltaje de entrada disparen inadvertidamente al triac mientras este último se encuentre en estado OFF.

### **3.3 ALIMENTACIÓN DE RED Y DESCRIPCIÓN DE FUENTE**

La parte de potencia trabaja con 330 [VAC]. Esta tensión alimenta al variador de velocidad, y protecciones.

La parte de control y acondicionamiento de señal de los sensores trabaja a 110Vac.  
Se ha construido una fuente de 9vdc para que alimenten el sensor de sensor de flujo.

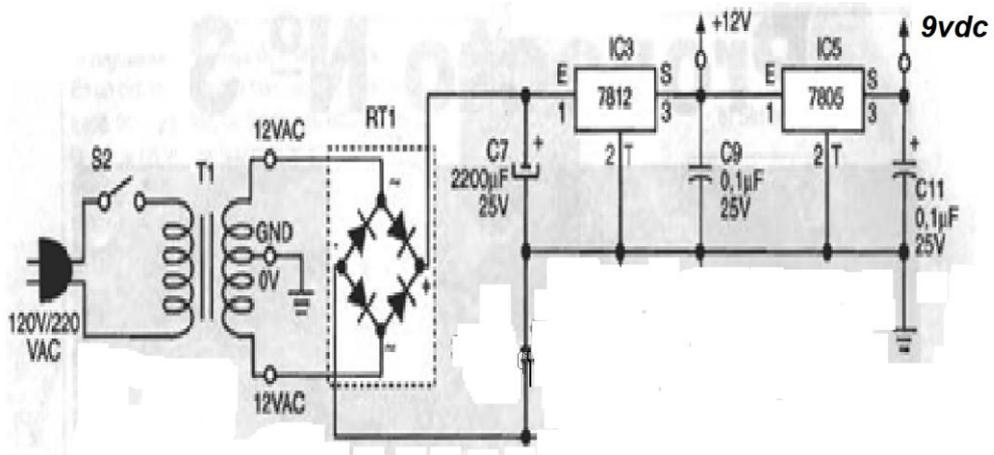


Figura III.38 Fuente de 9 vdc

# CAPÍTULO IV

## DISEÑO DEL ALGORITMO DE CONTROL

### 4.1 INTRODUCCION

En éste capítulo se diseñará el control de la planta. Tomando en cuenta todos los tipos de control que se analizó en el capítulo 1, se determinó que el control más adecuado para ésta aplicación es el control PID por las siguientes características. La variable a controlar (caudal) varía rápidamente frente a cambios de los valores de consigna. Además, la baja viscosidad presentada por el agua, hace que el flujo controlado sea rápido frente a dichos cambios.

La combinación de una acción de control proporcional, una acción de control integral y una acción de control derivativa (PID) tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales.

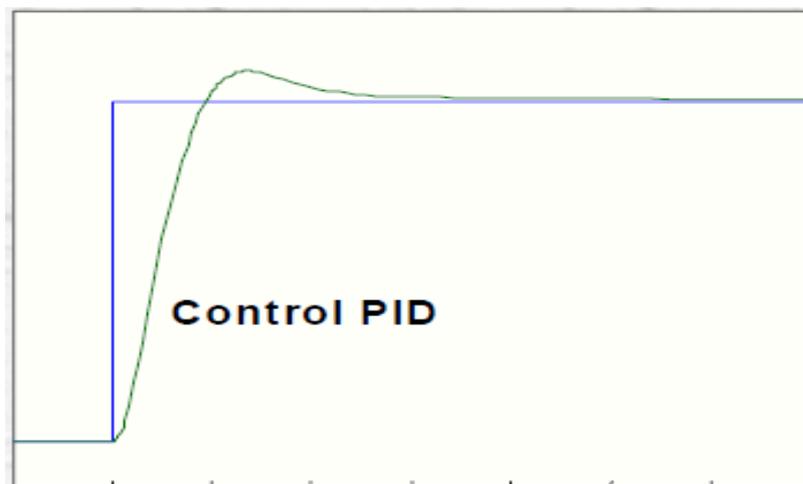


Figura IV.39 Control PID cuando se ha producido un cambio brusco en la referencia.

Evaluando los tipos de control y la aplicación que aquí se desarrolla, se ha decidido implementar la acción de control PID, la misma que actúa tanto en el estado transitorio como en el estado estable tratando de obtener una óptima respuesta dinámica.

En el que como primer paso se realiza la identificación del mismo para obtener un modelo matemático aproximado.

Posteriormente se procede al diseño del controlador aplicando una variedad de técnicas y comparando su comportamiento, entre las técnicas aplicadas están: reglas de Ziegler-Nichols.

Una fase importante en el diseño es la identificación que tiene como objetivo obtener un modelo matemático que reproduzca con suficiente exactitud el comportamiento del proceso.

De la exactitud del modelo obtenido dependerá posteriormente el buen comportamiento del controlador diseñado.

Existen dos métodos básicos de identificación:

- Identificación analítica (modelado).
- Identificación experimental (identificación clásica).

Para el modelado se requiere un conocimiento muy especializado sobre la tecnología del proceso, mientras que para la identificación clásica, que es el método más directo, se requiere aplicar al proceso señales especiales como escalones, rampas, impulsos, sinusoides o señales pseudo aleatorias.

Para el tipo de planta que se ha de controlar es suficiente una identificación clásica, utilizando el escalón como señal de prueba.

La función escalón es la señal que más se ha aplicado en la práctica convencional del control automático, obteniéndose con ella modelos sencillos suficientemente exactos.

La respuesta de un proceso tecnológico a la señal escalón puede aproximarse mediante:

- Un modelo de primer orden con o sin retardo.
- Un modelo de segundo orden aperiódico con o sin retardo.
- Un modelo de segundo orden subamortiguado con o sin retardo.

La elección de uno de los modelos anteriores depende de la forma de la respuesta transitoria y del grado de precisión que se desee en el ajuste.

El modelo de primer orden se puede utilizar en procesos simples o en otros más complejos si no se requiere mucha exactitud.

## 4.2 SISTEMAS LINEALES DE PRIMER ORDEN

La respuesta dinámica de muchos sistemas se puede representar mediante la siguiente ecuación diferencial lineal de primer orden:

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

O de manera equivalente,

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = Ku(t) \quad (\text{Ecuación IV.2})$$

Donde:

$$\tau = \frac{a_1}{a_0}$$

$$K = \frac{b}{a_1}$$

La ecuación se puede escribir en términos del dominio de Laplace:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (\text{Ecuación IV.3})$$

Donde:

$K$ : es la ganancia del proceso,

$\tau$ : es la constante de tiempo.

### 4.2.1 Ganancia en Estado Estacionario $K$

Expresa el cambio último en la variable de salida o respuesta del sistema para un determinado cambio paso en la variable de entrada.

De la función de transferencia de primer orden:

$$G(s) = \frac{K}{s+1} \quad (\text{Ecuación IV.4})$$

En la Figura IV.40 se muestra la respuesta del sistema como función de la ganancia del sistema a lazo abierto  $K$ .

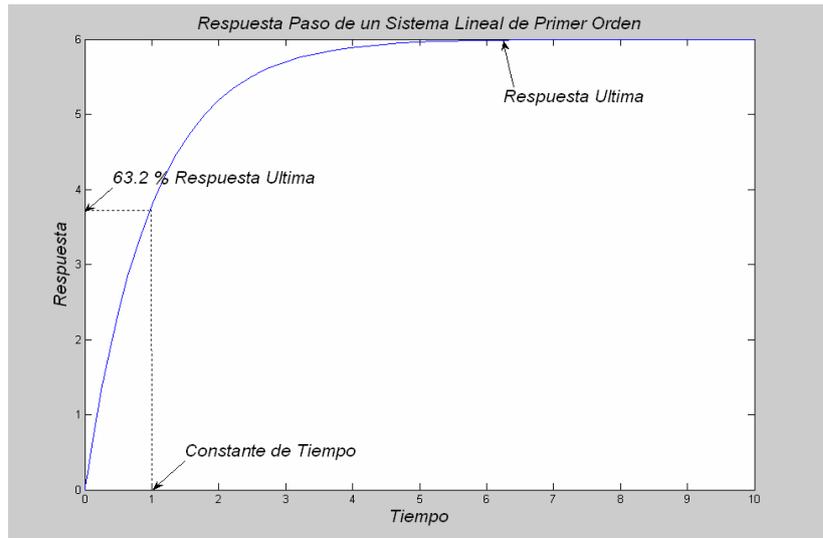


Figura IV.40 Respuesta del sistema con ganancia K

#### 4.2.2 Efecto de la Constante de Tiempo sobre la Respuesta del Sistema

Esta constante expresa el tiempo definido por la relación entre la capacidad que tiene el sistema de transportar a una entidad con respecto a la rapidez de cambio o capacitancia de dicha entidad en la respuesta del sistema, es decir que:

$$\tau = \frac{\text{Capacida}}{\text{Capacitancia}}$$

Si la constante de tiempo a lazo abierto se modifica se obtendría una respuesta del sistema semejante a la mostrada en la Figura IV.41

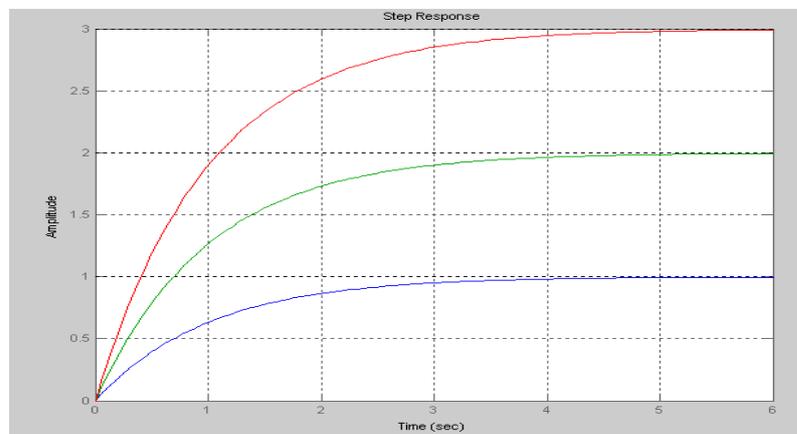


Figura IV.41 Constante de tiempo en la respuesta del sistema

Como puede notarse si se aumenta la constante de tiempo a lazo abierto, manteniendo constante la ganancia del sistema, se obtendrán las nuevas condiciones de operación en estado estacionario en mayor tiempo.

Duplicando el valor de la constante de tiempo también se duplica el tiempo para alcanzar el estado estacionario.

#### 4.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO

La Figura IV.41 muestra el diagrama de bloques del sistema de control automático a implementarse. Consiste en un controlador (NI myDaq), un actuador (variador de velocidad), la planta (Bomba) y un sensor (Sensor de Flujo tipo turbina). El sensor de manera directa enviará al controlador el valor de flujo de salida de la planta en forma de frecuencia, esta frecuencia es proporcional al flujo. El controlador a su vez tomará la señal que entrega el sensor y la comparará con la entrada de referencia (valor de consigna enviado desde la HMI). El error resultante de la comparación de estas dos señales ingresará al algoritmo de control PID, el cual calculará una salida de control que será enviada a la salida analógica de la NI MyDaq y de allí al actuador. La bomba es controlada por el actuador y su velocidad varía de tal forma que aumente o disminuya el flujo hasta llegar al valor de consigna.

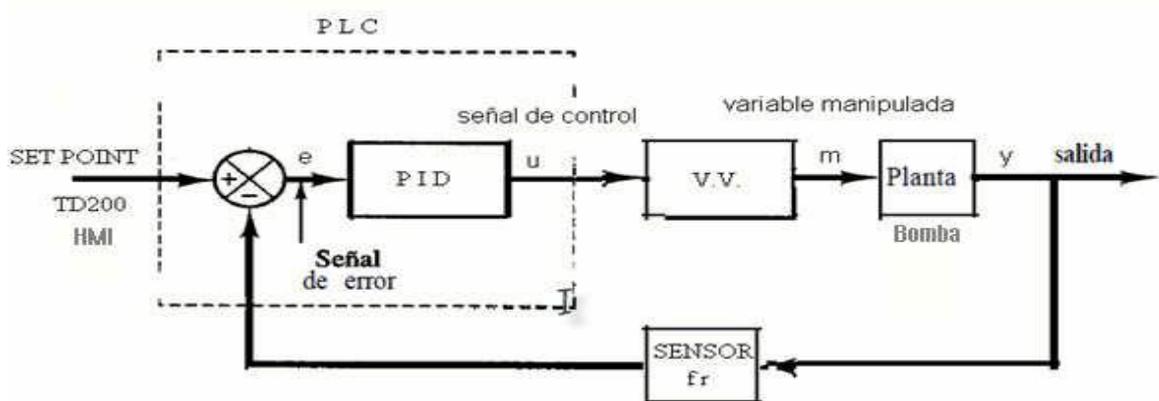


Figura IV.42 Sistema de control automático a implementarse.

Luego de definir el modo de operación del sistema se procede al diseño e implementación de cada una de sus partes de acuerdo al diagrama de bloques.

#### 4.4 MEDICIÓN DE FRECUENCIA CORRESPONDIENTE AL FLUJO DE SALIDA

El sensor tipo turbina seleccionado para esta aplicación mide el nivel de caudal a través de sus paletas rotativas y como consecuencia entrega un tren de pulsos (frecuencia) cuyo valor está directamente relacionado con el valor de caudal en un momento determinado de acuerdo a la figura IV.43.

##### Diagrama de frecuencia

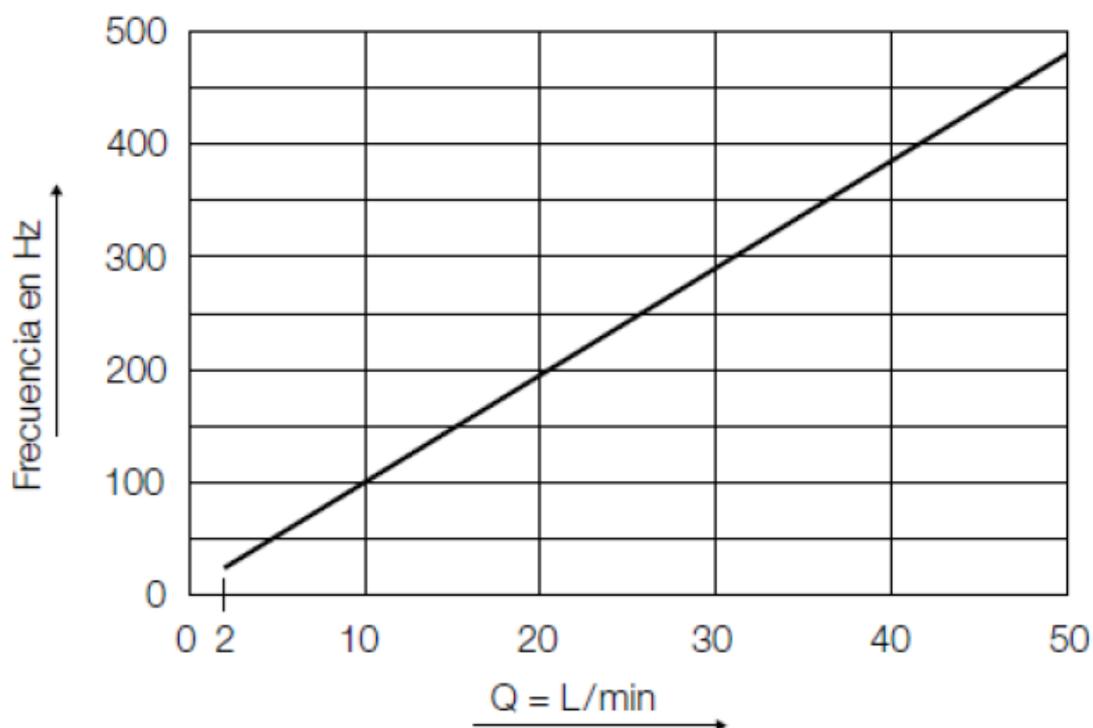


Figura IV.43 Diagrama de frecuencia vs caudal del sensor

frecuencia bomba Hz	GPM	Frecuencia sensor Hz
10	2,368	90
20	4,596	170,695
30	6,994	254,39
40	9,471	342,281

Tabla IV.III Relación frecuencias de bomba y sensor vs galones por minutos.

La ecuación de la curva se obtiene de la siguiente manera:

Tomados dos puntos de caudal:  $Q_1=2L/min$  y  $Q_2=10L/min$  y convirtiéndolos a GPM.

$$2 \frac{lt}{min} * \frac{1Gl}{3.785lt} = 0.5284GPM$$

$$10 \frac{lt}{min} * \frac{1Gl}{3.785lt} = 2.642GPM$$

La ecuación de la recta es:

$$F=a*Q+b \quad \text{(Ecuación IV.5)}$$

Reemplazando los valores de frecuencia en los puntos  $q_1$  y  $q_2$ :

$$25=a*(0.5284)+b$$

$$100=a*(2.642)+b$$

Resolviendo la ecuación

$$f=35.48*Q+6.25 \quad \text{(Ecuación IV.6)}$$

$$Q=(f-6.25)/35.48 \quad \text{(Ecuación IV.7)}$$

Esta ecuación permitirá obtener los cálculos para obtener el caudal en GPM que se está obteniendo de la planta, para luego la respectiva comparación con la entrada de referencia de LabVIEW.

#### 4.7 PROGRAMACIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA

Para trabajar con el variador de frecuencia se debe configurar sus diferentes parámetros. Los parámetros del variador de frecuencia permiten configurar rampas de aceleración y desaceleración así como establecer la comunicación con la tarjeta MyDAQ.

Se definió que la tarjeta MyDAQ enviará una señal de 0 a 10 v por medio de su salida analógica, por lo tanto se utiliza la variante analógica del variador de frecuencia para el control del mismo.

Datos del motor para la parametrización

La figura IV.44 muestra los datos de placa de la bomba utilizada.



Figura IV.44 parámetros de la bomba

Los parámetros ingresados en el variador de frecuencia están en función a los datos de placa de la bomba utilizada, la misma que se detalla a continuación.

#### PARÁMETROS

- 1103 Selección de referencia 1 (EA1)
- 1301 Mínimo EA1 (1.0%)
- 1302 Máximo (100.0%)
- 1303 Filtro EA1 (0.1seg)
- 3001 EA<función mínima ([0] SIN SEÑAL)
- 1104 REF1 mínimo (20.0Hz)
- 1105 REF1 máximo (40Hz) 50Hz
- 2007 Frecuencia mínima (0.0Hz)
- 2008 Frecuencia máxima (60Hz)
- 2202 Tiempo aceleración 1 (1seg)
- 2203 Tiempo de desaceleración (1seg)
- 1201 Selector de velocidad constante (ED3,4)
- 1001 Comando EXT1 (ed1, 2)
- 1003 Dirección (petición)
- 2101 Función marcha (auto)
- 2102 Función paro (paro libre)
- 9902 Valor de fábrica (ESTAND ABB)

- 9904 Modo del control del motor (ESCALAR: FREC)
- 9905 Tensión nominal del motor (208vac)
- 9906 Intensidad nominal del motor (3.7 A)
- 9907 Frecuencia nominal del motor (60Hz)
- 9908 Velocidad nominal del motor (3450 RPM)
- 9909 Potencia nominal del motor (1HP)
- 2001 Velocidad mínima (0 Hz)
- 2002 Velocidad máxima (60 Hz)
- 2003 Tiempo de aceleración (0.5 Seg)

# CAPÍTULO V

## DISEÑO DE LA INTERFAZ DE USUARIO

### 5.1 INTRODUCCION

LabVIEW® constituye un revolucionario sistema de programación gráfica para aplicaciones que involucren adquisición, control, análisis y presentación de datos.

Las ventajas que proporciona el empleo de LabVIEW® se resumen en las siguientes:

- Se reduce el tiempo de desarrollo de las aplicaciones al menos de 4 a 10 veces, ya que es muy intuitivo y fácil de aprender.
- Dota de gran flexibilidad al sistema, permitiendo cambios y actualizaciones tanto del hardware como del software.
- Da la posibilidad a los usuarios de crear soluciones completas y complejas.
- Con un único sistema de desarrollo se integran las funciones de adquisición, análisis y presentación de datos.
- El sistema está dotado de un compilador gráfico para lograr la máxima velocidad de ejecución posible.
- Tiene la posibilidad de incorporar aplicaciones escritas en otros lenguajes.

LabVIEW® tiene su mayor aplicación en sistemas de medición, como monitoreo de procesos y aplicaciones de control, un ejemplo de esto pueden ser sistemas de monitoreo en transportación, laboratorios para clases en universidades, procesos de control industrial.

LabVIEW® es muy utilizado en procesamiento digital de señales, procesamiento en tiempo real de aplicaciones biomédicas, manipulación de imágenes y audio, automatización, diseño de filtros digitales, generación de señales, entre otras, etc.

Para el empleo de LabVIEW® no se requiere gran experiencia en programación, ya que se emplean iconos, términos e ideas familiares a científicos e ingenieros, y se apoya sobre símbolos gráficos en lugar de lenguaje escrito para construir las aplicaciones.

Por ello resulta mucho más intuitivo que el resto de lenguajes de programación convencionales.

LabVIEW® posee extensas librerías de funciones y subrutinas. Además de las funciones básicas de todo lenguaje de programación, LabVIEW® incluye librerías específicas para la adquisición de datos, control de instrumentación VXI, GPIB, DAQ, y comunicación serie, análisis presentación y guardado de datos.

LabVIEW® también proporciona potentes herramientas que facilitan la depuración de los programas.

Los programas desarrollados mediante LabVIEW® se denominan Instrumentos Virtuales (VIs), porque su apariencia y funcionamiento imitan los de un instrumento real.

Sin embargo son análogos a las funciones creadas con los lenguajes de programación convencionales.

Los VIs tienen una parte interactiva con el usuario y otra parte de código fuente, y aceptan parámetros procedentes de otros VIs.

Todos los VIs tienen un panel frontal y un diagrama de bloques. Las paletas contienen las opciones que se emplean para crear y modificar los VIs.

LabVIEW® posee una extensa biblioteca de funciones, entre ellas, aritméticas, comparaciones, conversiones, funciones de entrada/salida, de análisis, etc.

Las estructuras, similares a las declaraciones causales y a los bucles en lenguajes convencionales, ejecutan el código que contienen de forma condicional o repetitiva (bucle for, while, case,...).

Los cables son las trayectorias que siguen los datos desde su origen hasta su destino, ya sea una función, una estructura, un terminal, donde cada cable tiene un color o un estilo diferente, lo que diferencia unos tipos de datos de otros.

## 5.2 INTERFACES DESARROLLADAS EN LABVIEW®

Mediante LabVIEW® se desarrolló la interfaz para el Control Remoto del Módulo de caudal desde la PC y la tarjeta de adquisición de datos NI myDAQ, dicha interfaz consta de las siguientes pantallas:

### 5.2.1 Panel frontal de la pantalla principal

La figura V.45 muestra la pantalla principal de la interfaz que es la de presentación al usuario.



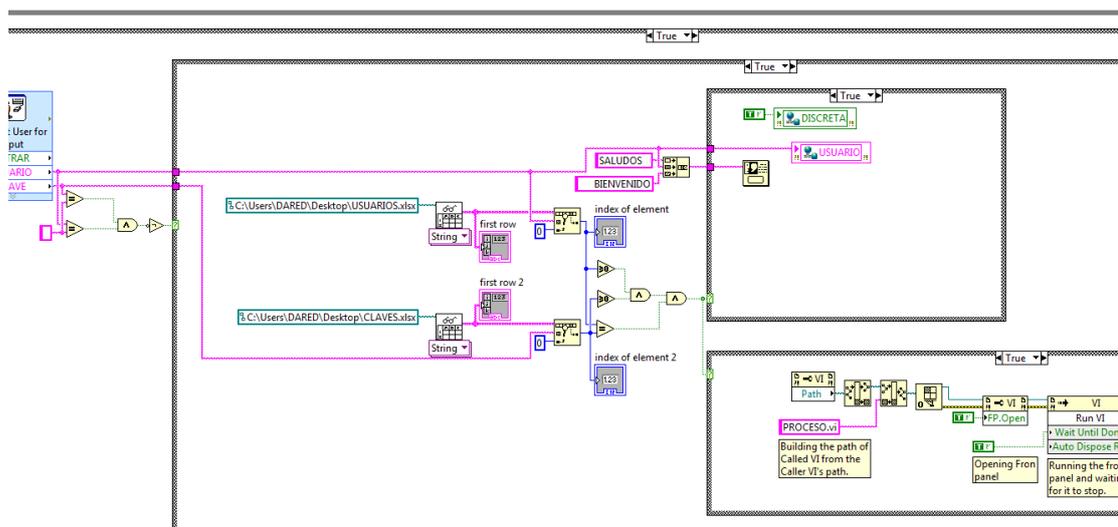


Figura V.45 Pantalla de usuario

Esta pantalla permite realizar las siguientes opciones:

- Crear un nuevo usuario
- Ingresar usuario con la clave correspondiente

Es decir este Panel está conformado por los SubVi's creados para el manejo de usuarios para el control de ingreso a la planta.

### 5.2.2 Pantalla del proceso

La figura V.46 muestra el acondicionamiento y lectura de las señales de los sensores de caudal y nivel.

Se realiza el control PID para generar la variable de control que va en un rango de 0 a 10 vdc de acuerdo al error que se de en el proceso.

Muestra los indicadores de alarma de nivel, caudal mínimo y caudal máximo.

Muestra la gráfica de la consigna y la variable de proceso.

Genera la tabla de históricos la que contiene: día, fecha, hora, usuario y el caudal.

### MÓDULO DIDÁCTICO DE CONTROL DE CAUDAL

valor pid 100,00

CV 10,00

PV 0

VALOR REAL 2 15

LEE 0

LEE 1 -3200

conteo... -160

VALOR REAL 15

ON BOMBA

CONTROL 5

OUT\_PID 10

RESTA 0

Kc 0,77

Ti 0,025

Td 0,042

CONTROL PID SP [GPM]

5 2,5 0

2. 0

GPM

3 3,5 4 4,5 5

NIVEL MINIMO

STAR BOMBA

CUDAL MINIMO

Waveform Chart

Amplitude

Time

20:16:29,665 23/03/2012

20:16:34,665 23/03/2012

REGRESAR

HISTÓRICOS

ESCUOLA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

Five days on 1972

Mariposas - Ecuador

PROCESO.vi

File Edit View Project Operate Tools Window Help

HML\_CAUDAL\lrvprof\My Computer

ES 0:16 23/03/2012

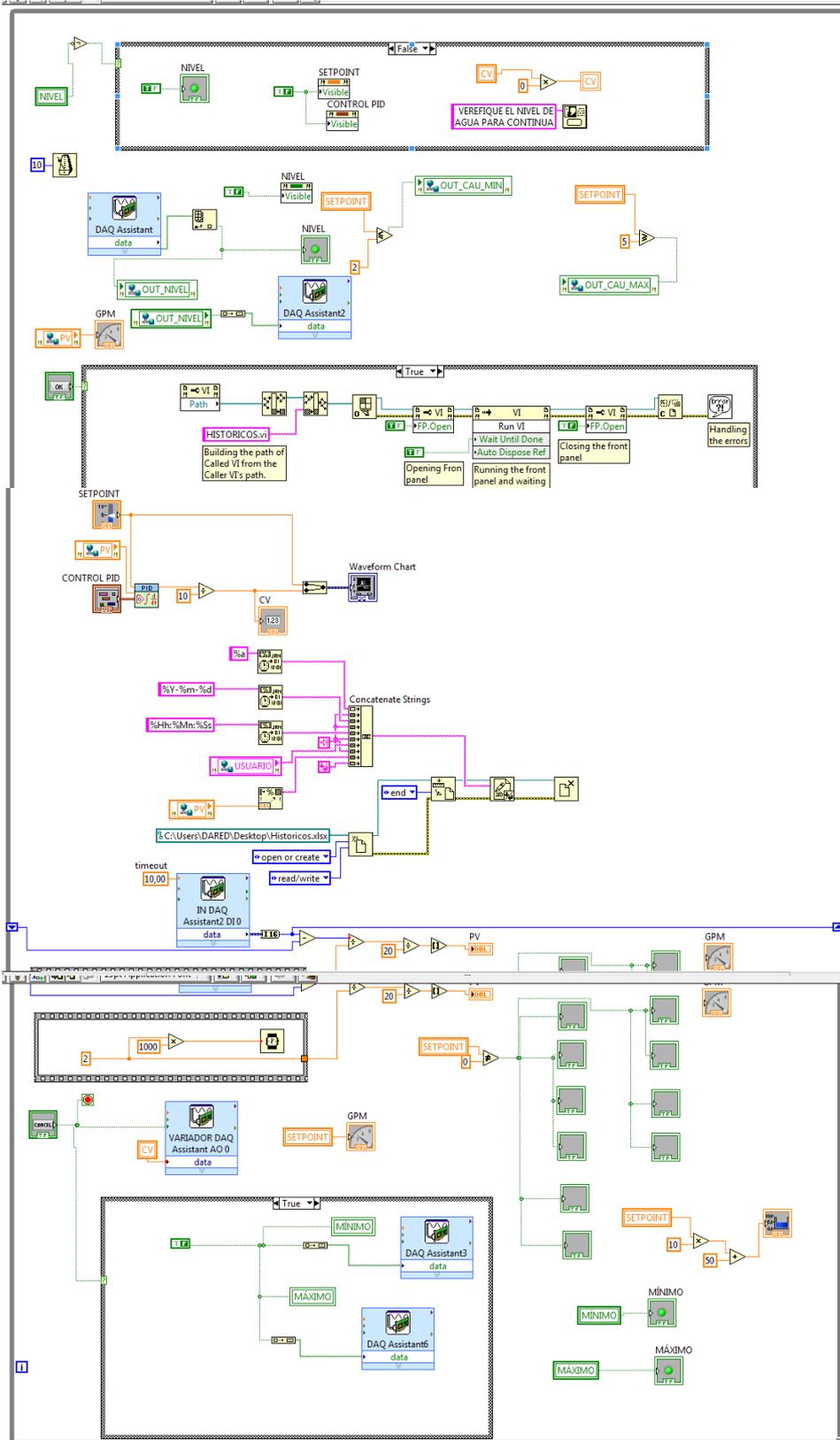


Figura V.46 Pantalla del proceso

### 5.2.3 Panel frontal de los históricos

Muestra los cambios que se van dando en la planta durante el tiempo de ejecución del programa.

HISTORIAL		HISTÓRICOS			REGRASAR
DÍA	FECHA	HORA	USUARIO	FLUJO (GPM)	
mié	2012-03-14	08h:29n:41s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:29n:43s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:29n:45s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:29n:47s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:29n:49s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:29n:51s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:29n:53s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:29n:55s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:29n:57s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:29n:59s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:30n:01s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:30n:03s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:30n:05s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:30n:07s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:30n:09s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:30n:11s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:30n:13s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:30n:15s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:30n:17s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:30n:19s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:30n:21s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:30n:23s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:30n:25s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:30n:27s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:30n:29s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:30n:31s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:30n:33s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:30n:35s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:30n:37s	EDISON	0,000000	
mié	2012-03-14	08h:30n:39s	EDISON	0,000000	

Tab Control

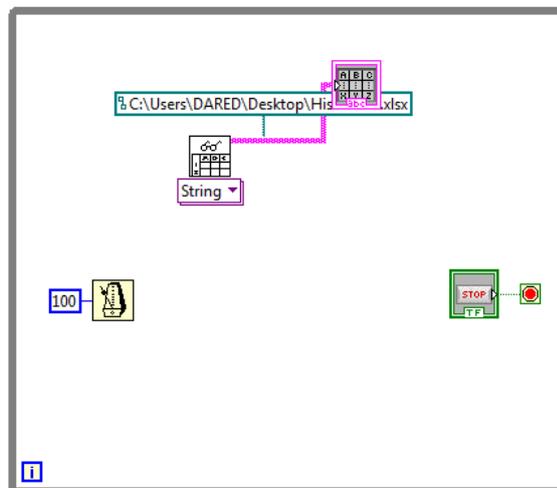


Figura V.47 pantallas de históricos

# CAPÍTULO VI

## PRUEBAS Y RESULTDOS

### 6.1 Pruebas de comunicación

La comunicación entre la HMI y la MyDaQ es fundamental para un buen funcionamiento del sistema, ya que sin éste no se cumplirá en gran parte el propósito didáctico para el cual fue creado.

Para verificar que existe comunicación entre la HMI y la MyDaQ se recurrió a la pantalla principal de la HMI, en donde existe un indicador luminoso, que cuando se ejecuta esta pantalla se pone en rojo el indicador de caudal mínimo, mientras no se modifique el sep point permanecerá encendido.

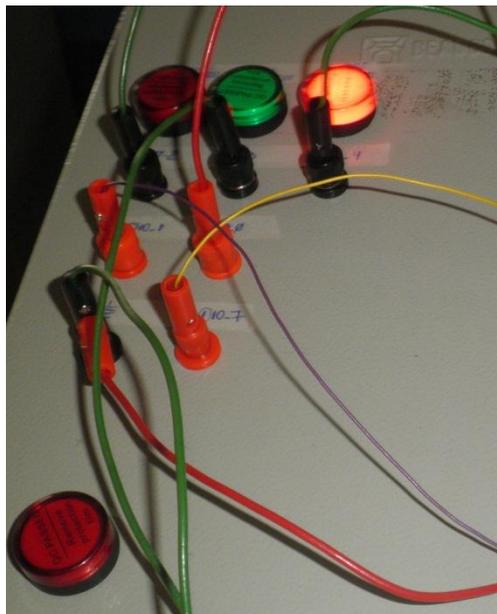


Figura VI.48 Panel indicador de caudal mínimo encendido



Figura VI.49 Pantalla HMI indicador caudal mínimo encendido

Repitiendo el mismo procedimiento y se interrumpe la ejecución del programa y se observa cómo se apaga el indicador, de la pantalla de LabView y del panel de control.

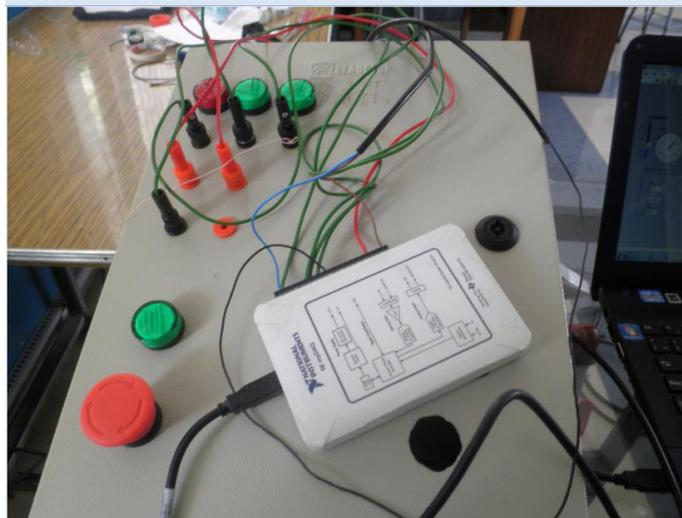


Figura VI.50 Panel indicador de caudal mínimo apagado



Figura VI.51 Pantalla HMI indicador caudal mínimo apagado

## 6.2 Pruebas de control de usuarios

Para verificar el ingreso solo de usuarios registrados previamente registrados por el administrador, se ejecutó la pantalla de control de usuario.

Se ingresa el usuario DARWIN con clave DARWIN e ingresa a la pantalla del proceso.



Figura VI.52 Pantalla usuario correcto

Del mismo modo se ejecutó la misma pantalla y se ingresó el usuario DARWIN con clave GAVILEMA



Figura VI.53 Pantalla usuario incorrecto

### 6.3 Respuesta dinámica del control PID

Entre los criterios que se podría evaluar la respuesta de un sistema están:

El método analítico y el método experimental.

#### Método analítico

Se determinan las ecuaciones o funciones de transferencia para cada componente del sistema.

Se escoge un modelo para representar al sistema (diagrama de bloques).

Se implementa el modelo del sistema.

Se determinan las características del sistema.

#### Método experimental

Las características dinámicas y estáticas del sistema se obtienen a partir de una serie de medidas que se realiza al sistema físico.

Aprovechando las ventajas de LabVIEW, y dado que el sistema esta implementado en su totalidad y trabajando en forma normal, se procederá a calibrar el PID usando el método experimental.

Primero se utilizó el VIs de auto sintonía PID que proporciona LabView con el propósito de obtener parámetros de referencia de las constantes  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ . De esta forma se obtuvo.

$K_p=0.5$ ,  $T_i=0.025$  y  $T_d=0$

De acuerdo a los parámetros obtenidos para las constantes,  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ , variando el flujo de 2 a 5GPM se obtuvo el siguiente resultado.



Figura VI.54  $K_p=0,55$ ,  $T_i=0,025$  y  $T_d=0$



Figura VI.55 caudal de 5 a 2gpm

#### 6.4 Pruebas de control de velocidad de la bomba desde el variador

Uno de los propósitos del módulo de control de caudal es trabajar con diferentes tipos de controladores, por ejemplo la MyDaQ, cumpliendo de esta forma el fin didáctico del módulo.

Para lo cual se debe cambiar de modo remoto a local.



Figura VI.56 Pruebas del variador desde al panel del variador a 20 HZ

Aquí se trabaja directamente sobre el panel del variador, es decir que se esta trabajando en lazo abierto.



Figura VI.57 HMI con control de velocidad desde el panel del variador.

Con las pruebas realizadas en este capítulo se puede afirmar que el módulo de control de caudal cumple con las expectativas de ser didáctico tanto en su estructura física panel, como en la parte de control desde la HMI, lográndose así un sistema amigable al usuario para la fácil comprensión y operación del mismo.

## CONCLUSIONES

- Una vez finalizado el proyecto se ha cumplido con los objetivos, se ha analizado diseñado y construido un módulo de control de caudal controlado por medio de una tarjeta de adquisición de datos NI myDAQ que permite la utilización de entradas y salidas analógicas, así como su programación a través de LabVIEW®. 8.10
- Este módulo que utiliza sensores de caudal y nivel satisface plenamente las necesidades para analizar el comportamiento de la variable caudal.
- El control de la variable caudal se la realiza mediante un PID encargado de estabilizar el sistema y mantenerlo en el caudal deseado.
- El análisis, diseño y programación de Labview permite el desarrollo e implementación de aplicaciones de control industrial mediante la comunicación con tarjetas de adquisición de datos.
- La aplicación del módulo de caudal constituye un importante aporte para el aprendizaje de los estudiantes en el campo de instrumentación, sensores y sistemas de control.

## RECOMENDACIONES

- Antes de iniciar el funcionamiento de la planta verificar que el nivel de agua del tanque de almacenamiento tenga un nivel mínimo apropiado de agua para que la bomba no sufra daños al momento del arranque.
- Verificar que la toma de alimentación a la planta sea de 220 Vac con puesta a tierra, debido a que los elementos utilizados en el módulo requieren de este nivel de voltaje para su óptimo funcionamiento.
- Antes de la utilización del módulo de control de caudal se deben analizar los componentes del que está conformado, ya sean fuentes de alimentación, terminales de entrada y salida, e interconexión de los mismos con interruptores y luces piloto para evitar su mala utilización y deterioro.
- Se debe realizar un mantenimiento periódico que garantice la vida útil de este equipo. Esto comprende la revisión y comprobación de sus partes, análisis de conexiones eléctricas entre otros.
- Tener cuidado con la tarjeta de adquisición de datos NI myDAQ, debido a que si se produce una sobrecarga de voltaje o se conecta erróneamente una alimentación mayor de la necesaria puede ocasionar daños en sus elementos internos.

## RESUMEN

En este proyecto se diseña y construye un módulo didáctico de control de caudal para el laboratorio de control de la Escuela Ingeniería Electrónica, Control y Redes Industriales (EIE-CRI) de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

En la investigación aplicamos el método analítico para determinar las ecuaciones o función de transferencia para cada componente del sistema obteniendo de esta manera la función de transferencia que gobierna la planta.

Para medir el caudal de agua se utilizó un sensor tipo turbina marca KOBOLD debido a su linealidad y exactitud, del orden de  $\pm 0.3\%$ . Para el control de la planta se utilizó una tarjeta de adquisición de datos de NATIONAL INSTRUMENTAL "My DAQ" encargada de realizar la comunicación entre la interfaz de control y el módulo de caudal de agua. El incremento o descenso del caudal se lo hace variando la velocidad de la bomba trifásica de la marca BALDOR, mediante la utilización del convertidor de frecuencia ACS350 de ABB. El valor de consigna es ingresado desde una interfaz de comunicación Hombre – Máquina desarrollada en el software LabVIEW 2009, para la circulación del fluido se instaló manguera pvc de  $\frac{3}{4}$ ", una válvula de bola y una válvula check, para depositar el agua de la planta se utilizó un tanque de vidrio.

Los resultados obtenidos en el módulo de caudal demuestran que puede controlar el caudal desde un punto mínimo que es 0.5 galones por minuto (GPM) hasta un punto máximo que es de 5 galones por minuto (GPM), con un error absoluto de 0.1 galones por minuto (GPM), lo que indica que es un sistema bastante confiable, además presenta tiempos de respuesta muy rápidos para alcanzar y mantener el punto de consigna deseado, logrando controlar la variable caudal.

La construcción del módulo de caudal constituye un importante aporte para el aprendizaje de los estudiantes en el campo del Control Industrial. Permite observar la utilización de uno de los diferentes tipos de sensores de caudal que utilizan los procesos industriales. Además, es una herramienta clara de simulación de procesos existentes en la industria actual logrando así que el nivel técnico adquirido por los estudiantes en el transcurso de su carrera se encuentre fortalecido.

Se recomienda integrar el módulo didáctico de control de caudal en las materias de instrumentación, sensores y sistemas de control, y sea reforzada la parte teórica con prácticas de laboratorio en el módulo de caudal.

## ABSTARCT

### **DEISNG AND CONSTRUTION OF A DIDACTIC MODULE OF CONTROL OF WEATH FOR THE LANORATORY OF CONTROL OF THE SCHOOL OF ELECTRONIC ENGINEERING CONTROL AND INDUSTRIAL NETWORKS AT ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO**

The construction of the module of wealth constitutes an important contribution for learning of the students in the field of industrial control; it allows observing the function of one of the various types of sensor of wealth that are used by the industrial processes. The absence of practical classes in the subjects of instrumentation, sensors, and control by the lack of teaching modules makes necessary the implementation of module.

The objective for this project is:

To build an operator panel that allows locating the different elements of the control module of wealth.

It is applied the analytical method to determine the equations or transfer function for earth component of the system obtaining in this way the transfer function that governs the plant.

To measure the flow of water was used a sensor type turbine brank KOBOLD because of its linearity and accuracy of the order of 0.3%, it also was placed a card acquisition of Instrumental National "My DAQ" to make communication between the control interface and module flow of water for the control of the plant. The increase or decrease of the flow is done by varying the speed of three phase pump brand BALDOR, through the use of the ACS350 of ABB frequency converter.

The value of watchword is entered from a communication interface Man-machine develop in the software LabVIEW 2009. For the movement of the fluid were installed a 3/4" PVC hose, a ball valve, and a valve check, while to deposit the water from the plant was used a glass tank.

The result obtained in the wealth module show that it can control the wealth from a minimal point that is 0.5 gallons per minute (GPM) to a maximum point that is 5 gallons per minute (GPM), with an absolute error of 0.1 gallons per minute (GPM), which indicates that is a system quite reliable, it also prevents very fast response times to achieve and maintain the set point desired and controlling the wealth variable.

It is recommended that the theoretical part be reinforced with laboratory practices in the wealth module and also in the area of instrumentations, sensor and control systems.

## GLOSARIO

**Acondicionamiento:** proceso de mejorar la salida de una señal amplificándola hasta un nivel adecuado para su posterior procesamiento.

**Daq:** Tarjeta de adquisición de datos tales como señales de voltaje o audio para aplicaciones electrónicas y de automatización.

**Error:** Es la diferencia entre la señal de referencia y la señal de salida real.

**Proceso:** Operación que conduce a un resultado determinado.

**Planta:** Es el elemento físico que se desea controlar. Planta puede ser: un motor, un horno, un sistema de disparo, un sistema de navegación, un tanque de combustible, etc.

**Retardo:** Lentitud en un sistema para alcanzar el punto de consigna.

**Sensor:** Dispositivo que a partir de la energía del medio en que se la mide proporciona una salida de señal transductible que es función de la magnitud que se pretende medir.

**Sensibilidad:** Expresa la repercusión que tiene en la salida del sensor un incremento en la magnitud de entrada.

**Sistema:** Consiste en un conjunto de elementos que actúan coordinadamente para realizar un objetivo determinado.

**Señal de salida:** Es la variable que se desea controlar (posición, velocidad, presión, temperatura, flujo, etc.). También se denomina variable controlada.

**Señal de referencia:** Es el valor que se desea que alcance la señal de salida.

**Señal de Control:** Es la señal que produce el controlador para modificar la variable controlada de tal forma que se disminuya, o elimine, el error.

**Señal analógica:** Es una señal continua en el tiempo.

## **BIBLIOGRAFIA GENERAL**

- 1.- BOLTON, W., Sistemas de Control Electrónico en la Ingeniería., 3a. ed., Guadalajara-México., Alfaomega., 2006., Pp.100-150
- 2.- CREUS SOLÉ, A., Neumática e Hidráulica., 3a. ed., México –México., Alfaomega., 2007., Pp.37-214
- 3.- OGATA, K., Ingeniería de Control Moderna., 3a. ed., México D.F.-México., McGraw- Hill., 1998., Pp.55-224
- 4.- PALLAS, R., Adquisición y Distribución de Señales., 2a. ed., Madrid-España., Columbus., 1993., Pp.52-112
- 5.- PROAKIS, J., Tratamiento Digital de Señales., 3a. ed., Los Ángeles-Estados Unidos., Prentice Hall., 1999., Pp.112-125
- 6.- RASHID, M., Electrónica de Potencia., 3a. ed., México-México., Pearson Prentice., 2004., Pp.70

1.- **SISTEMAS SCADA**

[www.personal.redestb.es/efiguera/memoria.htm](http://www.personal.redestb.es/efiguera/memoria.htm).

2012-01-10

[www.colsein.com.co](http://www.colsein.com.co)

2012-01-10

2.- **ALGORITMO DE CONTROL PID**

[http://es.wikipedia.org/wiki/Proporcional\\_integral\\_derivativo](http://es.wikipedia.org/wiki/Proporcional_integral_derivativo)

2012 -02 -02

<http://www.ijee.dit.ie/articles/Vol16-3/ijee1129.pdf>

2012-02-10

3.- **SENSOR DE FLUJO**

<http://portalecuador.ec/module-PageSetter-viewpub-tid-2-pid->

[208.php](#)

2012-02-10

**ANEXOS**

**Módulo de Control de Caudal**  
**Prácticas de Laboratorio N° 1**

**Sensor de caudal**

**Objetivos de la Práctica.**

- Analizar el comportamiento del sensor de caudal.
- Medir la señal entregada por el sensor.

**Información preliminar:**

El fundamento del sensor de caudal es la variación de la frecuencia en relación al paso de caudal.

**Módulo de Control de Caudal**  
**Prácticas de Laboratorio N° 2**

**Medir señales usando el osciloscopio NI ELVISmx con NI myDAQ**

**Objetivos de la Práctica.**

- Determinar las funciones de la librería NI ELVISmx.
- Graficar señales desde el PC a través del osciloscopio virtual de la NI myDAQ
- Medir señales de corriente, voltaje o continuidad de circuitos electrónicos.

**Información preliminar.**

Con NI ELVISmx, el dispositivo NI myDAQ tiene un Express VI asociado a LabVIEW.

Este Express VI te permite adquirir y medir señales de entrada como voltaje, corriente o el valor de resistencias de un circuito electrónico a través de la PC sin necesidad de usar un multímetro.

Esto te capacita a desarrollar aplicaciones de LabVIEW sin realizar una programación demasiado extensa.

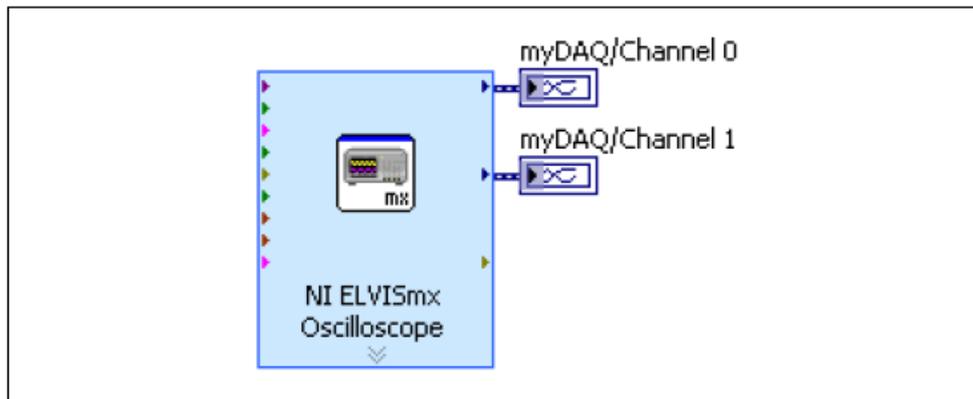
Para acceder al NI ELVISmx Express VIs, abre un diagrama de bloques en Labview y selecciona **Measurement I/O»NI ELVISmx** de la paleta de funciones.

La tabla muestra los NI ELVISmx Express Vis disponibles:

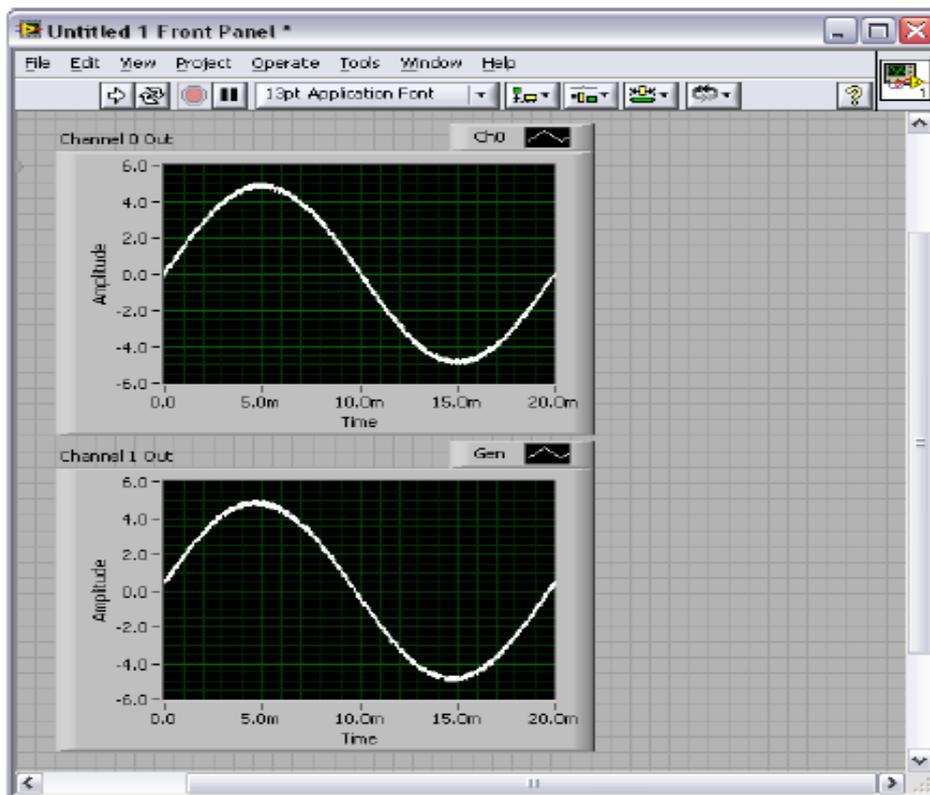
NI ELVISmx Express VI			
 NI ELVISmx Arbitrary Waveform Generator	 NI ELVISmx Bode Analyzer	 NI ELVISmx Digital Reader	 NI ELVISmx Digital Writer
 NI ELVISmx Digital Multimeter	 NI ELVISmx Function Generator	 NI ELVISmx Oscilloscope	—

## Procedimiento de la práctica 2

1. Abrir LabVIEW.
2. Click en Blank VI., seleccionar **Window»Show Block Diagram**
3. Para abrir la paleta ELVISmx Express VI , click derecho sobre la ventana del diagrama de bloques para abrir la paletas de funciones y seleccionar **Measurement I/O»NI ELVISmx**
4. Conectar las señales que desees medir a las puntas del dispositivo NI myDAQ.
5. En el tab Configuración seleccione para medir canal 0 o canal 1.
6. Si es necesario click en AUTO SETUP para automáticamente configurar los parámetros del osciloscopio.
7. en el diagrama de bloques, pick derecho sobre el Terminal de salida Channel 0 y seleccionar **Create»Graph Indicador**, esto crea un **indicador gráfico** sobre el panel frontal para visualizar la señal de dato.



8. click sobre el botón RUN para comenzar a adquirir la las mediciones.



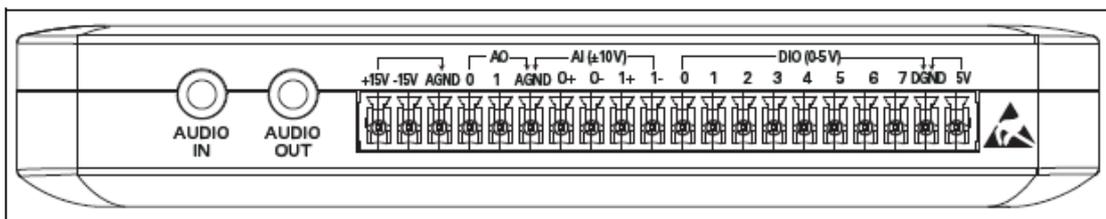
### Conclusiones:

Como podemos apreciar el Elvismx de la NI my Daq se convierte en una herramienta muy importante a la hora de medir señales desde un PC, es decir se convierte en un instrumento que actúa tanto como un osciloscopio permitiéndonos observar las formas de señales de entrada así también se lo puede utilizar como multímetro digital

## Componentes de la NI myDAQ

Texas Instruments Integrated Circuit (IC)	Part Number	Description
Current-Limited Power Distribution Switch	TPS2553	This is used for applications where precision current limiting is required or heavy capacitive loads and short circuits are encountered.
Regulator	TPS61170	This is a monolithic high-voltage boost regulator with an integrated 1.2 A, 40 V power MOSFET.
Regulator	TPS62007	The TPS6200x devices are a family of low-noise synchronous step-down DC-DC converter that is ideally suited for systems powered from a one-cell Li-ion battery or from a two- to three-cell NiCd, NiMH, or alkaline battery.
Regulator	TPS62003	
LDO Regulator	TPS71501	These are low-dropout (LDO) voltage regulators, offering the benefits of low noise, low-dropout voltage, low-power operation, and miniaturized packages.
LDO Regulator	TPS76433	
Digital Isolator	ISO7241A	This is a quad-channel digital isolator with multiple channel configurations and output enable functions.
Shift Register	SN74AHC595	This device contains an 8-bit serial-in, parallel-out shift register that feeds an 8-bit D-type storage register.
Switch	TS5A23159	This is a dual single-pole double-throw (SPDT) analog switch designed to operate from 1.65 V to 5.5 V.
Operational Amplifier	TLC2262	This is a dual low-noise rail-to-rail operational amplifier.
Operational Amplifier	TL062C	This JFET operational amplifier features high input impedance, wide bandwidth, high slew rate, low input offset, and input bias currents.

### Distribución de los puertos de la NI my DAQ.



Signal Name	Reference	Direction	Description
AUDIO IN	—	Input	<b>Audio Input</b> —Left and right audio inputs on a stereo connector
AUDIO OUT	—	Output	<b>Audio Output</b> —Left and right audio outputs on a stereo connector
+15V/-15V	AGND	Output	+15 V/-15 V power supplies
AGND	—	—	<b>Analog Ground</b> —Reference terminal for AI, AO, +15 V, and -15 V
AO 0/AO 1	AGND	Output	Analog Output Channels 0 and 1
AI 0+/AI 0-; AI 1+/AI 1-	AGND	Input	Analog Input Channels 0 and 1
DIO <0..7>	DGND	Input or Output	<b>Digital I/O Signals</b> —General-purpose digital lines or counter signals
DGND	—	—	<b>Digital Ground</b> —Reference for the DIO lines and the +5 V supply
5V	DGND	Output	5 V power supply

## Diagrama general de las conexiones del variador de frecuencia

