

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE CONTROL DE FLUJO**

#### **PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y CONTROL**

**JORGE LUIS MELO MEDINA**  
scorp.83@hotmail.com  
**OSCAR MAURICIO QUILLUPANGUI CARGUA**  
oscarmauricio321@yahoo.com

**DIRECTOR: Dr. Luis Aníbal Corrales Paucar**  
luisco5049@yahoo.com

**Quito, Marzo del 2010**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Jorge Luis Melo Medina y Oscar Mauricio Quillupangui Cargua, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Jorge L. Melo M.

---

Oscar M. Quillupangui C.

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jorge Luis Melo Medina y Oscar Mauricio Quillupangui Cargua, bajo mi supervisión.

---

**Dr. Luis Corrales**  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres y mi hermana por el apoyo incondicional que me entregaron y la paciencia que me tuvieron durante todos estos años de estudiante.

Agradezco a todos mis amigos y personas que de una u otra manera hicieron posible con su apoyo la culminación de este proyecto.

Agradezco a la “ESCUELA POLITECNICA NACIONAL”, por haberme brindado la oportunidad de adquirir excelentes conocimientos y así forjarme como profesional.

Un agradecimiento muy especial para el Dr. Luis Corrales por haber dirigido este proyecto.

Jorge L. Melo M.

## AGRADECIMIENTO

A mis padres y mi familia por su apoyo y confianza.

A mis compañeros y amigos de universidad por su apoyo y por compartir los mejores años.

A la empresa IX Biotron del Ecuador y mis compañeras y compañeros de trabajo por permitirme desarrollar éste proyecto de titulación.

A la Escuela Politécnica Nacional por su preparación técnica y en especial al Doctor Luis Corrales por su colaboración y enseñanza.

Oscar M. Quillupangui C.

## DEDICATORIA

A mis padres por todo su amor, comprensión y sabios consejos que me dieron a lo largo de toda mi carrera, ya que ellos han sido pilares fundamentales de mi vida y gracias a ellos he logrado culminar mis estudios superiores.

Jorge L. Melo M.

## DEDICATORIA

A mi madre por su apoyo y amor incondicional, y por ser mi inspiración como persona y como profesional.

Oscar M. Quillupangui C.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN.....	ii
CERTIFICACIÓN.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
DEDICATORIA.....	vi
CONTENIDO.....	viii
RESUMEN.....	xiii
PRESENTACIÓN.....	xiv

### CONTENIDO

#### CAPÍTULO 1

##### DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CONTROL DE FLUJO

1.1 DEFINICION DE FLUIDO.....	1
1.2 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS.....	3
1.2.1 VISCOSIDAD.....	3
1.2.2 COMPRESIBILIDAD.....	4
1.2.3 TENSIÓN SUPERFICIAL.....	5
1.2.4 MASA ESPECÍFICA.....	6
1.2.5 PESO ESPECÍFICO.....	6
1.2.6 DENSIDAD.....	6
1.3 FLUIDOS IDEALES Y REALES.....	6



1.4	ESTÁTICA DE FLUIDOS.....	7
1.5	DINÁMICA DE FLUIDOS.....	9
1.5.1	FLUJOS INCOMPRESIBLES Y SIN ROZAMIENTO.....	10
1.5.2	EL TEOREMA DE BERNOULLI.....	10
1.5.3	FLUJOS VISCOSOS: MOVIMIENTO LAMINAR Y TURBULENTO.....	10
1.5.4	NÚMERO DE REYNOLDS.....	12
1.5.5	FLUJOS COMPRESIBLES.....	14
1.5.6	LEY DE POISEUILLE.....	15
1.5.7	PERFIL DE VELOCIDADES.....	16
1.6	TEORÍA DE LA MEDICIÓN DE CAUDALES Y VOLÚMENES DE AGUA E INSTRUMENTAL NECESARIO DISPONIBLE EN EL MERCADO.....	17
1.6.1	MEDIDORES VOLUMÉTRICOS. ....	18
1.6.1.1	Medidores de presión diferencial.....	18
1.6.1.2	Medidores de área variable.....	19
1.6.1.3	Medidores de fuerza.....	21
1.6.1.4	Medidores de desplazamiento positivo.....	21
1.6.1.5	Medidor de velocidad.....	23
1.6.1.6	Medidores de tensión inducida.....	25
1.7	BOMBAS.....	26
1.7.1	CLASIFICACIÓN.....	27
1.7.1.1	Bombas de desplazamiento positivo o Volumétrico.....	27
1.7.1.2	Bombas rotodinámicas.....	28

1.7.2 PUNTO DE OPERACIÓN.....	31
1.7.3 CURVAS DE ISOEFICIENCIA.....	31
1.8 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA Y SU FUNCIONAMIENTO.....	32

## **CAPITULO 2**

### **DISEÑO DEL MÓDULO DE CONTROL DE FLUJO**

2.1 ESTRUCTURA DEL MÓDULO DE CONTROL DE FLUJO.....	34
2.1.1 SOPORTE Y TUBERÍA.....	35
2.1.2 SELECCIÓN DE LA BOMBA CENTRÍFUGA.....	37
2.1.3 SELECCIÓN DEL ACTUADOR.....	41
2.1.4 SELECCIÓN DEL SENSOR DE FLUJO.....	43
2.1.5 SELECCIÓN DE CONTROLADOR.....	45
2.1.6 TD 200.....	46
2.1.7 SELECCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS Y PROTECCIONES.....	47
2.1.8 SENSORES DE NIVEL.....	49
2.2 ALIMENTACIÓN DE RED Y DESCRIPCIÓN DE FUENTES...	50

## **CAPITULO 3**

### **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL MEDIANTE PLC**

3.1	SELECCIÓN DEL CONTROLADOR INDUSTRIAL.....	51
3.2	DESCRIPCIÓN DE LAS ACCIONES DEL CONTROL.....	52
3.2.1	MODO LOCAL.....	52
3.2.2	MODO REMOTO.....	52
3.3	DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO.....	53
3.3.1	DESARROLLO DEL CONTROL MEDIANTE PLC.....	54
3.3.2	DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE CONTROL.....	55
3.3.3	CONFIGURACIÓN DEL TD200.....	56
3.3.4	MEDICIÓN DE FRECUENCIA CORRESPONDIENTE AL FLUJO DE SALIDA.....	58
3.3.5	VARIABLES COMPARTIDAS EN LA COMUNICACIÓN CON LA HMI.....	60
3.3.6	PROGRAMACIÓN DEL VARIADOR DE VELOCIDAD..	63

## **CAPITULO 4**

### **DISEÑO DE LA HMI DEL SISTEMA**

4.1	SOFTWARE DE VISUALIZACION: INTOUCH 7.1.....	66
4.2	INSTALACIÓN DEL SOFTWARE PARA LA HMI.....	67
4.2.1	OPCLINK.....	67
4.2.1.1	Configuración OPCLink.....	68
4.2.2	OPC BROWSER.....	70

4.2.2.1 Configuración OPCBrowser.....	71
4.3 DISEÑO DE LA HMI.....	74
4.3.1 PROGRAMACIÓN DE LAS PANTALLAS DE LA HMI...77	
4.3.1.1 Definición de los Tagnames.....	79
4.3.1.2 Scripts de la HMI.....	79
4.3.1.3 Curvas Históricas y Reales.....	80
4.3.2 COMUNICACIONES I/O.....	81
4.3.2.1 InTouch Access Name.....	82
4.3.2.2 Establecimiento del tipo de Comunicación.....	83
4.3.2.3 Comunicación entre el PLC e Intouch.....	85

## **CAPITULO 5**

### **PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1 PRUEBAS DE COMUNICACIÓN.....	89
5.2 RESPUESTA DINÁMICA DEL CONTROL PID.....	91
5.3 RESPUESTA DEL SISTEMA A PERTURBACIONES.....	96
5.4 PRUEBAS DE CONTROL DE VELOCIDAD DE LA BOMBA DESDE EL VARIADOR.....	100
5.5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	102
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>104</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>106</b>

## RESUMEN

En este proyecto se diseña y construye un módulo didáctico de control de flujo, para mejorar el proceso de enseñanza de laboratorio.

El módulo fue diseñado y construido de tal manera que pueda tener varias alternativas de control de la planta, sean estas las diseñadas para esta aplicación, u otras alternativas de control que permitan probar otras propuestas de solución.

Para medir el flujo se utilizó un sensor tipo turbina marca KOBOLD debido a su linealidad y exactitud, del orden de  $\pm 0.3\%$ , y además es de bajo costo. Para el control de la planta se utilizó el Controlador Lógico Programable S7-200 CPU 224XP donde se implementó un algoritmo "PID" de control. El incremento o descenso del flujo se lo hace variando la velocidad de una bomba de inducción, mediante la utilización del variador de velocidad SINAMICS G110.

Mediante un selector el flujo puede ser variado y monitoreado de manera local o remota. En modo local se ingresa el valor de consigna desde un display de texto "TD200" ubicado en la parte frontal del panel. En modo remoto el valor de consigna es ingresado desde una interfaz de comunicación Hombre – Máquina desarrollada en InTouch 7.2.

Pruebas realizadas mostraron que se puede controlar el flujo desde un punto mínimo que es 0.5 GPM hasta un punto máximo que es de 5 GPM, con un error absoluto de 0.1GPM

## PRESENTACIÓN

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño e implementación de un sistema de control mediante un PLC, para controlar el flujo dentro de una tubería. Además mediante una Interfaz Hombre – Máquina (HMI), se puede visualizar la respuesta del sistema.

En el capítulo uno se analiza las características de los fluidos y sus propiedades, también se analiza los distintos tipos de sensores de flujo y su utilización dependiendo de la aplicación, así mismo, se analizan los tipos de bombas para escoger la más apropiada para esta aplicación.

En el capítulo dos se selecciona todos los elementos que formaran la parte física del módulo, también se explica el diseño y la construcción del mismo.

En el capítulo tres se diseña e implementa el algoritmo de control PID en el PLC S7-200 CPU 224XP, también se configura el display de texto “TD200” y las variables a compartir con la HMI.

En el capítulo cuatro se desarrolla la HMI mediante el software InTouch 7.2 en la cual se tiene controles numéricos para variar el valor de consigna del flujo.

Además tiene indicadores de los parámetros de la bomba esto es voltaje, frecuencia y velocidad a la cual está funcionando. Y una pantalla de visualización de históricos en donde se puede observar tanto el valor actual del flujo como el valor de consigna, simultáneamente.

El capítulo cinco abarca lo que son las pruebas y los resultados que se realizaron al sistema y las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

Finalmente se presentan las referencias bibliográficas y los anexos en los que se muestran las características técnicas de algunos elementos usados en el presente proyecto.

## **CAPÍTULO 1.**

### **DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CONTROL DE FLUJO.**

## CAPÍTULO 1.

### DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CONTROL DE FLUJO

#### OBJETIVO

Diseño y construcción de un módulo didáctico de control de flujo en base a módulos didácticos comerciales, para el laboratorio de instrumentación.

#### 1.1 DEFINICION 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.

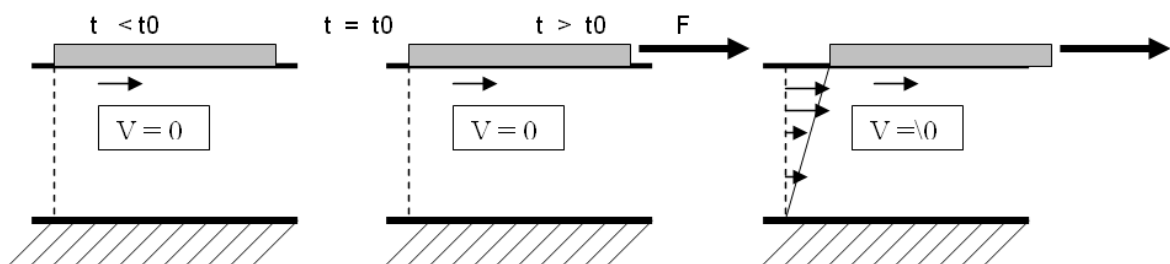


Figura 1.1 Comportamiento de un fluido sometido a una fuerza de corte o tangencial.

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.

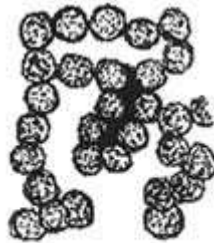


Figura 1.2 Moléculas de un líquido.

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 1.3 Moléculas de un gas.

## 1.2 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.

### 1.2.1 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.

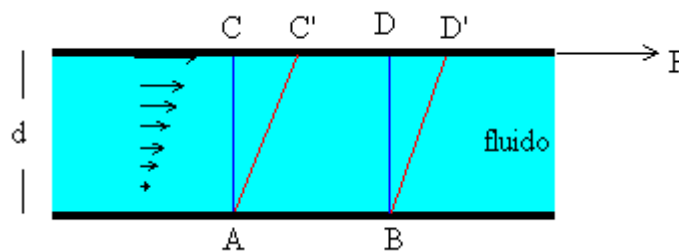


Figura 1.4. Comportamiento de un fluido.

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  $ABC'D'$ .

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

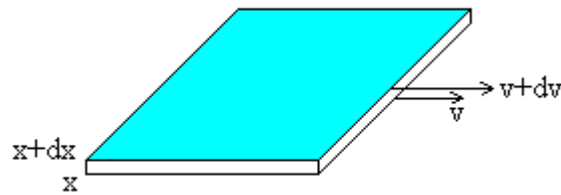


Figura 1.5 Dos capas de fluido con  $dx$  y  $dv$ .

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

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

En el caso particular, de que la velocidad aumente uniformemente, como se indicó en la Figura 1.4, la ecuación (1) se escribe

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{v}{d} \quad (\text{Ec. 1.2})$$

### 1.2.2 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.

$$PV = nRT \quad (\text{Ec. 1.3})$$

Donde:

$P$  = Presión

$V$  = Volumen

$n$  = Moles de Gas.

$R$  = Constante universal de los gases ideales.

$T$  = Temperatura absoluta

### 1.2.3 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	$\beta$	g/ms	1,0	0,02
Calor específico	$C_p$	J/kg <sup>o</sup> K	4.200	1.008
Presión de vapor (20°)	$P_v$ $\check{O}$	bar mN/m	0,023 72,8	- -
Tensión Superficial				

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

#### 1.2.4. 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:

$$P = \lim_{v \rightarrow 0} \left( \frac{m}{v} \right) \quad (\text{Ec. 1.4})$$

#### 1.2.5. 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:

$$\beta = g * P \quad (\text{Ec. 1.5})$$

Donde  $g$  representa la intensidad del campo gravitacional.

#### 1.2.6. 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>].

### 1.3. 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.

#### **1.4. 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, y se conoce como principio de Pascal. Dicho principio, que tiene aplicaciones muy importantes en hidráulica, afirma que la presión aplicada sobre un fluido contenido en un recipiente se transmite por igual en todas direcciones y a todas las partes del recipiente, siempre que se puedan despreciar las diferencias de presión debidas al peso del fluido y a la profundidad.

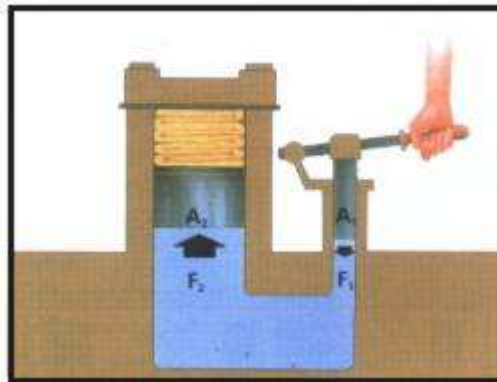


Figura 1.6 Transmisión de la presión aplicada sobre un fluido.

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:  $F_2 = F_1 \cdot (A_2/A_1)$

El segundo principio importante de la estática de fluidos fue descubierto por el matemático y filósofo griego Arquímedes. El principio de Arquímedes 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.

## 1.5. DINAMICA 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 1.800 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.

### **1.5.1. 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.

### **1.5.2. 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.

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.

### **1.5.3 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 al 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.

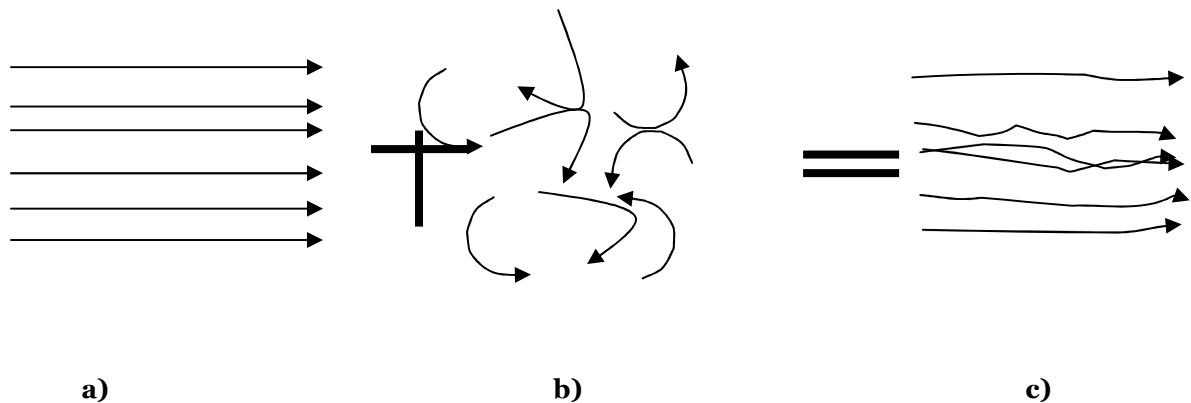


Figura 1.7. a) Flujo principal b) Remolinos c) Flujo turbulento.

#### 1.5.4. NÚMERO DE REYNOLDS

El número de Reynolds es un número adimensional utilizado en mecánica de fluido, 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  $2000 \leq Re \leq 4000$  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:

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu} \quad (\text{Ec. 1.6})$$

$$Re = \frac{v_s D}{\nu} \quad (\text{Ec. 1.7})$$

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

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

(Ec. 1.8)

### 1.5.5. 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.

#### 1.5.6. LEY DE POISEUILLE

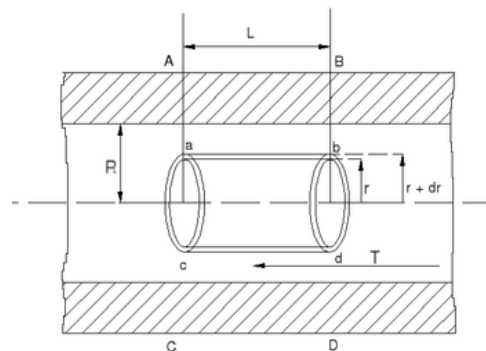


Figura 1.8 Flujo viscoso dentro de una tubería de radio  $R$  y longitud  $L$ .

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:

$$F=(p_1-p_2)\pi r^2 \quad (\text{Ec. 1.9})$$

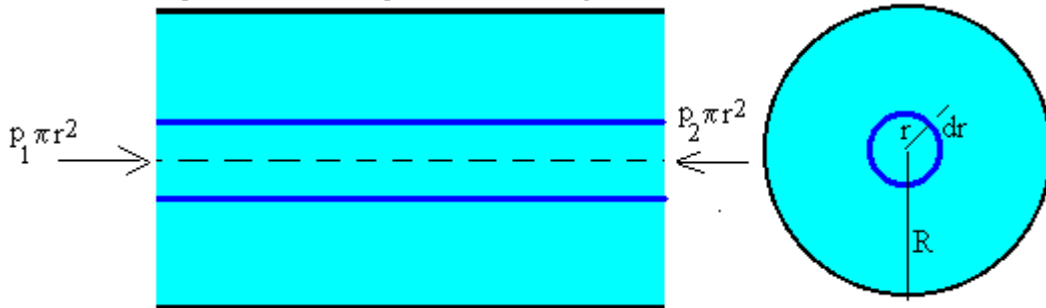


Figura 1.9 Capa de fluido comprendida entre  $r$  y  $r+dr$ .

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  $r$ .

$$\frac{(p_1 - p_2) \pi r^2}{2 \pi r L} = -\eta \frac{dv}{dr} \quad (\text{Ec. 1.10})$$

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

### 1.5.7. 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.

$$-\int_v^0 dv = \frac{p_1 - p_2}{2 \eta L} \int_r^R r dr \quad (\text{Ec. 1.11})$$

$$v = \frac{p_1 - p_2}{4 \eta L} (R^2 - r^2) \quad (\text{Ec. 1.12})$$

Que es la ecuación de una parábola.

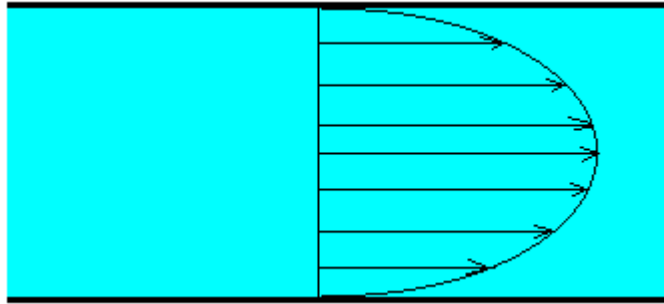


Figura 1.10 Perfil de velocidades.

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

## **1.6. 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.

### **1.6.1. MEDIDORES VOLUMÉTRICOS**

#### **1.6.1.1 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.

#### **1.6.1.2. 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 1.11, 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.

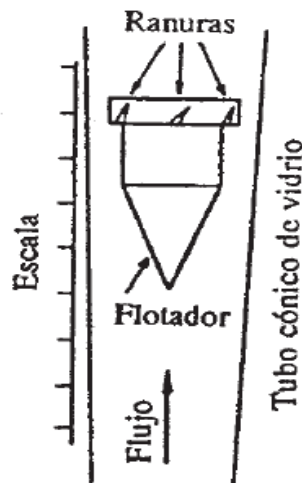


Figura 1.11 Rotámetro de tubo de vidrio cónico y flotador.

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.

### 1.6.1.3. 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 1.12.

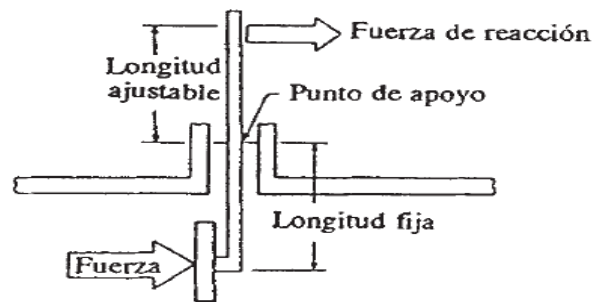


Figura 1.12 El principio de funcionamiento del medidor de placa de resistencia.

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.

### 1.6.1.4. 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.

#### 1.6.1.5. Medidor de velocidad

##### Medidores de turbina

Los medidores para gas y para líquido funcionan bajo el mismo principio. La Figura 1.13 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.

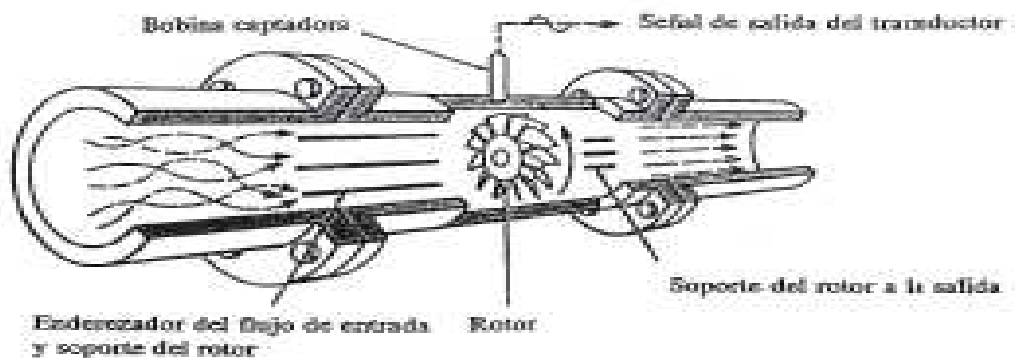


Figura 1.13 Sección transversal de un medidor de turbina para líquidos.

Una teoría sencilla sobre el funcionamiento de los medidores de turbina puede comprenderse mediante la Figura 1.14, que muestra un diagrama simplificado de la velocidad para una paleta de un medidor ideal.

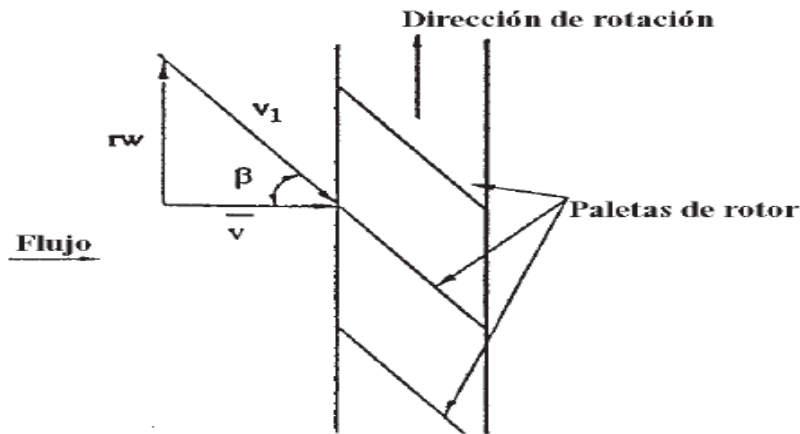


Figura 1.14 Diagrama simplificado de la velocidad para un medidor de turbina ideal.

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 1.15.

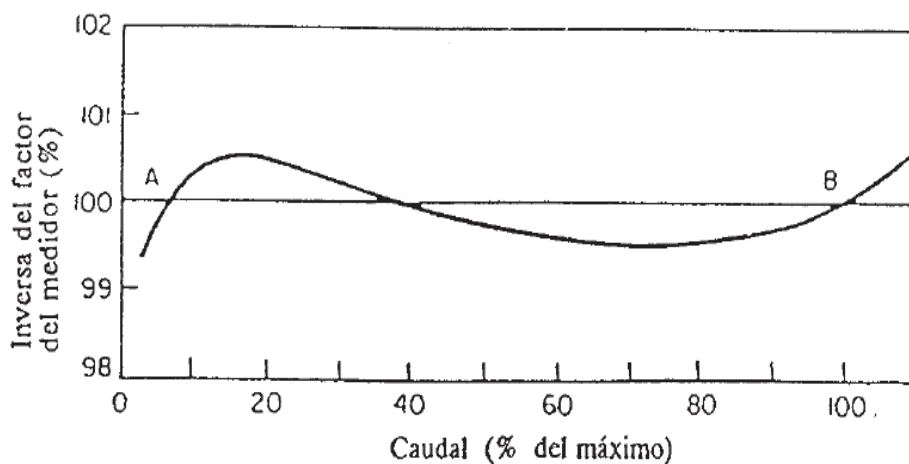


Figura 1.15 Curva de comportamiento de un medidor de turbina para líquidos.

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.

#### 1.6.1.6. 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 1.16, 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.

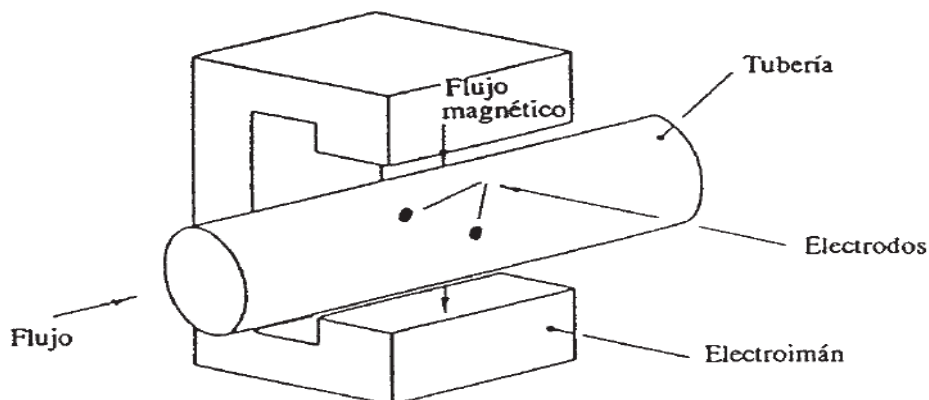


Figura 1.16 Elementos de un medidor electromagnético.



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.

## **1.7. 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 sí 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).

### **1.7.1. 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

#### **1.7.1.1. 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 éste 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 éste tipo de bombas pueden subdividirse en:

- Bombas de émbolo alternativo, son las que poseen 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 éste 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, son aquellas 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 éste tipo de máquinas son

La bomba de paletas,

La bomba de lóbulos,

La bomba de engranajes,

La bomba de tornillo o bomba peristáltica

### **1.7.1.2. Bombas rotodinámicas**

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 rodetes 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 Centrífugas.

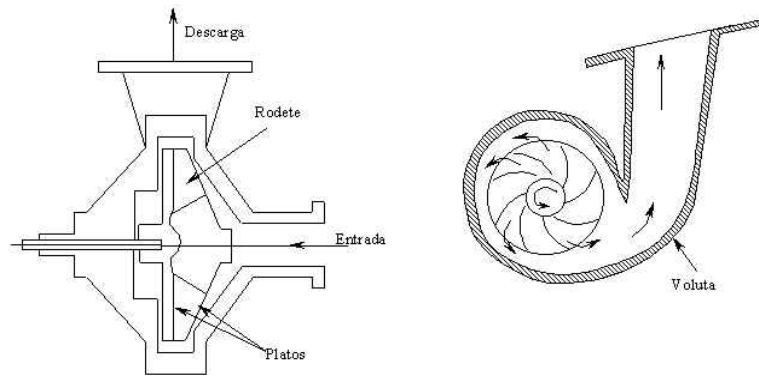


Figura 1.17 Bomba centrífuga.

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 carcaza 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 ACIDO, 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 acerotermoplástico 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.

### 1.7.2. 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 1.18.

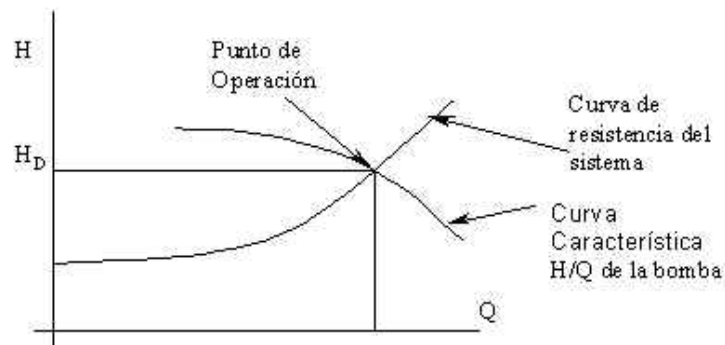


Figura 1.18 Punto de operación de una bomba.

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.

### 1.7.3. 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 1.19. 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.

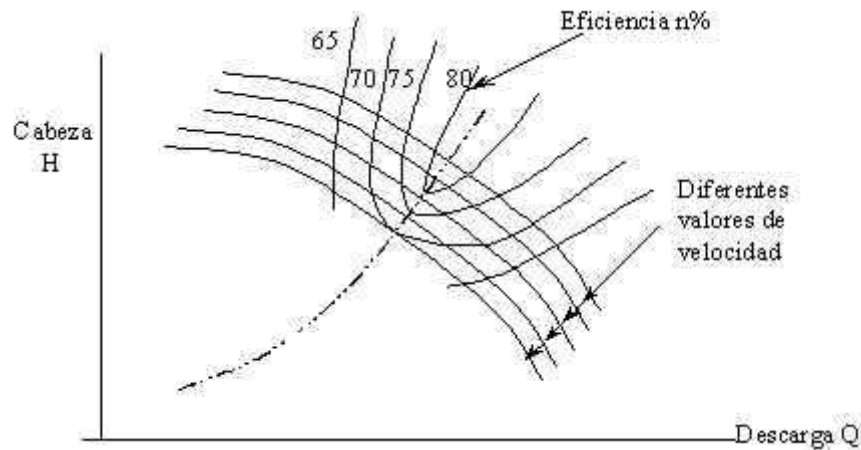


Figura 1.19 Curvas de isoeficiencia

## 1.8. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA Y SU FUNCIONAMIENTO

El proceso consiste en el transporte de fluido a través de tuberías y está formado por los siguientes elementos: un conjunto de mangueras transparentes de 3/4 de pulgada, sensor de flujo tipo turbina con rango de caudal de 2 a 40  $l/min$  agua con salida de pulsos en función del flujo, un PLC S7-200 con CPU 224 XP, una bomba centrífuga, variador de velocidad, un visualizador de texto TD 200 de Siemens, un selector que permite la selección entre control manual y automático, una válvula de bola y una válvula check de 3/4 de pulgada, un tanque de suministro de fluido, conectores de alimentación de 110 [VAC] y 220 [VAC], protecciones y luces indicadores de funcionamiento.

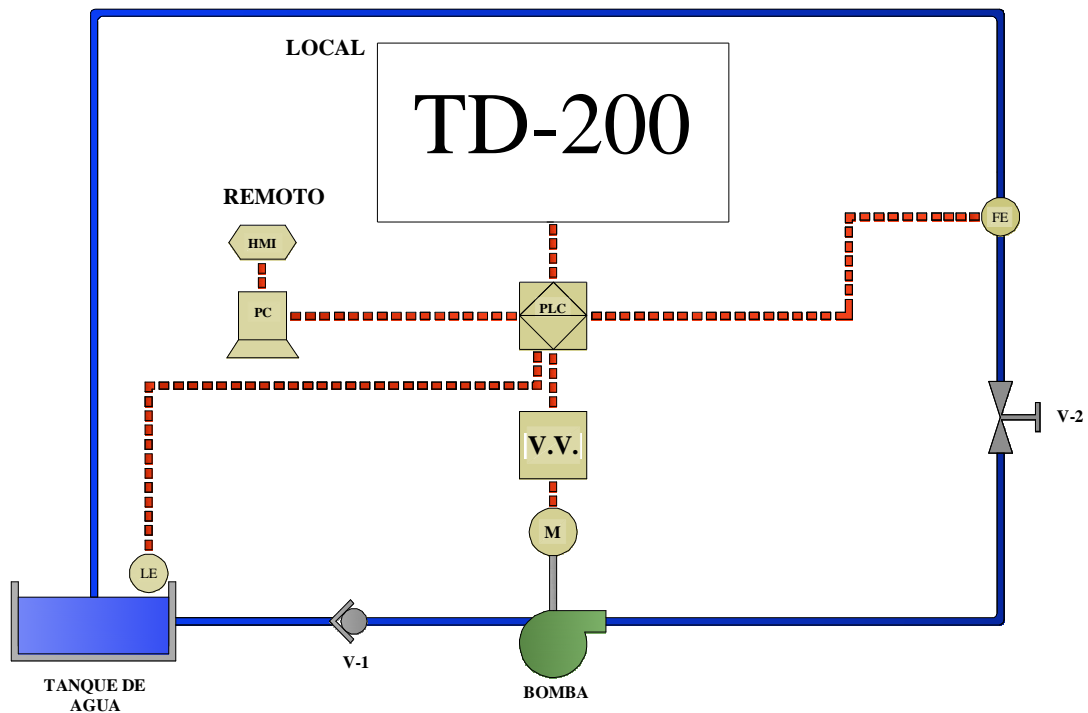


Figura 1.20 Esquema del módulo de control de flujo

En la Figura 1.20 se muestra el diagrama de instrumentación del proceso de flujo, donde se aprecian los elementos que lo forman así como el lazo de control realimentado.

Se puede observar que el valor de consigna puede ser cambiado a voluntad tanto en modo local o remoto, es decir por medio del visualizador de texto TD 200 o por la interfaz HMI en un computador respectivamente. El lazo de realimentación se realiza por medio del sensor de tipo turbina. En el PLC se realiza el algoritmo de control PID, en el cual se realiza el control PI para esta aplicación. El PLC envía una señal análoga al variador, para que éste haga a su vez el control de velocidad de la bomba, teniendo así el control del flujo de agua.

Una vez analizado los diferentes elementos que influirán en el diseño del módulo, se procederá a la selección de cada uno de ellos.



## **CAPÍTULO 2.**

### **DISEÑO DEL MÓDULO DE CONTROL DE FLUJO.**

## CAPITULO 2.

### DISEÑO DEL MÓDULO DE CONTROL DE FLUJO

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

#### 2.1. ESTRUCTURA DEL MÓDULO DE CONTROL DE FLUJO

Para el módulo de control se optó por un esquema en lazo cerrado con realimentación negativa con los componentes que se muestran en la Figura 2.1. En lazo cerrado se trabaja con la señal de error, que es la diferencia entre el punto de consigna y la señal realimentada, para reducir el error y de esta forma producir a la salida del sistema un valor conveniente. En el Capítulo 3 se realizará el diseño del software del controlador y sus componentes asociados.

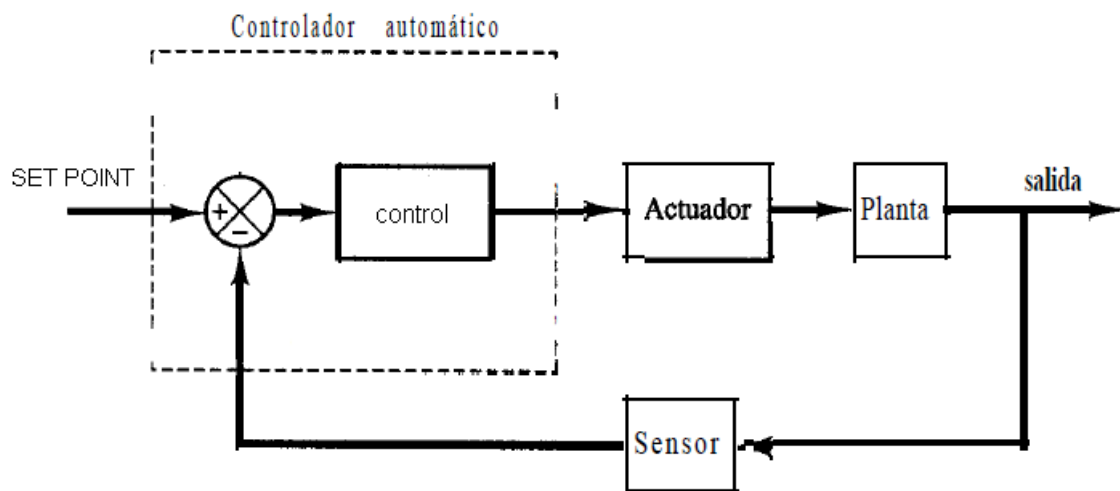


Figura 2.1 Control en lazo cerrado implementado para el control de flujo.

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.

### **2.1.1. 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 ángulo de hierro de:  $\frac{3}{4}$  de pulgada de  $\frac{1}{8}$  de pulgada de grosor, y tres planchas de aglomerado de 15 [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:

$$A1 * V1 = A2 * V2 = A3 * V3 \quad (\text{Ec. 2.1})$$

O también:

$$Q = A * V \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:                    A es la sección transversa del tubo.  
                              V velocidad del fluido.

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 tipo transparente para la observación del flujo del líquido. La disposición de la tubería es de tal forma que ésta es de fácil acceso al operador. En la Figura 2.2 se observa la disposición del soporte y la tubería.



Figura 2.2 Soporte, tubería y panel de instrumentos del módulo de control de flujo.

### 2.1.2. 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 sistema domésticos y para la distribución automática del agua.

Para calcular la potencia de la bomba se requiere conocer el numero 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 1 Longitud equivalente de conexiones a tubería en metros.

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

$$HP = \frac{Q * h}{76 * n} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

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 ¼ a 2 HP = 50 a 60 %
- De 2 ½ 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.

$$ADT = h + \sum hf + \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Donde:

$h$  = la altura geométrica entre el nivel inferior y el nivel superior del liquido,  
 $h_s$  (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.

$\frac{v^2}{2g}$  = energía cinética o presión dinámica.

Por tanto queda:

$$ADT = (h_s + h_d) + (h_{fs} + h_{fd}) + \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Para cada término:

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

$h_{fs}$  = considerando la tabla.

Succión = codo  $90^\circ$  + codo  $90^\circ$  + v.check

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

Descarga = v. de bola + codo  $90^{\circ}$  + codo  $90^{\circ}$

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

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

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

$$ADT = 1.25 + 6.8 + \frac{4}{2 * 9.81}$$

$$ADT = 8.2538 \text{ m}$$

Sustituyendo.

$$Q = 5 \text{ GPM} \rightarrow Q = 0.33 \text{ lt/seg}$$

$$HP = \frac{0.33 \text{ lt/seg} * 8.2538 \text{ m}}{76 * 0.6}$$

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

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 SAER, serie M; de las siguientes características:

Voltaje de línea: 220/380 [VAC].

Frecuencia: 60 [Hz].

Corriente: 4.9 – 2.8 [A].

Revoluciones: 3450 [RPM].



Potencia: 1 [HP].

Flujo: 0.6 – 3 [m<sup>3</sup>/h].



Figura 2.3 Bomba.

### 2.1.3. 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 también de 1 [HP], de acuerdo a la naturaleza de la carga y su curva torque vs velocidad.

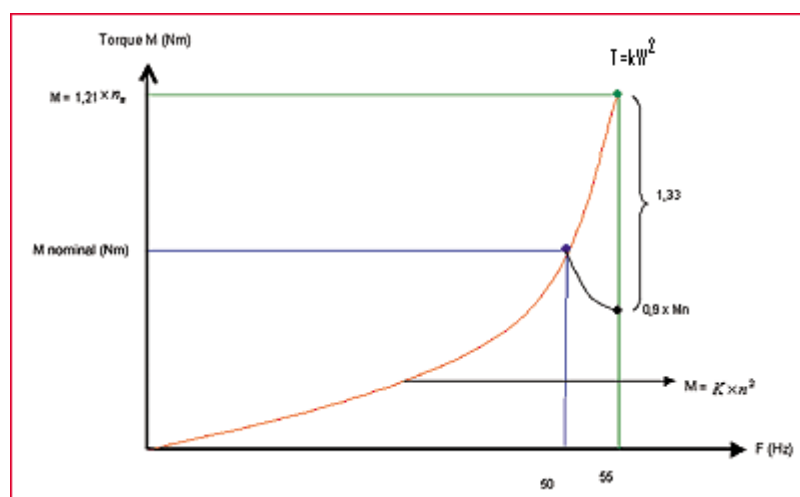


Figura 2.4 Curva torque vs velocidad de una bomba.

De acuerdo a esto se seleccionó el variador de velocidad SINAMIC G110 con una funcionalidad básica para la mayor parte de aplicaciones industriales con accionamientos de velocidad variable, es especialmente idóneo para aplicaciones con bombas y ventiladores.

Los convertidores SINAMICS G110 son convertidores de frecuencia para regular la velocidad en motores trifásicos. Los diferentes modelos que se suministran cubren un margen de potencia de 120 W a 3,0 kW en redes monofásicas.

Los convertidores están controlados por microprocesador y utilizan tecnología IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) de última generación. Esto los hace fiables y versátiles. Un método especial de modulación por ancho de impulsos con frecuencia de pulsación seleccionable permite un funcionamiento silencioso del motor.

Los valores de parámetros para el SINAMICS G110 se pueden modificar con el panel BOP (Basic Operator Panel) o bien mediante la interface USS.

SINAMICS G110 existe en dos variantes:

- 1.- Variante USS
- 2.- Variante analógica

Más información sobre el SINAMIC G110 se encuentra en el ANEXO A.

El control del variador de velocidad se realizará desde un PLC, el mismo que enviará una señal de 0 a 10 [V]. Para ésta aplicación se decidió utilizar la variante análoga del SINAMIC G100, debido a que el PLC enviará una señal de salida análoga para el control.



Figura 2.5 Variador de velocidad G110.

Puesto que no se utiliza la variante USS, el ingreso de los valores de los diferentes parámetros se ingresan con el panel BOP (Basic Operator Panel).

Este panel permite el control sobre el variador de velocidad de forma directa. Es decir, mediante sus pulsantes se puede encender la bomba, modificar rampas, variar la velocidad y demás parámetros del variador.

Además su pantalla de cristal líquido muestra los ajustes del convertidor.



Figura 2.6 Panel de operador.

#### 2.1.4. 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 2.7 Medidor de Caudal Tipo Turbina.

Datos Técnicos:

Rango de Medición:	0.6 - 10.5 GPM Agua.
Conexión:	3/4" NPT.
Precisión de medición:	± 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.

Para Mayor información ver ANEXO B.

### 2.1.5. SELECCIÓN DE CONTROLADOR

Para seleccionar el controlador se considera el número de entradas y salidas. Para el módulo didáctico de control de flujo se considera una número de 8 entradas y 8 salidas de acuerdo a:

- Entradas de sensores de nivel y encendido del módulo.
- Salidas de encendido de luminarias e indicadores.
- Salida análoga para trabajar con el variador de velocidad.
- Posibles ampliaciones.

Respecto a la comunicación, el PLC debe ser capaz de trabajar con un módulo de ingreso de la variable de consigna (modo local), así como permitir comunicarse con una PC (modo remoto).

Modo local.- Para ésta aplicación se trabajará con un módulo llamado TD200, el mismo que se conecta al PLC por medio de una interfaz RS-485.

Modo remoto.- Para ésta aplicación se utilizará un cable PC (RS-232)/PPI.

SIEMENS presenta una alta gama de PLCs, de ellos se adquirió el PLC S7200 con CPU 224 XP, el mismo que cumple con todas las característica requeridas.

Este PLC posee 14/10 entradas/salidas, 2/1 entradas/salidas analógicas con posibilidad de expansión a un máximo de 7 módulos. Para más información sobre el PLC ver ANEXO C.



Figura 2.8 Controlador Lógico Programable S7-200 CPU 224XP.

### 2.1.6. TD 200.

El SIMATIC S7, TD 200 es un display de dos líneas de texto para el PLC S7-200, con cable de conexión de 2.5m y configuración con STEP7-MICROWIN (aplicación para programar el PLC).



Figura 2.9 TD 200.

#### Datos técnicos.

Voltaje nominal.	24 [VDC].
Corriente de entrada	120 [mA].
Velocidad de transmisión (PPI); máx.	187,5 [kbit/s].
1. interfaz / Física.	RS 485.
UMW / Temperatura de operación / mín.	0 [°C].
UMW / Temperatura de operación / máx.	60 [°C].
Medio ambiente / Temperatura de almacenamiento y transporte / mín.	-40 [°C].

Medio ambiente / Temperatura de almacenamiento y transporte / máx.	70 [°C].
Clase de protección.	IP 65.
Manejo y visualización / Display / Caracteres.	20; Caracteres/línea

### 2.1.7. SELECCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS Y PROTECCIONES

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

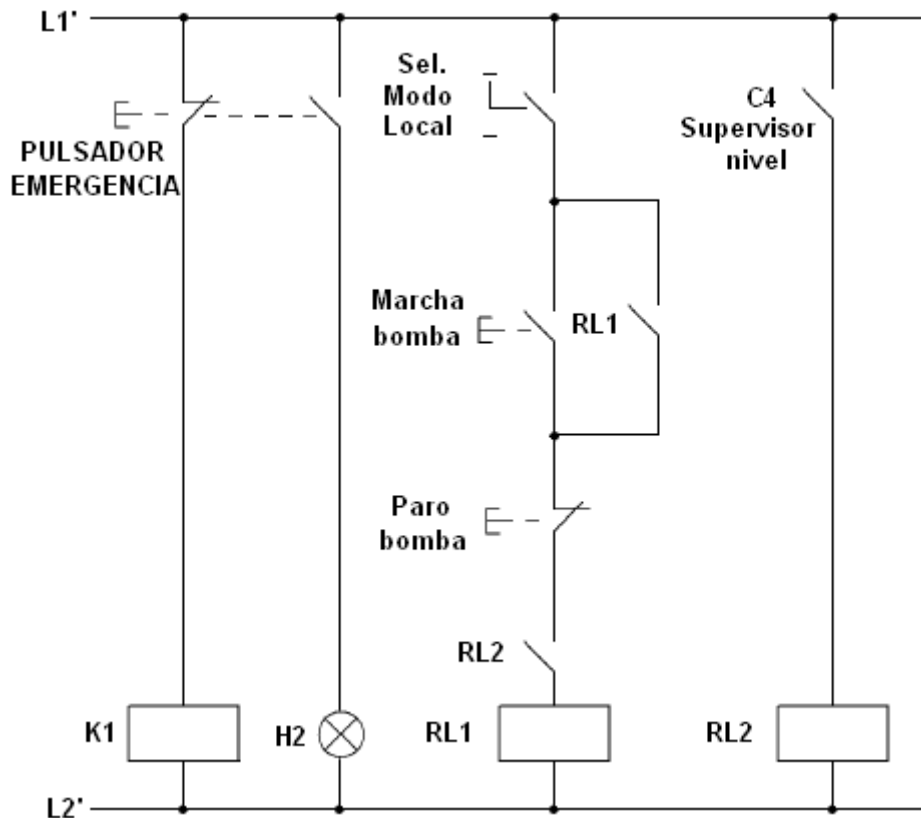


Figura 2.10 Circuito electro-mecánico del módulo de control de flujo.

De acuerdo al diseño electro-mecánico de la Figura 2.10, se tiene los siguientes elementos para encendido, apagado y visualización.

- Selector principal ON/OFF.
- Selector de modo local y remoto.

- Botón de emergencia.
- Alimentación Lateral de 220[V] polarizada.
- Pulsador ON/OFF para encendido de la Bomba.
- Indicadores Luminosos de encendido de la bomba, paro de emergencia y encendido del módulo.

#### Protecciones.

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

- Protección para el actuador:  
Ya que la bomba no trabajará a su potencia nominal, puesto que el flujo máximo de control es de 5 [GPM], se considera una corriente máxima de la bomba de 4[A]. Por tanto el breaker termomagnético será de 4 [A] y 220 [VAC].
- Protección del controlador:  
Considerando el consumo máximo del PLC, el breaker termomagnético será de 2[A] y 220 [VAC].
- Protección general:  
De acuerdo al circuito de potencia de la Figura 2.11, ésta protección general será la suma de las dos protecciones anteriores, es decir, 6[A], 220 [VAC].



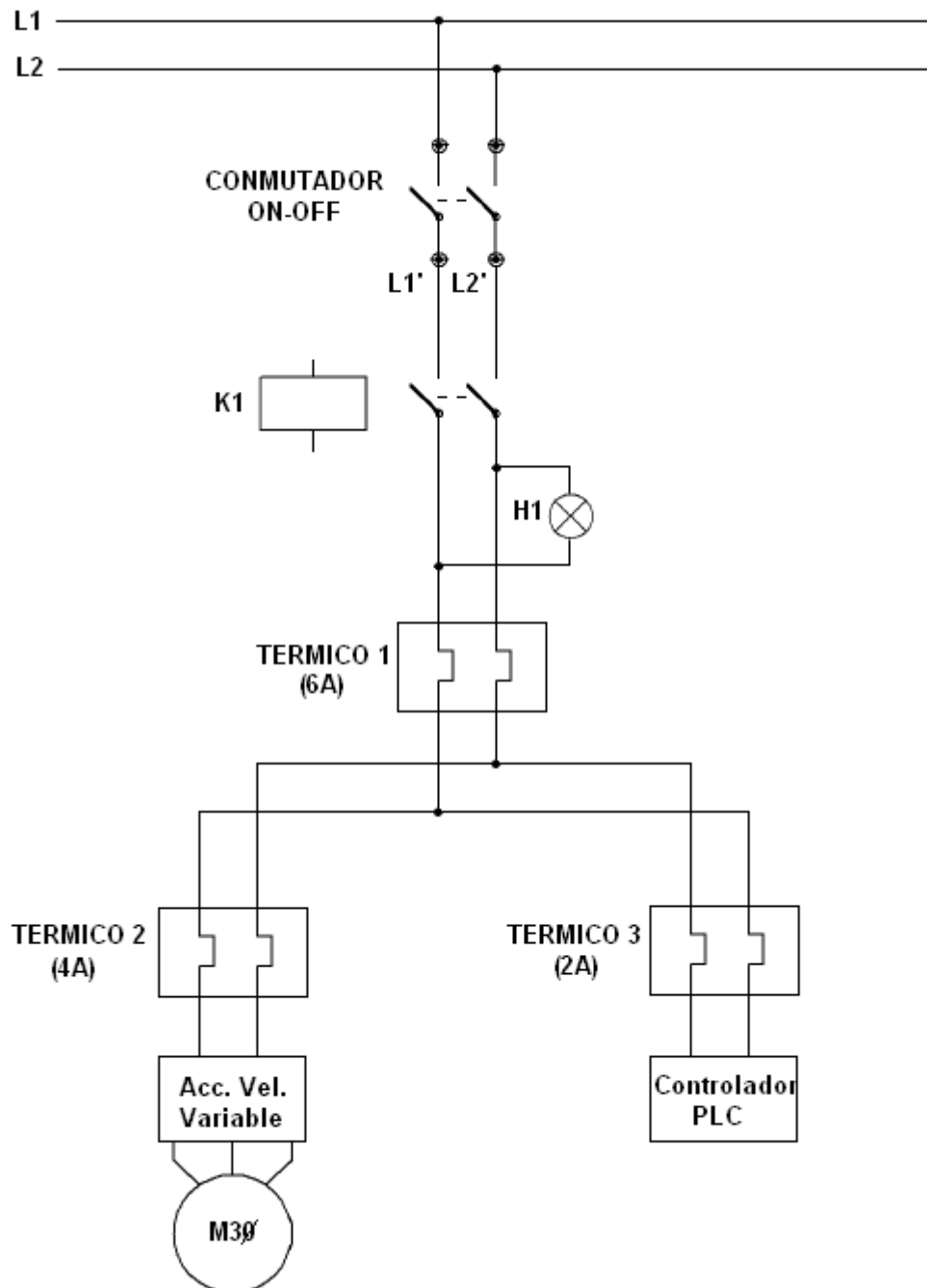


Figura 2.11 Circuito de potencia del módulo de control de flujo.

### 2.1.8. SENSORES DE NIVEL

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

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

Acondicionador de los sensores de nivel:

Se ha seleccionado el Supervisor de nivel marca SIEMENS de la gama 3UG05 02, puesto que éste tiene una salida tipo relé que fácilmente puede trabajar con el PLC seleccionado. El mismo posee un led indicador para propósitos de observación cuando el nivel de líquido esté en límites inadecuados (Ver ANEXO D para datos técnicos).



Figura 2.12 Supervisor de nivel.

## **2.2. ALIMENTACIÓN DE RED Y DESCRIPCIÓN DE FUENTES**

El panel de instrumentos trabaja con 220 [VAC]. Esta tensión alimenta al variador de velocidad y al PLC principalmente, además de la circuitería y protecciones.

Internamente el PLC provee de una fuente de 24 VDC, los mismos que alimentan los sensores de nivel y sensor de flujo.

Una vez seleccionados los elementos que formarán parte del módulo de control de flujo, se diseñara ahora el control mediante PLC en el siguiente capítulo.

**CAPÍTULO 3.**  
**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE**  
**CONTROL MEDIANTE PLC.**

## CAPITULO 3

### DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL MEDIANTE PLC

#### 3.1. SELECCIÓN DEL ALGORITMO DE CONTROL

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 mas adecuado para ésta aplicación es el control PI por las siguientes características.

La variable a controlar (flujo) 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.

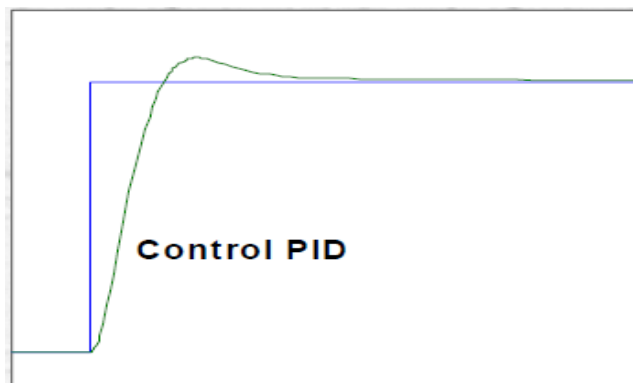


Figura 3.1 Control PID cuando se ha producido un cambio brusco en la referencia.

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.

## **3.2. DISEÑO DE LAS ACCIONES DEL CONTROL**

Hoy en día, típicamente un proceso o planta industrial suele controlarse en el campo (control local) o desde un sitio central, muchas veces alejado (control remoto).

### **3.2.1. MODO LOCAL**

Para el control en modo local se decidió que se pueda realizar las siguientes acciones:

Ingreso del valor de consigna desde el panel TD200.

Encendido y apagado de la bomba con un Pulsador ON/OFF de la Bomba ubicado en el panel de instrumentos.

Visualización de la variable del proceso.

Visualización de la alarma de control de nivel de tanque de agua.

Conmutación a modo remoto de trabajo.

### **3.2.2. MODO REMOTO**

Para el control en modo remoto se decidió que se pueda realizar las siguientes acciones:

Ingreso del valor de consigna desde la interfaz HMI.

Encendido y apagado de la bomba con un pulsante desplegado en la HMI

Visualización de la variable del proceso.

Visualización de la alarma de control de nivel del tanque de agua.

Visualización de la respuesta en el tiempo del valor de consigna vs la variable del proceso (histórico).

Visualización del voltaje y frecuencia de alimentación del motor de la bomba.

Protección del acceso a la HMI mediante ingreso de password.

Visualización de la frecuencia del sensor de flujo.

### 3.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO

La Figura 3.2 muestra el diagrama de bloques del sistema de control automático a implementarse. Consiste en un controlador (PLC), un actuador (variador de velocidad), la planta (Bomba) y un sensor (Sensor de Flujo tipo turbina).

El sensor de manera indirecta 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 el TD200 o 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 análoga del PLC 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.

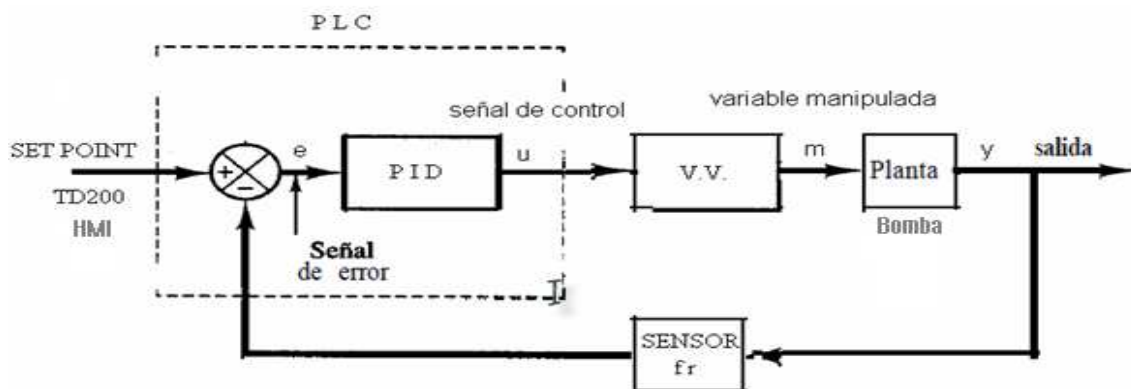


Figura 3.2 Sistema de control automático a implementarse.

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.

### 3.3.1 DISEÑO DEL CONTROL MEDIANTE PLC

Para desarrollar el control mediante PLC se procede a la realización del programa de control con el software STEP 7 MICROWIN. De los tres lenguajes (KOP, AWL y FUP) que dispone el software para la programación del PLC, se decidió utilizar el lenguaje KOP. Este es el lenguaje más apropiado para ésta aplicación por su estructura didáctica (ladder) de fácil comprensión para el programador y el usuario.

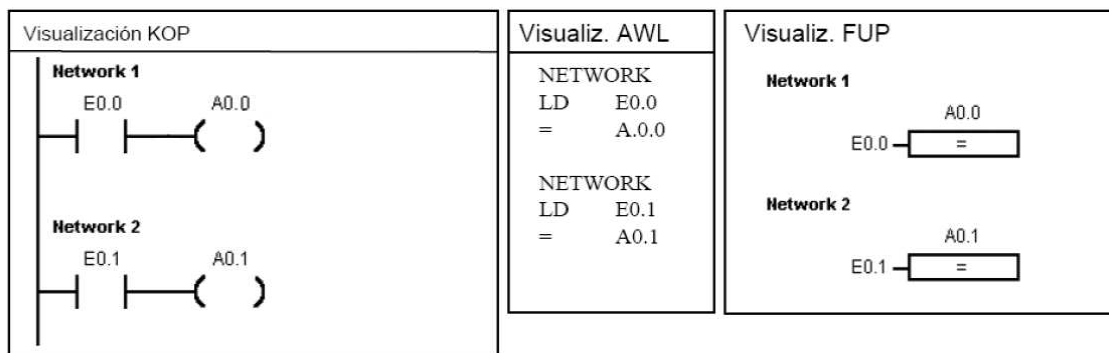


Figura 3.3 Lenguajes de programación del S7-200.

### 3.3.2 DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE CONTROL

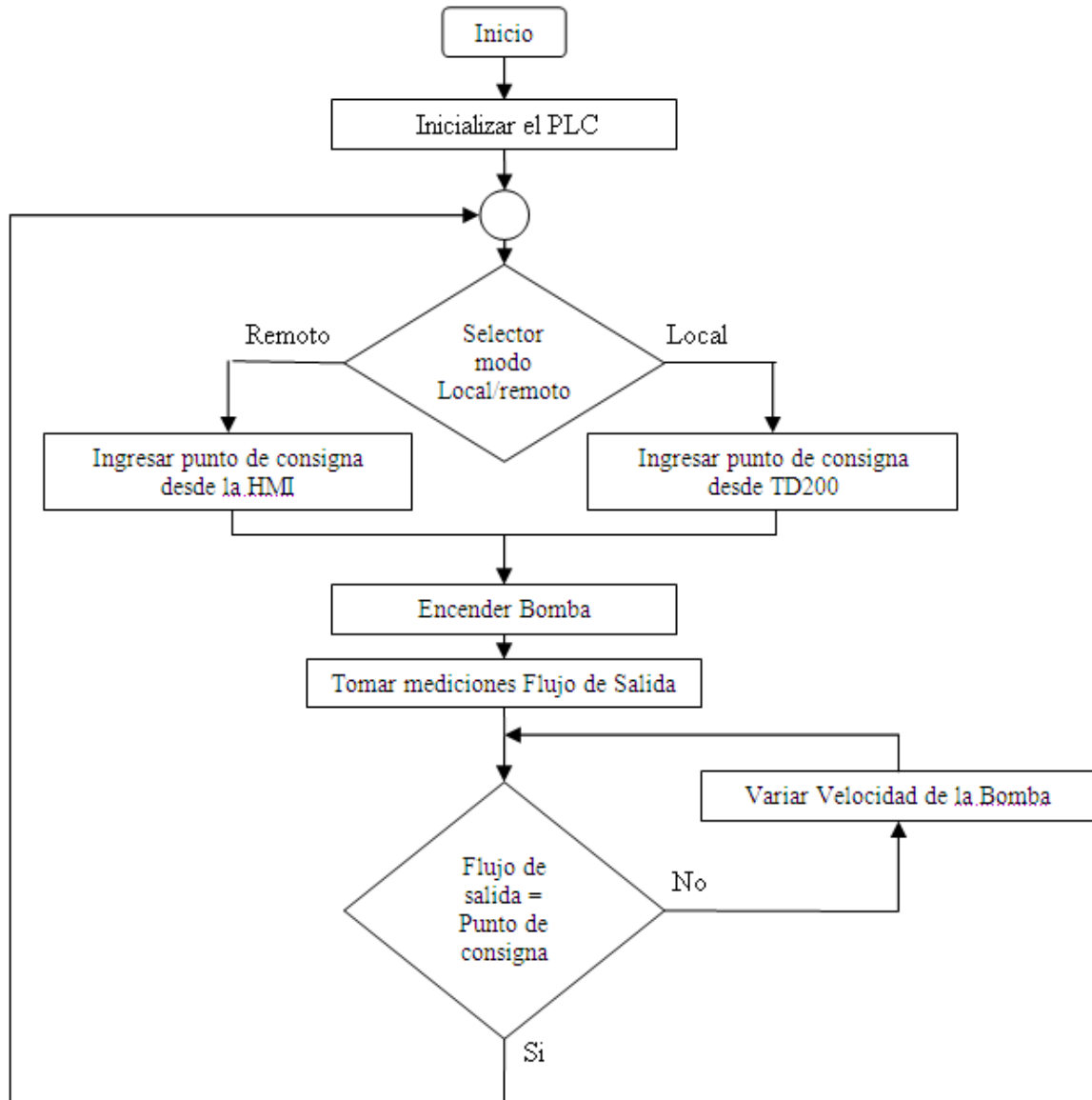


Figura 3.4 Secuencia general del algoritmo de control

De acuerdo a la estructura y funcionamiento del sistema, el algoritmo se compone de funciones y tareas que se detallan a continuación en lenguaje estructurado.

Inicializar el PLC

**Inicializar contadores rápidos, variables y PID**

**Establecer comunicación con el TD200 y la HMI**

**Velocidad de transmisión 9.6 kbps**

**Protocolo PPI**

**Interfaz RS-485**

Fin Tarea



Ingresar Valor de Consigna

**Si selector esta en modo local**

**Leer valor de consigna del TD200**

**Si selector esta en modo remoto**

**Leer valor de consigna de la HMI**

Fin Tarea

Encender Bomba

**Mientras sensores de nivel de agua del tanque están activos: Hacer**

**Si nivel de agua mayor a nivel mínimo y menor a nivel máximo**

**Energizar Bomba**

**Caso contrario**

**Desenergizar bomba**

**Mostrar alarma en TD200**

Fin Tarea

Tomar mediciones de flujo de salida.

**Leer dato de frecuencia de sensor de flujo**

**Convertir a Flujo dato de frecuencia**

**Comparar con parámetro de referencia de flujo**

Fin Tarea

Variar Velocidad de la Bomba

**Mientras no llegue al valor de referencia: Hacer**

**Si dato de flujo del sensor es menor a valor de referencia**

**Incrementar velocidad de la Bomba**

**Si dato de flujo del sensor es mayor a valor de referencia**

**Decrementar velocidad de la Bomba**

Fin Tarea

### 3.3.3 CONFIGURACIÓN DEL TD200

El ingreso del valor de consigna y la visualización de la alarma de nivel de agua del tanque se realiza a través del panel TD200. Para esto se debe configurar la comunicación con el PLC.

El PLC S7-200 tiene la capacidad de comunicarse con otros dispositivos, mediante los siguientes protocolos:

- Protocolo punto a punto (PPI).
- Protocolo multipunto (MPI).
- PROFIBUS.

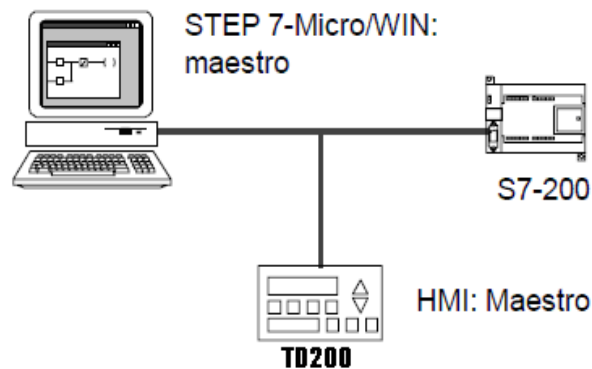


Figura 3.5 Red PPI.

El protocolo para comunicación seleccionado es punto a punto (PPI). En éste modo de comunicación se puede programar, manejar y vigilar al SIMATIC S7-200 a través de una línea bifilar común. La velocidad de transmisión de datos va de 0.3 a 187.5 kbits/s. Las más usadas son 9.6; 19.2 y 187.5 kbits/s. Para ésta aplicación se eligió la velocidad de 9.6 kbits/s.

La CPU S7-200 utiliza el cable TD/CPU para suministrar tensión al visualizador de textos TD200. La distancia entre el TD200 y el PLC no deberá ser mayor a 2.5 metros de lo contrario se deberá utilizar una fuente de alimentación externa de 24 VDC.

Cuando se tiene los elementos de la red PPI de la Figura 3.5 se procede a la configuración del TD200. Para ello se utiliza el asistente del TD200 de STEP7-MICRO/WIN. Este asistente permite configurar diferentes pantallas del TD200 entre las cuales se tiene:

- Pantalla principal o de presentación.
- Pantalla para ingreso de Valor de consigna y visualización del Valor Actual del Proceso.
- Pantalla de Alarmas en caso de producirse una.
- Pantalla de Estado que permite ver en que modo esta siendo controlada la planta.

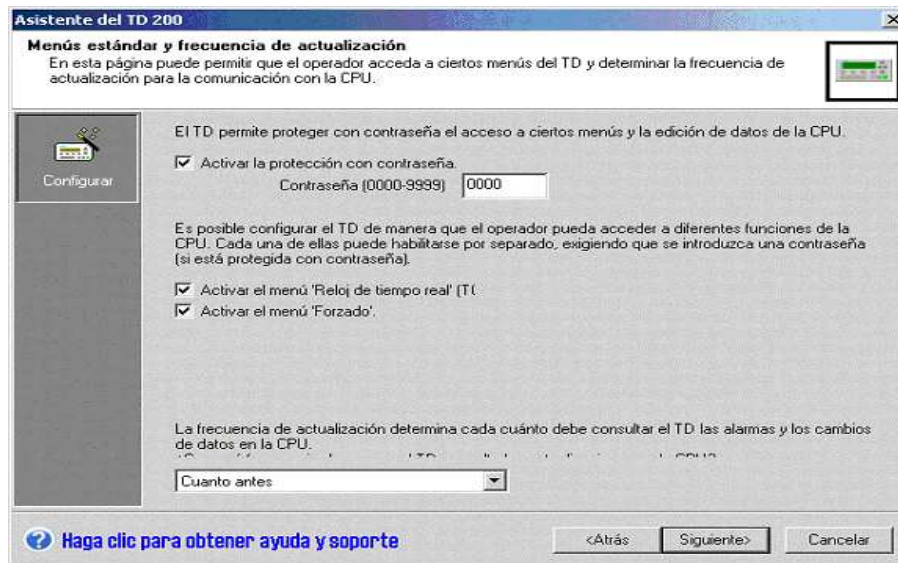


Figura 3.6 Ventana del asistente del TD200.

Luego de realizada la configuración de las pantallas del TD200 con el asistente, la CPU S7-200 almacena ésta información en un bloque de parámetros (en la memoria V). Para más información sobre la configuración del TD200 ver ANEXO E.

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

El sensor de flujo tipo turbina seleccionado para esta aplicación mide el valor de flujo a través de sus paletas rotativas y como consecuencia entrega un tren de pulsos (frecuencia) cuyo valor está directamente relacionado con el valor del flujo en un momento determinado de acuerdo a la Figura 3.7.

### Diagrama de frecuencia

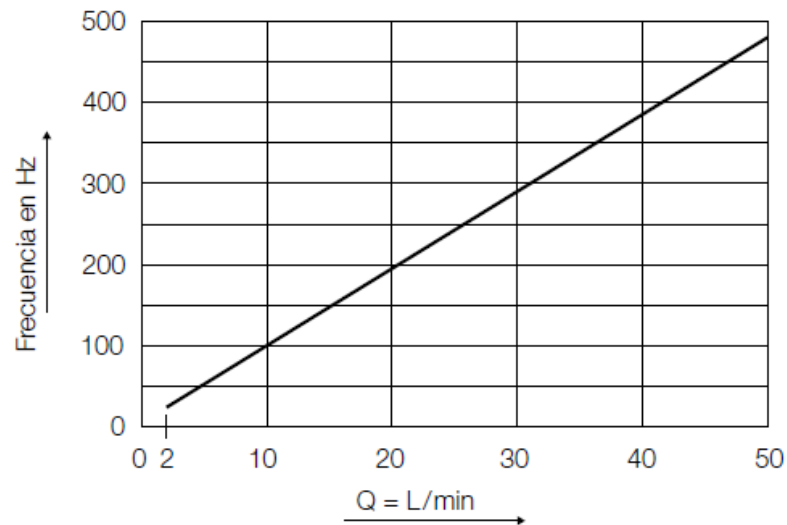


Figura 3.7 Diagrama de Frecuencia vs Flujo del sensor.

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

Tomando 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:

$$f = a * Q + b \quad (\text{Ec 3.1})$$

Reemplazando los valores de frecuencia en los puntos Q1 y Q2:

$$25 = a(0.5284) + b \quad (\text{Ec 3.1})$$

$$100 = a(2.642) + b \quad (\text{Ec 3.2})$$

Resolviendo la ecuación (Ec 3.1) y (Ec 3.2)

$$f = 35.48 * Q + 6.25 \quad (\text{Ec 3.3})$$

$$Q = \frac{f - 6.25}{35.48} \quad (\text{Ec 3.4})$$

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

### 3.3.5 VARIABLES COMPARTIDAS EN LA COMUNICACIÓN CON LA HMI

Para que exista comunicación entre el PLC y la HMI se deben compartir ciertas variables que les servirán al PLC y a la HMI para realizar diferentes acciones de manera individual. Por ejemplo, el PLC realizará el control dependiendo del valor de consigna y la HMI desplegará resultados en sus pantallas como información.

Para este intercambio de variables se dispone del software PC Access.

En el software PCAccess se creará una aplicación para almacenar las variables compartidas. Para esto se sigue los siguientes pasos:

1.- En el PCAccess ir a: Archivo/Nuevo y poner nombre a la nueva aplicación, en este caso “flow” (Ver Figura 3.8).

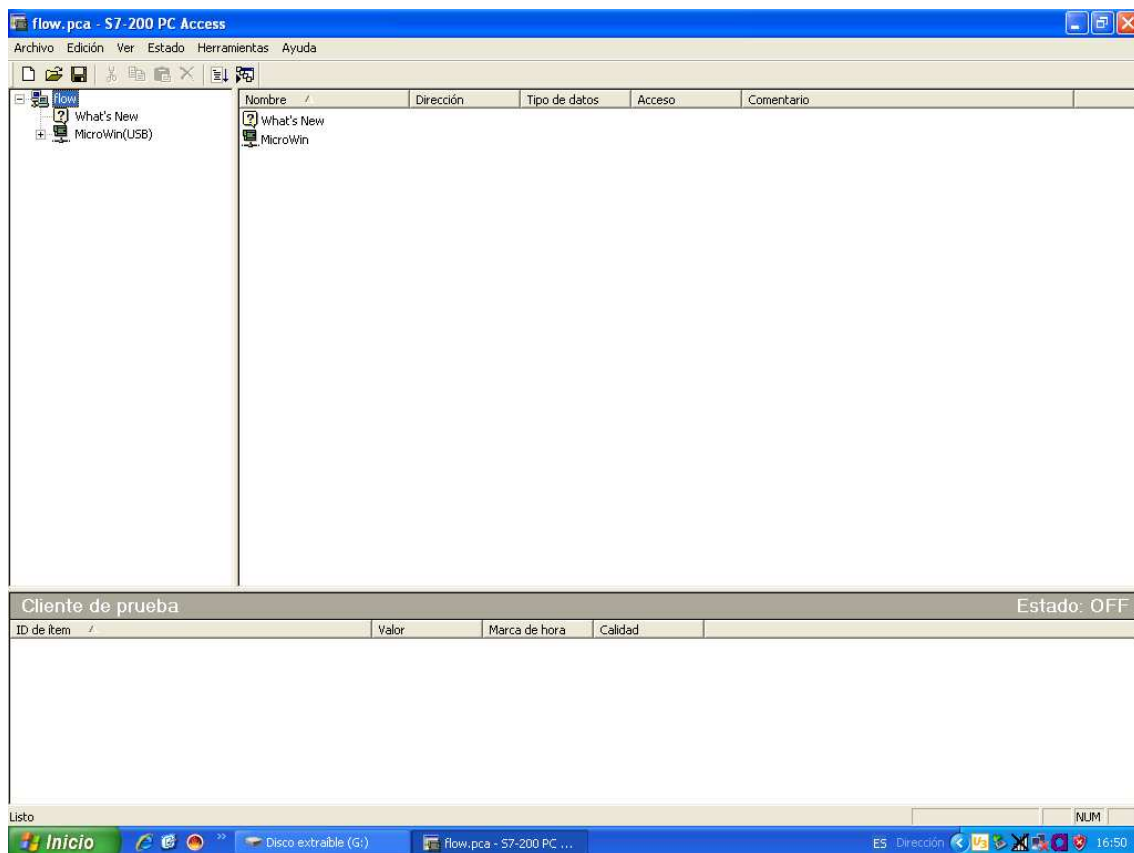


Figura 3.8 Pantalla para crear nueva aplicación.

Ya creada la aplicación, se importarán las variables a compartir que se encuentran en el programa del PLC.

2.-En el PAccess ir a: Archivo/Importar. Aparecerá una pantalla de diálogo donde se escogerá el programa realizado en MicroWin Step7 para esta aplicación (Ver Figura 3.9).

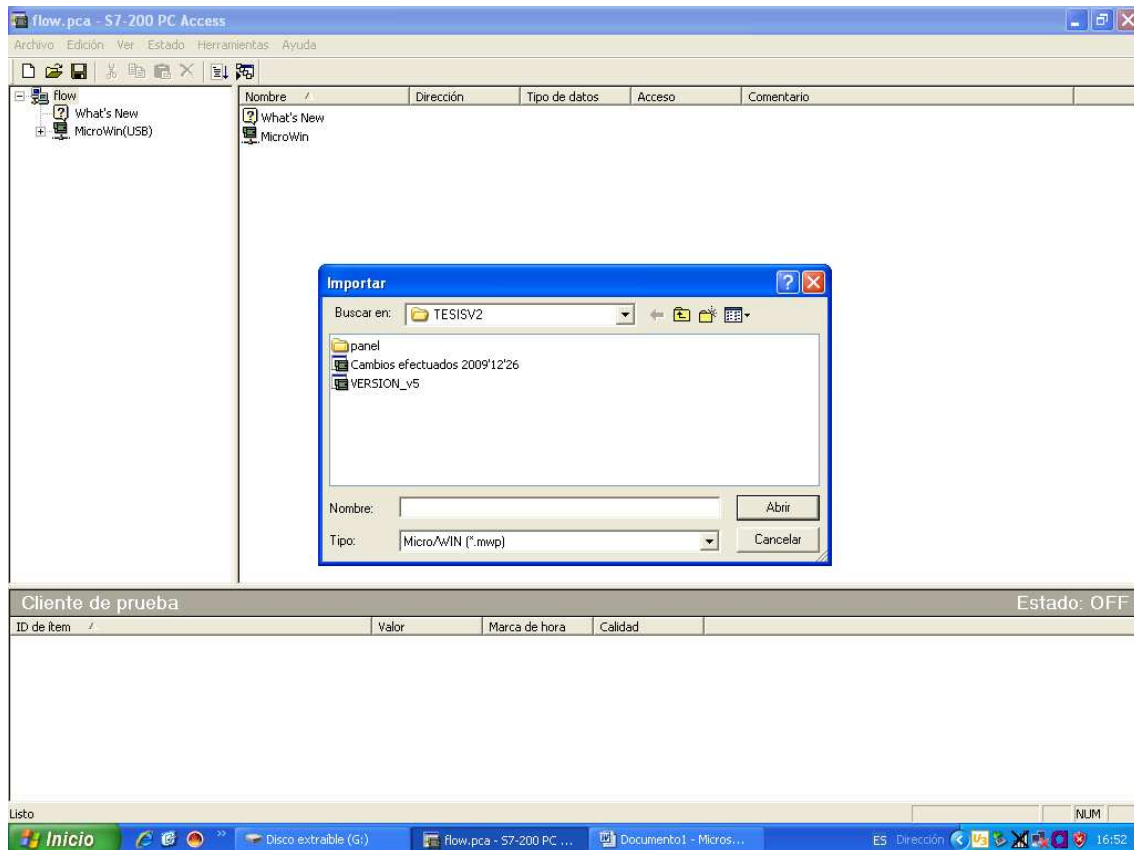


Figura 3.9 Pantalla para importar el programa de la aplicación.

3.- En la parte superior izquierda de la pantalla de la Figura 3.10 se abrirá la pestaña “VERSION\_v5” hasta llegar a la carpeta “USUARIO1”. En la parte derecha de la misma pantalla se crearán los ítems que se compartirán en la comunicación.



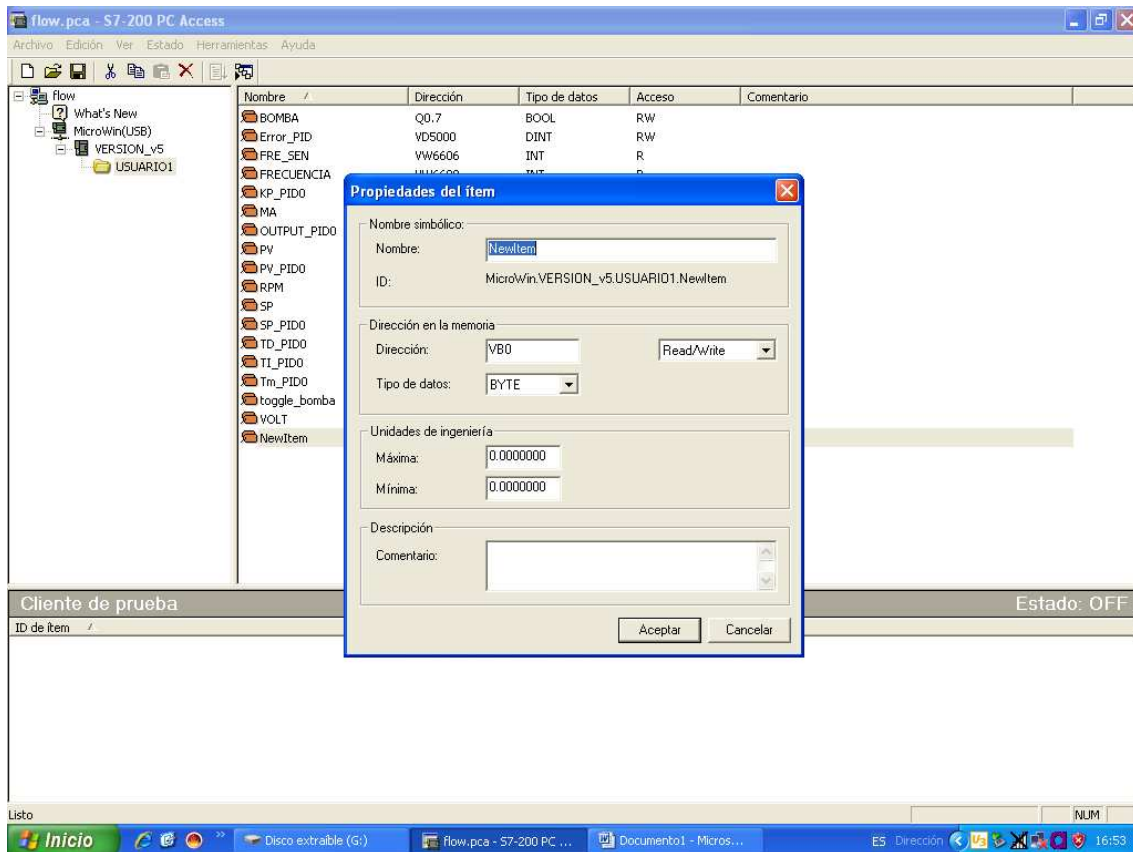


Figura 3.11 Pantalla para configurar los ítems.

### 3.3.6 PROGRAMACIÓN DEL VARIADOR DE VELOCIDAD

Para trabajar con el variador de velocidad se deben configurar sus diferentes parámetros. Los parámetros del variador de velocidad permiten configurar rampas de aceleración y deceleración así como establecer la comunicación con el PLC. Los parámetros del motor también son ingresados en el variador de velocidad. El SINAMICS G110 existe en dos variantes para la comunicación:

1. Variante analógica.- Utiliza una señal de entrada análoga.
2. Variante USS.- Utiliza comunicación USS propia de Siemens.

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

Con el panel de operaciones BOP se modifican e ingresan todos los parámetros de configuración del variador de velocidad.

- Datos del motor para la parametrización

La Figura 3.12, muestra los datos de placa de la bomba utilizada.



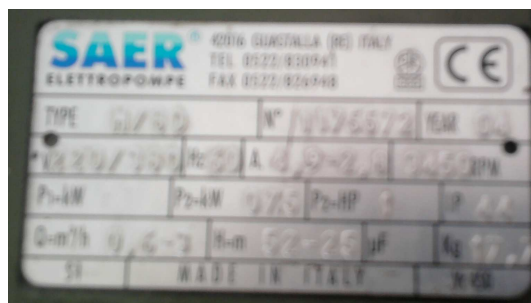


Figura 3.12 Parámetros de la bomba.

Los parámetros ingresados en el variador de velocidad están en función a los datos de placa de la bomba utilizada y a la opción de Puesta en servicio rápida, la misma que se detalla a continuación.

Puesta en servicio rápida (P0010=1).

P0005: 21 selección de indicación, el panel mostrará la frecuencia real del

Variador de Velocidad.

P0010: 1 preparado puesta en servicio rápida.

P0100: 1 frecuencia de motor, 60 [Hz]. Norte América [hp]

P0304: 220 tensión nominal del motor [V].

P0305: 4.9 corriente nominal del motor [A].

P0307: 1 potencia nominal del motor [hp]; P0100:1.

P0310: 60 frecuencia nominal de motor [Hz].

P0311: 3450 velocidad nominal del motor [RPM].

P0700: 2 selección fuente de órdenes, control por medio de variante análoga.

P0970: 0 deshabilitado reposición de valores de fábrica.

P1000: 2 selección consigna de frecuencia.

P1080: 0.00 velocidad mínima [Hz].

P1082: 60.00 velocidad máxima [Hz].

P1120: 0.50 tiempo de aceleración [s].

P1121: 0.50 tiempo de deceleración [s].

P1300: 2 modo de control, V/F con característica parabólica.

P1310: 30 en %, elevación continua, para compensación de zona muerta en el funcionamiento del motor a velocidades bajas.

P3900: 0                    fin de puesta en servicio rápido.

Una vez diseñado el control de la planta desde el PLC, se diseñara ahora la HMI en el siguiente capítulo, siendo ésta un complemento para la supervisión del buen funcionamiento de la planta.

**CAPÍTULO 4.**  
**DISEÑO DE LA HMI DEL SISTEMA.**

## **CAPITULO 4.**

### **DISEÑO DE LA HMI DEL SISTEMA**

Una interfaz Humano-Máquina o HMI (“Human Machine Interface”) es un conjunto de componentes que le permite a un operador (humano) interactuar con un proceso. Las HMI se desarrollan alrededor de paneles de operador o de computadoras. Las HMI en computadoras requieren de un software especial que posibilita el monitoreo o el control de supervisión de un proceso. Las señales del proceso son conducidas al HMI por medio de dispositivos como tarjetas de entrada/salida en la computadora, PLCs (Controladores lógicos programables), PACs (controlador de automatización programable), RTU (Unidades remotas de I/O) o DRIVERS de variadores de velocidad de motores. Todos estos dispositivos deben tener una comunicación que entienda la HMI. Ahora para que la HMI se convierta en una herramienta de control supervisorio se requiere adquirir datos, visualizar y supervisar la secuencia del proceso, generalmente desde el monitor de una computadora. En el caso presente se utilizó el In Touch 7.1 de Wonderware Corporation para desarrollar la HMI del proceso.

#### **4.1 SOFTWARE DE VISUALIZACION: INTOUCH 7.1**

InTouch de Wonderware es una de las plataformas de desarrollo de interfaz humano-maquina más importante del mundo. Proporciona una sola visión integrada de todos sus recursos de control e información.

Consta básicamente de dos elementos: WINDOWMAKER y WINDOWVIEWER. WINDOWMAKER es el sistema de desarrollo. Permite todas las funciones necesarias para crear ventanas animadas interactivas conectadas a sistemas de E/S externos o a otras aplicaciones WINDOWS. WINDOWVIEWER es el sistema runtime utilizado para rodar las aplicaciones creadas con WINDOWMAKER.

Como en la Figura 4.1 InTouch permite a los ingenieros, supervisores, administradores y operadores visualizar e interactuar con el desarrollo de toda una operación a través de representaciones graficas de sus procesos de producción.



Figura 4.1 HMI de Visualización del Proceso en InTouch

## 4.2 INSTALACIÓN DEL SOFTWARE PARA LA HMI

Para el diseño del HMI primero se debe realizar la instalación de los siguientes programas: INTOUCH 7.1, OPCLINK y OPCBROWSER, los cuales permitirán crear la HMI y establecer comunicación entre la computadora y el PLC.

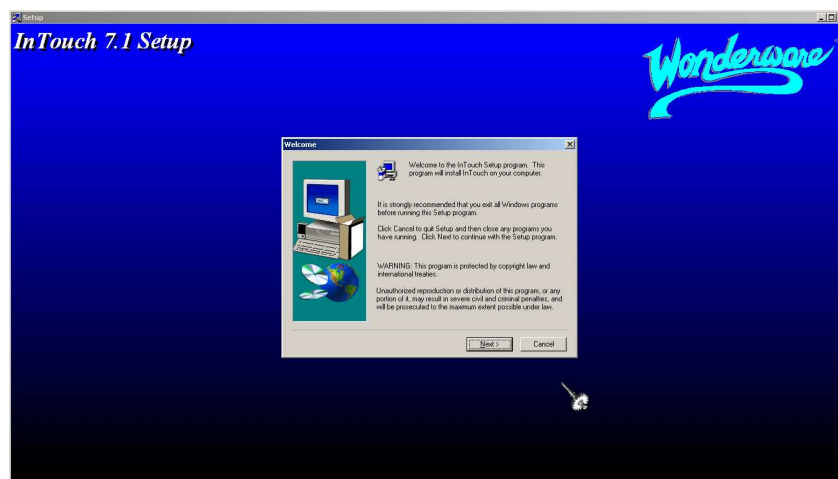


Figura 4.2 Ventana de instalación INTOUCH 7.1

### 4.2.1 OPCLINK

Para la comunicación con aplicaciones externas se dispone de un cliente OPC, denominado *OPCLink*, que puede comunicarse con servidores OPC y con *InTouch*. En este caso será el enlace entre PAccess de "Siemens" e InTouch de "Wonderware".

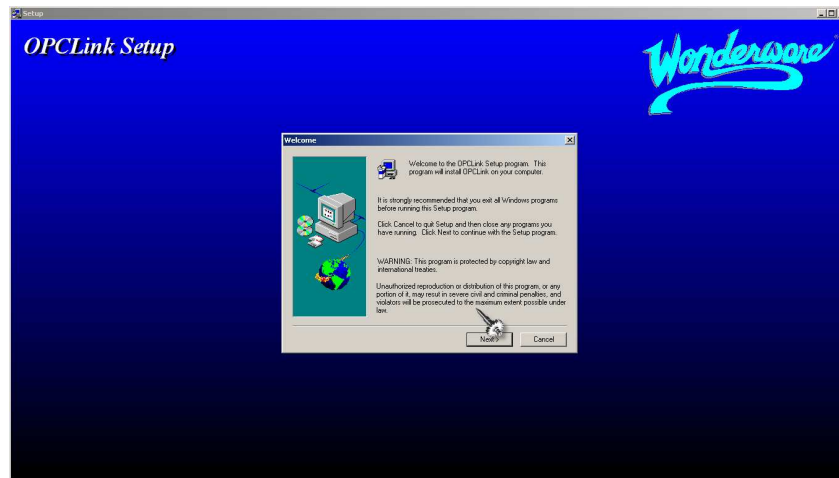


Figura 4.3 Ventana de instalación OPC Browser

#### 4.2.1.1 Configuración *OPCLink*

Mediante el “Topic Definition” se asociará el nombre del futuro “AccessName” de InTouch con el tipo de servidor OPC y el Path dónde se encuentran las variables requeridas por la aplicación.

Para abrir el software “OPCLink”, seguido de “Configure” seleccionar “Topic Definition” (Ver Figura 4.4).

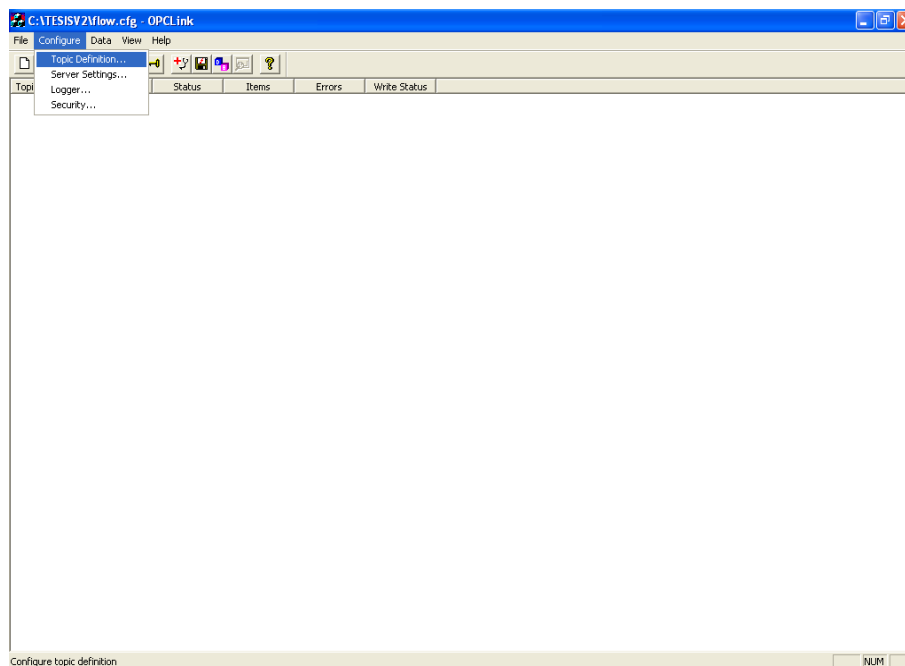


Figura 4.4 Pantalla principal de la aplicación OPCLink

Aparece una nueva ventana dónde se muestran todos los Topics ya configurados, se escogerá f1 (Ver Figura 4.5).

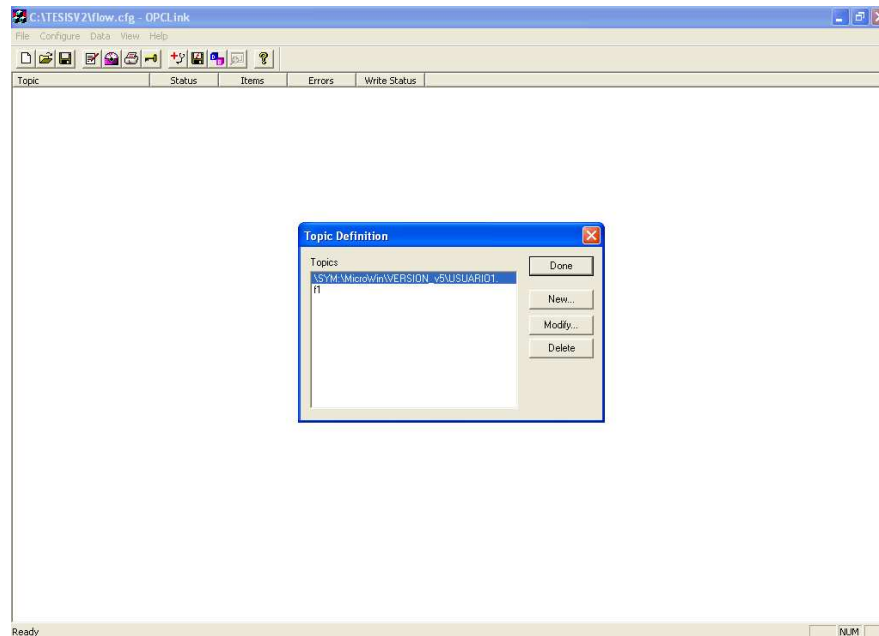


Figura 4.5 Ventana donde se muestra Topics configurados.

Si no se tiene ninguno se presiona “New” en la cual se introducirán los parámetros siguientes:

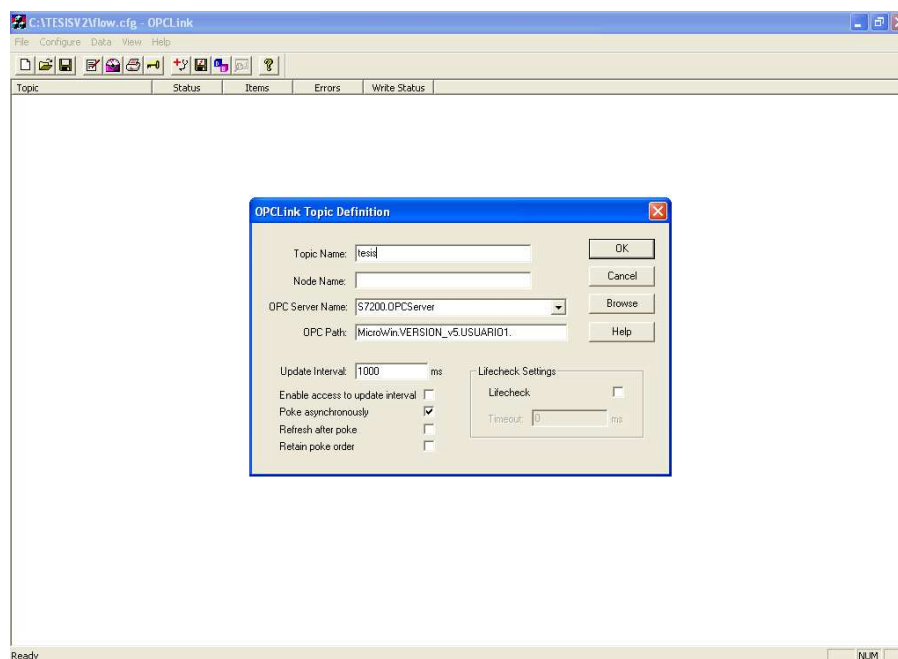


Figura 4.6: Ventana de configuración del Topic

En “Topic Name” se puede introducir un nombre cualquiera. Éste será el mismo que el futuro “Access Name” de InTouch.

En “Node Name” no se introduce nada.

En “OPC Server Name” la aplicación detecta los OPC servers existentes en la máquina y, mediante la barra desplegable, se selecciona S7200 OPCServer.

En OPC Path: Mediante el botón browse se selecciona, de una manera idéntica al OPC Scout, el path dónde están las variables (Ver Figura 4.7).

Las siguientes opciones de configuración normalmente se dejan por defecto.

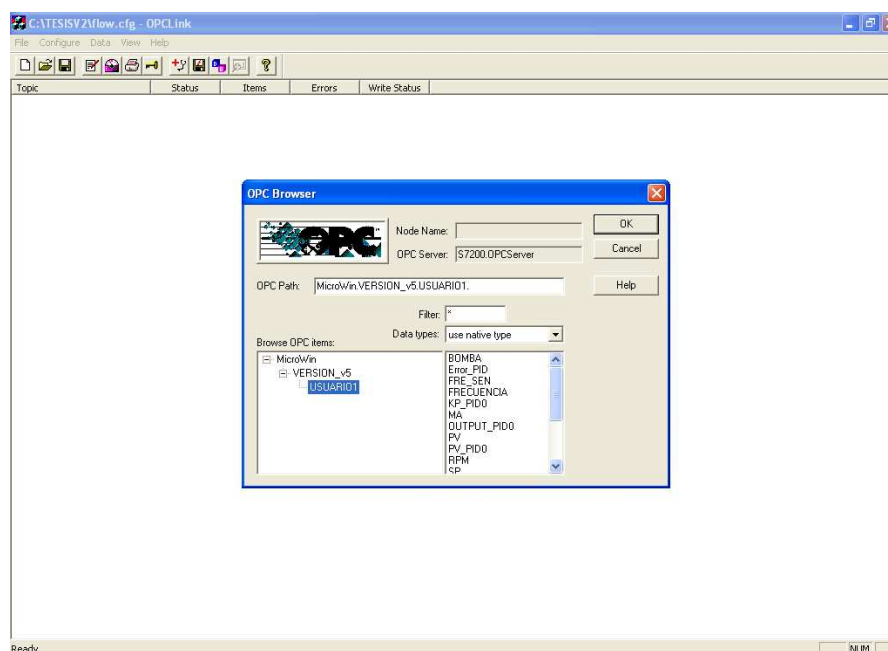


Figura 4.7 Ventana para selección de OPCPath

#### 4.2.2 OPC BROWSER

OPC es el acrónimo de OLE for Process Control en Inglés. Este software permite el intercambio de información basado en objetos.

El OPC Browser permite seleccionar dispositivos y objetos para configurar fácilmente una aplicación para lectura y escritura de datos. El estándar OPC permite el intercambio de información en tiempo real entre clientes de una PC que operan con sistemas operativos de Microsoft.

Esto significa que con un solo driver se puede enlazar todos los componentes que forman parte de la HMI/SCADA, en lugar de necesitar un driver o controlador para cada uno de ellos.



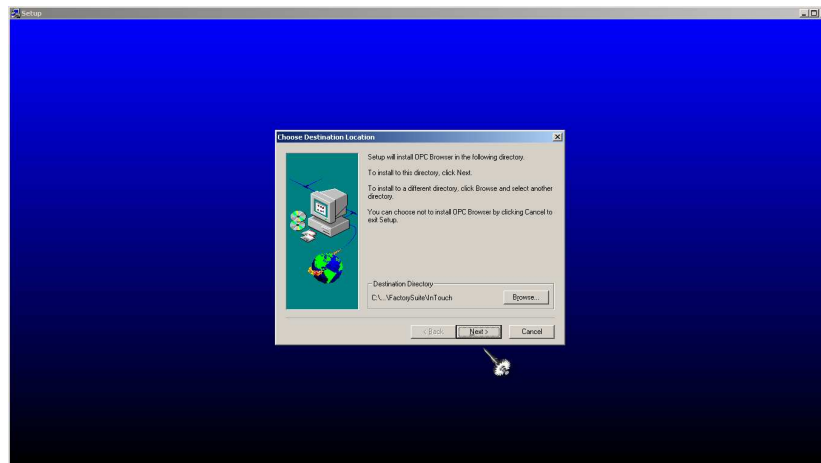


Figura 4.8 Ventana de instalación OPC Browser

#### 4.2.2.1 Configuración OPCBrowser

Los pasos a seguir para configurar el OPCBrowser son:

Abrir el software InTouch, buscar en la parte izquierda de la pantalla “OPC” seleccionar “Browse OPC”(Ver Figura 4.9)

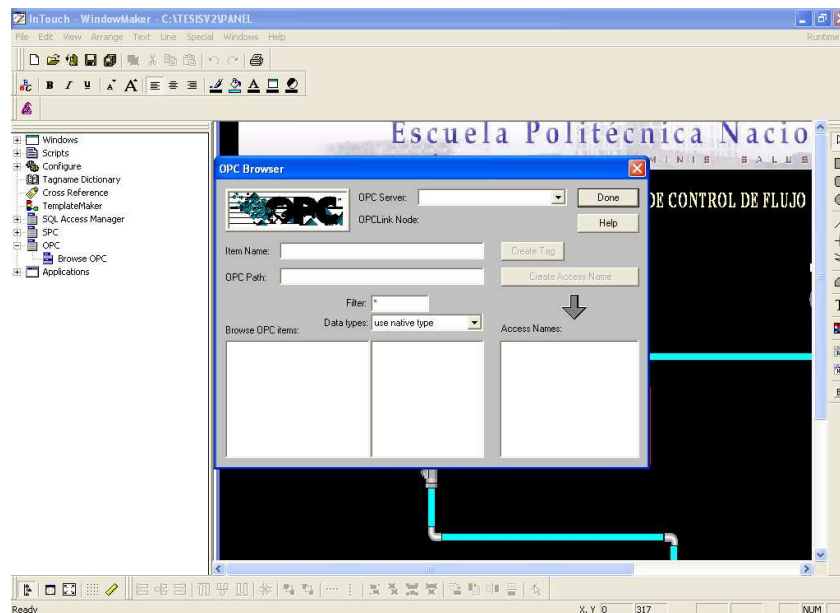


Figura 4.9 Ventana Principal de OPCBrowser

En “OPC Server” mediante la barra desplegable seleccionar “S7200 OPCServer”. Aparecerá una ventana donde se escogerá la aplicación configurada en el OPCLink para este caso “flow”(Ver Figura4.10).

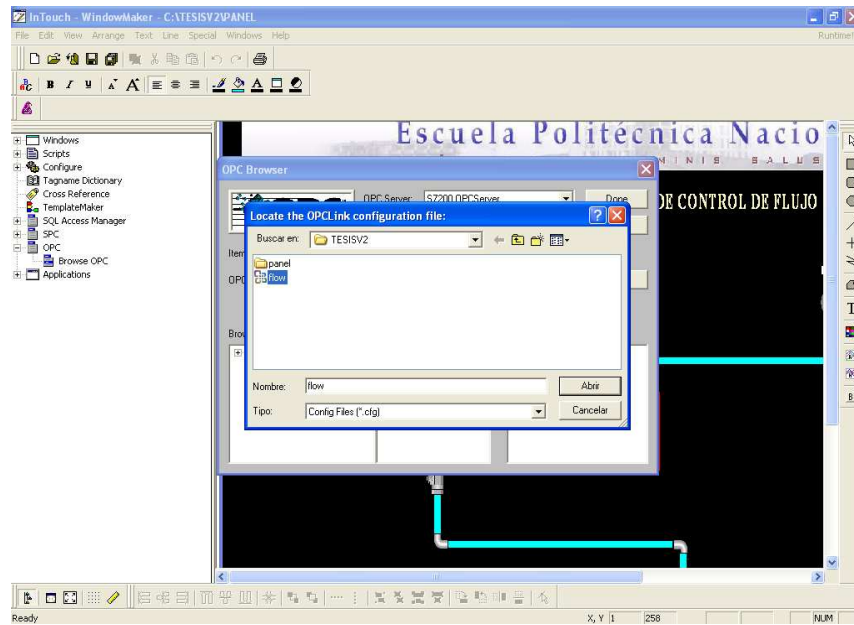


Figura 4.10 Ventana de Selección del OPC Server

Luego de seleccionar el “OPC Server”, navegar en “Browse OPC ítems”, ubicada en la parte inferior izquierda de la pantalla, hasta llegar a “USUARIO1” y aparecerá los ítem creados en el “PCAccess” (Ver Figura4.11).

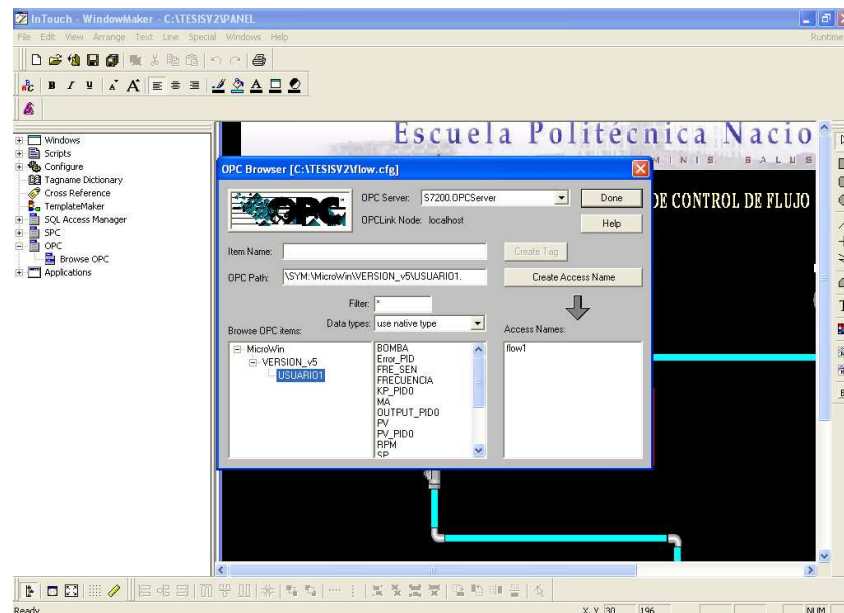


Figura 4.11 Items creados en el PAccess

Seleccionar cualquier ítem para crear un “Access Name”, se desplegará una ventana de configuración (Ver Figura 4.12).

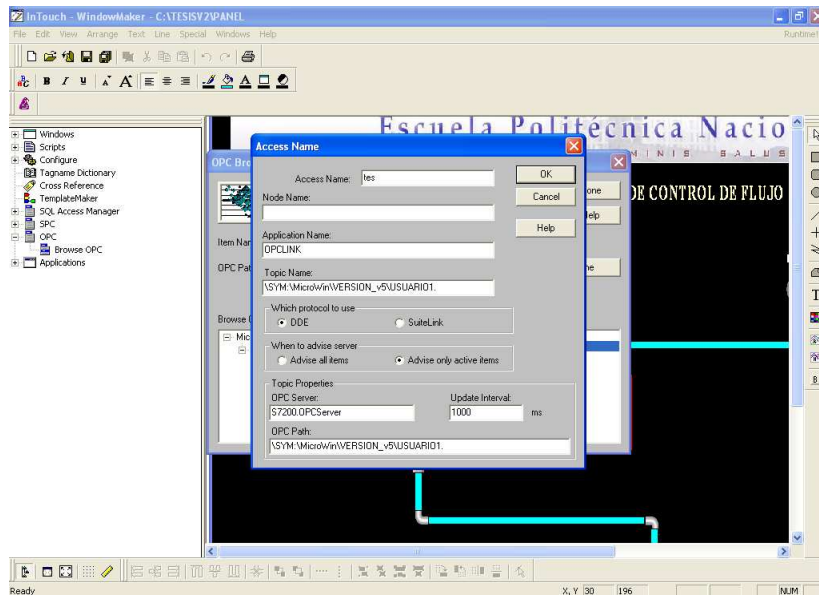


Figura 4.12 Ventana de Configuración de Items

En “Access Name” se escribe un nombre cualquiera que será donde estén ubicados los ítems.

En “Node Name” no se introduce nada.

En “Which protocol to use” se debe seleccionar DDE.

Las siguientes opciones de configuración normalmente se dejan por defecto.

Configurado el “Access Name”, se debe presionar el botón “Create Tag” y se desplegará una ventana donde se creará los “tagname” a ser usados (Ver Figura 4.13).

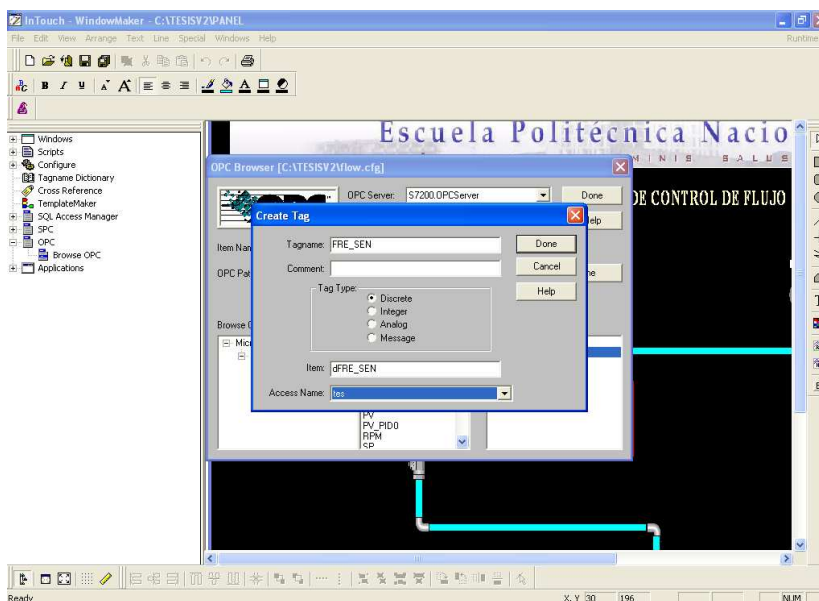


Figura 4.13 Ventana para creación de Tagname

### 4.3 DISEÑO DE LA HMI

El diseño de la HMI está hecho de tal manera que sea fácil de entender por los estudiantes para que cumpla con el objetivo de ser didáctico.

- Para facilitar las operaciones del operador desde la HMI, se creó un sistema de pantallas donde se tiene de manera clara y sencilla representada la planta y el funcionamiento de la misma, tanto cuando se esté trabajando de manera local o de manera remota. El operador siempre tiene a la vista el estado actual de la planta, cumpliendo así con el objetivo principal de la HMI.
- Ventana Menú de Inicio.-  
En esta ventana “Menú de Inicio” se tiene dos opciones: la primera es ingresar a la ventana de proceso y la segunda es ingresar a la ventana de históricos del proceso tal como se muestra en la Figura 4.14.



Figura 4.14 Ventana Inicio del proceso.

- Ventana de Password.  
Una de las pantallas implementadas en esta HMI es la pantalla de seguridad, la cual permite ingresar solo a personas autorizadas, mediante contraseña, a la pantalla principal de proceso.

Esta ventana se despliega luego de haber escogido en la ventana “menú de inicio” la opción PROCESO. Esta ventana ha sido creada con el objetivo de tener mayor seguridad ya que a la ventana principal debería ingresar solamente personal autorizado para realizar incluso cambios que sean necesarios en la operación remota (Ver Figura4.15).



Figura 4.15 Ventana de Password para el acceso a la Ventana Principal.

➤ Ventana Principal de Proceso.-

A esta ventana se accede presionando el botón PROCESO y luego ingresando la clave en la ventana de PASSWORD. En la ventana principal se observa de manera grafica e interactiva el proceso. La ventana consta de las siguientes partes.

- Dos indicadores luminosos debidamente identificados los cuales informarán si el proceso esta siendo controlado de forma local o remota.
- Una representación de la bomba que se está utilizando con un icono de encendido y apagado que solamente funcionara si el proceso está siendo controlado de manera remota. Esto quiere decir que si el control es local no se encenderá ni apagará la bomba desde este icono. Se cuenta también con un cuadro de visualización de parámetros de la bomba; esto es, el voltaje, la frecuencia y las

revoluciones por minuto a la cual se encuentra sometida la bomba a un determinado valor de consigna.

- Una representación del sensor tipo turbina que se está utilizando para medir el flujo que está circulando por la planta. Cuenta con un cuadro de visualización de la frecuencia entregada por el sensor que será proporcional al flujo que esté circulando en ese momento.
- Dos indicadores visuales del valor real del proceso (flujo de salida), uno análogo y el otro digital, los cuales servirán para chequear que el proceso funcione de manera eficiente.
- Un cuadro de dialogo donde el operador deberá ingresar el valor de consigna del flujo deseado en GPM.
- También contiene un tanque de almacenamiento de agua, tubería, válvulas, una de las cuales permitirá provocar perturbaciones externas desde el mismo modulo para comprobar así el funcionamiento del control.
- El icono que se encuentra en la parte inferior izquierda es el enlace entre la pantalla que se encuentre desplegada en ese momento, y la pantalla menú de inicio.
- 



Figura 4.16 Ventana Principal de Proceso

➤ Ventana de Históricos.-

A esta ventana se accede al presionar el botón HISTORICOS de la ventana de Menú sin necesidad de password, pues esta es solamente una ventana de visualización. La ventana ha sido creada con el propósito de visualizar las dos variables más importantes que son el valor de consigna o variable de control y el valor actual o lectura del sensor. También se puede observar el comportamiento del sistema al momento de suscitarse un cambio en el valor de consigna, por ejemplo para observar como reacciona el control PID implementado (Ver Figura 4.17).



Figura 4.17 Ventana de Históricos.

- En el caso de presentarse fallas tanto con el PLC como con la HMI se tiene la opción de trabajar de forma local independientemente, de estos dos elementos solamente usando el variador de frecuencia.

#### 4.3.1 PROGRAMACIÓN DE LAS PANTALLAS DE LA HMI

Se iniciará creando la pantalla de proceso, para ello se ingresa desde File/New Window... o el icono situado en el extremo izquierdo de la barra de herramientas de WindowMaker.

Aparecerá la ventana de propiedades (Window Properties) y se completará los campos necesarios de la ventana de dialogo (Ver Figura 4.18).

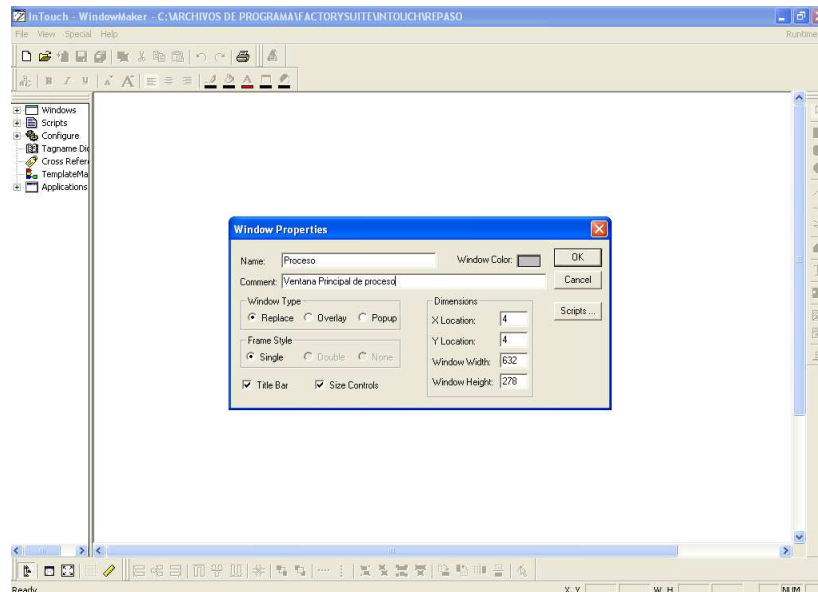


Figura 4.18 Ventana de propiedades (Window Properties)

Una vez creada la pantalla de Proceso, aparecerá en el área de trabajo de WindowMaker, donde se agregará todos los gráficos y textos que dará como resultado una pantalla amigable al operador (Humano), para que este se familiarice con el proceso como la que se muestra en la Figura. 4.19.

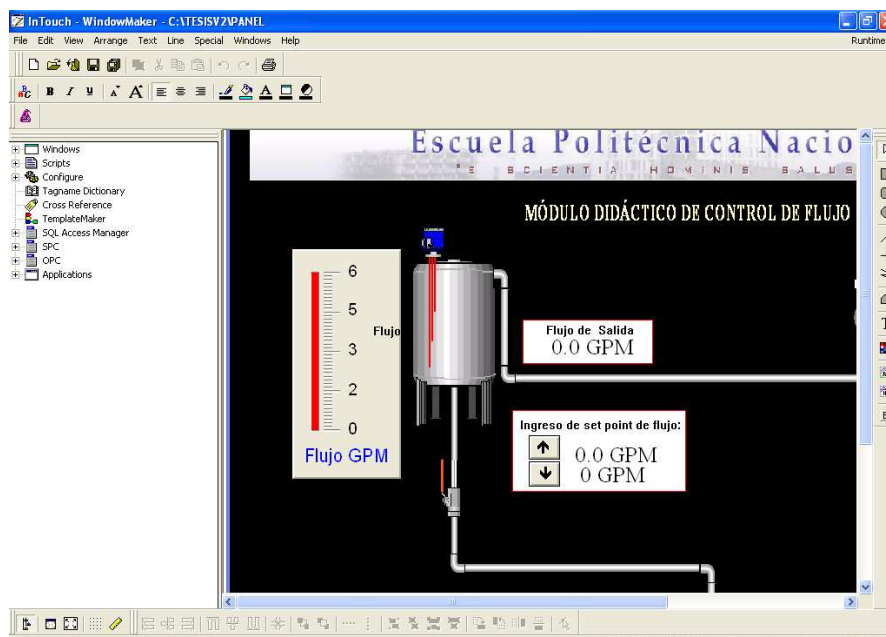


Figura 4.19 Área de trabajo de WindowMaker



De similar manera se creará las pantallas (Carátula, históricos, password) que formaran parte la HMI.

#### 4.3.1.1 Definición de los Tagnames

El diccionario de tagnames es el corazón de InTouch. Durante el runtime, este diccionario contiene todos los valores de los elementos en la base de datos.

A este diccionario se accede desde el menú /Special/TagName Dictionary.

Desde el diccionario de tagnames se define los tagnames a utilizarse y sus características.

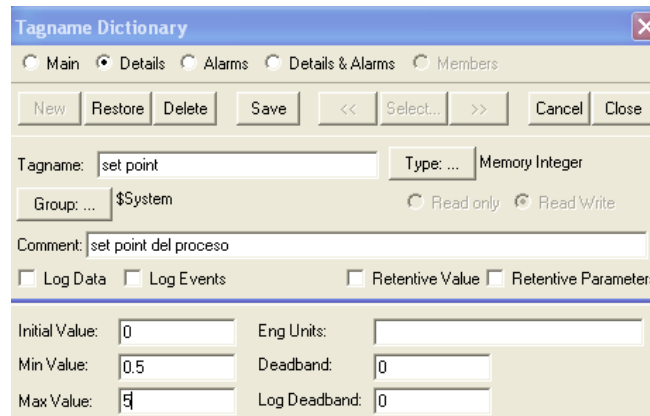


Figura 4.20 Pantalla de definición de tagnames

En la Figura 4.20 se muestra la configuración del tagname “set point “. Luego de configurado se debe guardar para ello se presiona el botón “Save”.

#### 4.3.1.2 Scripts de la HMI

La lógica (SCRIPT) de InTouch es un programa que permitirá llevar a cabo acciones determinadas mediante una estructura IF...THEN...ELSE (Ver Figura 4.21).

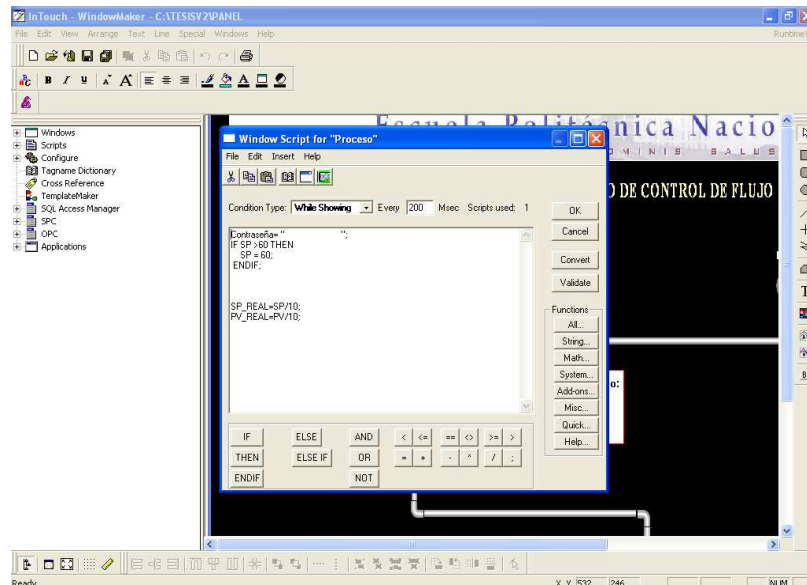


Figura. 4.21 Pantalla de programación de Window Script

La Figura 4.21, muestra la restricción para ingresar con la contraseña a la pantalla principal del proceso y también los algoritmos matemáticos que utiliza el programa para realizar cálculos internos.

#### 4.3.1.3 Curvas Históricas y Reales

InTouch permite displayear curvas y tendencias en pantalla tanto en tiempo real como de valores históricos (Ver figura 4.22).



Figura 4.22 Pantalla de Historicos.

Dentro de una curva en tiempo real se definirá una serie de parámetros, tales como tiempo de actualización de la curva, tamaño de la muestra, colores de las líneas, color del fondo y otros como se muestra en la ventana de la Figura 4.23.

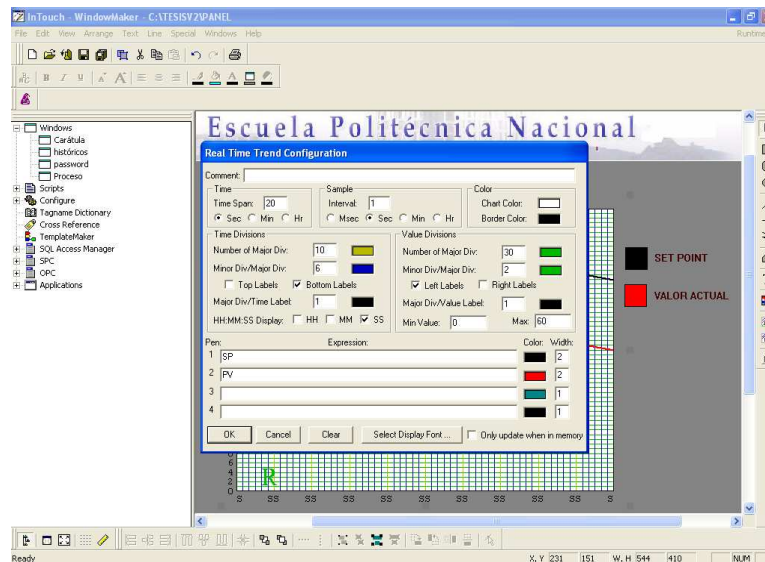


Figura 4.23 Ventana para configuración de Históricos.

### 4.3.2 COMUNICACIONES I/O

#### La Comunicación DDE

DDE es un protocolo de comunicaciones desarrollado por Microsoft para intercambio de datos entre aplicaciones Windows. DDE es un sistema estándar en WINDOWS con el que la comunicación se establece automáticamente entre programas que soportan la estructura DDE (clienteservidor).

Un programa que puede mandar datos al bus DDE es un programa servidor. Un programa cliente puede recibir los datos DDE.

Este es el caso de los servidores de autómatas que dispone WONDERWARE, entre los que se incluyen prácticamente la totalidad de los PLCs más conocidos del mundo con comunicación tanto punto a punto como en red

La comunicación DDE se basa en el empleo de tres parámetros:

- Aplicación
- Tópico
- Elemento

#### 4.3.2.1 InTouch Access Name

Para poder enlazar datos vía DDE de otras aplicaciones Windows a InTouch se debe crear un Access Name. A cada Access Name se asocia una Aplicación y un Tópico.

Para crear un Access Name como el que se muestra a continuación se debe acceder al menú de Access name a través de SPECIAL → ACCESS NAMES

Figura 4.24. Pantalla de creación de Access Name

En “Access Name (Nombre de enlace)” se escribe un nombre que describa lo que se está haciendo.

En “Node Name (Nombre del Nodo)” hay que rellenarlo si se va a leer datos de otro PC.

En “Application Name (Nombre de la aplicación)” se pone el nombre de la que se quiere leer (Excel, Siemens, etc.).

En “Topic Name (Nombre del tópico)” nombre de la variable que se quiere leer.

En “Which protocol To Use” se debe seleccionar DDE.

En “SuiteLink” sólo es para aplicaciones FS2000.

En “When to Advise Server” normalmente dejar por defecto.

#### 4.3.2.2 Establecimiento del tipo de Comunicación

El objetivo de establecer una comunicación es tener el control del proceso desde una estación remota (computadora). Para esto se requiere comunicar al PLC con la computadora para lo cual se deben seguir los siguientes pasos.

1. Abrir el software STEP 7 MicroWin que es donde se desarrolló el programa para el PLC (Ver Figura 4.25).

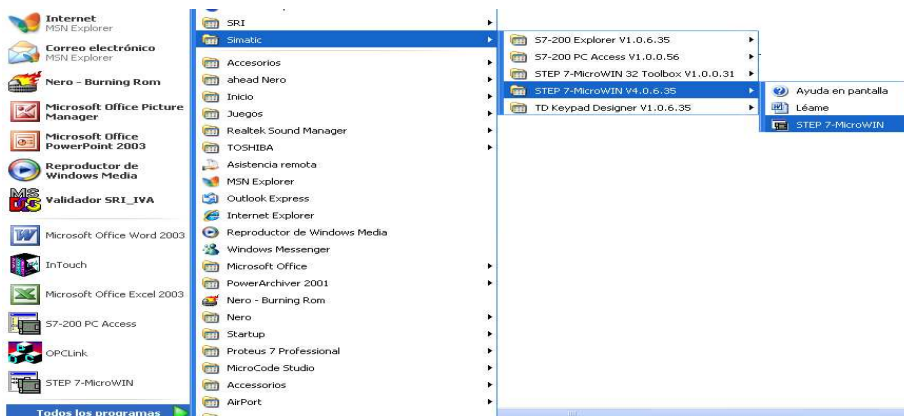


Figura 4.25 Inicio Step 7 MicroWin

2. Luego de tener ya abierto el programa de control en STEP 7 MicroWin se procede a configurar el tipo de comunicación que se desea. En este caso no se utilizará la comunicación tradicional RS232 Serial, sino comunicación USB que es una comunicación más actual y más rápida. Para esto, en el software STEP 7 MicroWin se va a la opción de comunicación (Ver Figura 4.26).

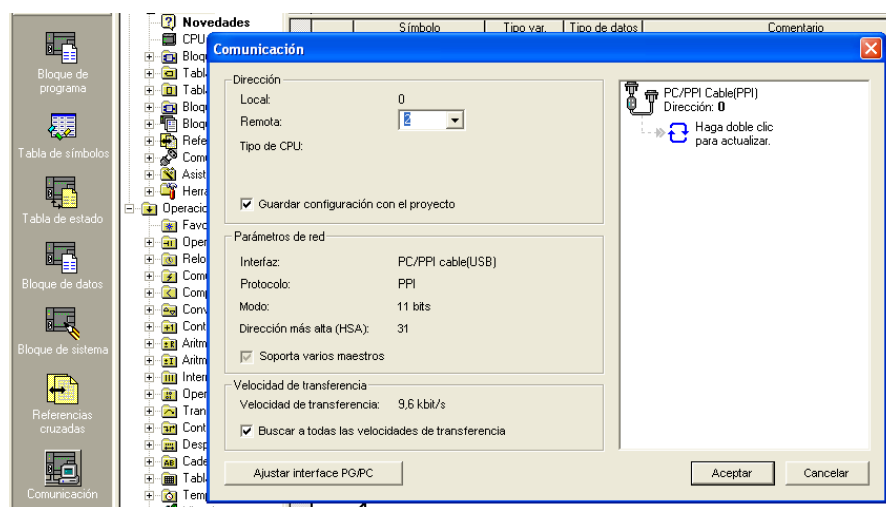


Figura 4.26 Ventana De Configuración De Comunicación

3. Después de hacer doble clic en la parte superior derecha de la pantalla para acceder al cuadro de configuración se procede a configurar la interfaz (cable de comunicación) en este caso se usará un cable PC/PPI (Ver Figura.4.27).

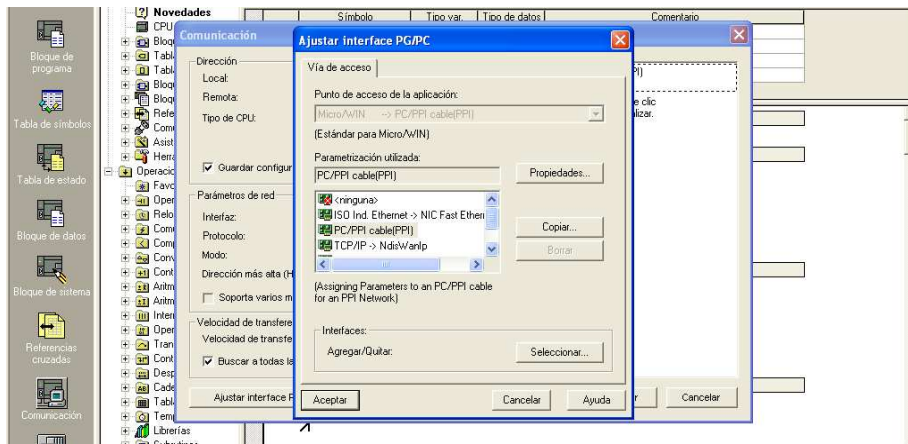


Figura 4.27 Ventana Para Ajustar Interface De Comunicación

4. Después de haber seleccionado la interface a utilizarse, se debe pulsar en “propiedades” para escoger el tipo de conexión con la cual se va a trabajar. Para esta aplicación, como ya se mencionó, será USB y la velocidad de transferencia será de 9600 bits por segundo, tal como se muestran en las Figuras 4.28 y 4.29.

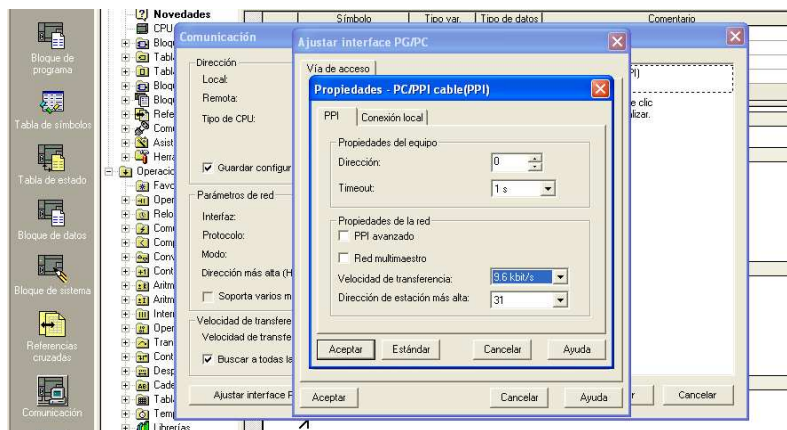


Figura 4.28 Ventana de configuración de velocidad de transferencia

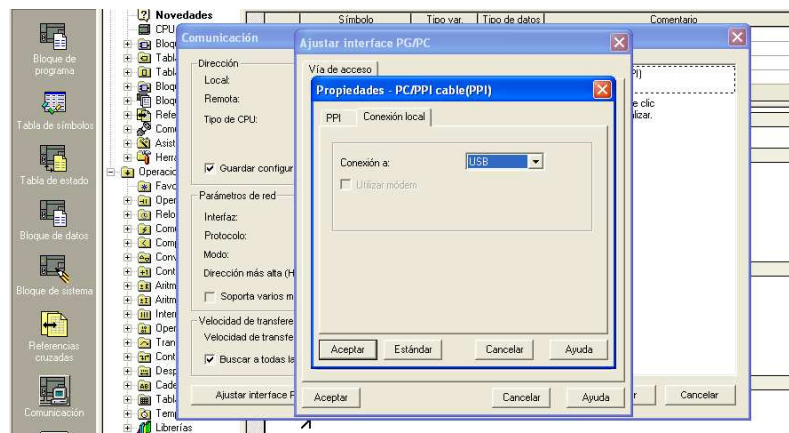


Figura. 4.29 Ventana de selección para conexión USB

5. Una vez establecida el tipo de comunicación que se utilizará se puede iniciar ya la comunicación entre el PLC e INTOUCH.

#### 4.3.2.3 Comunicación entre el PLC e Intouch

Para establecer esta comunicación previamente se debe tener instalados los OPC SERVER para los cuales se seguirá los siguientes pasos para establecer la comunicación.

1. Abrir el software OPC LINK que será el que permita la comunicación ya previamente configurada (Ver Figura 4.30).

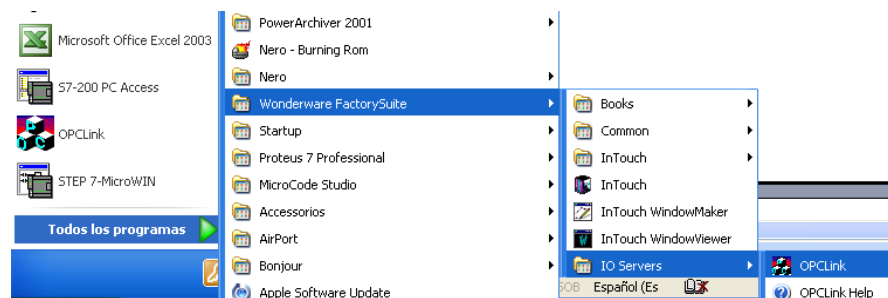


Figura 4.30 Inicialización de OPCLINK

Luego de haber inicializado el OPCLINK se debe abrir el software INTOUCH, en donde se debe abrir la aplicación del proceso tal como se muestran en las Figuras 4.31 y 4.32.

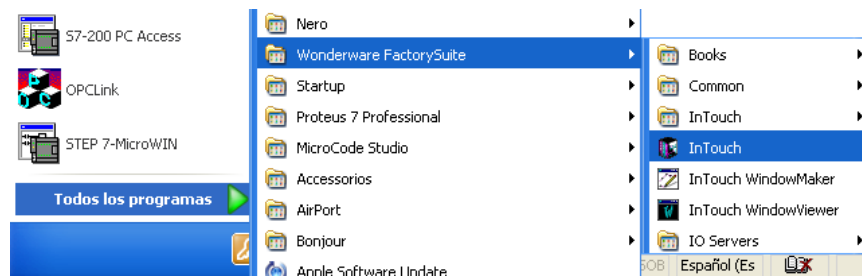


Figura 4.31 Inicialización de INTOUCH

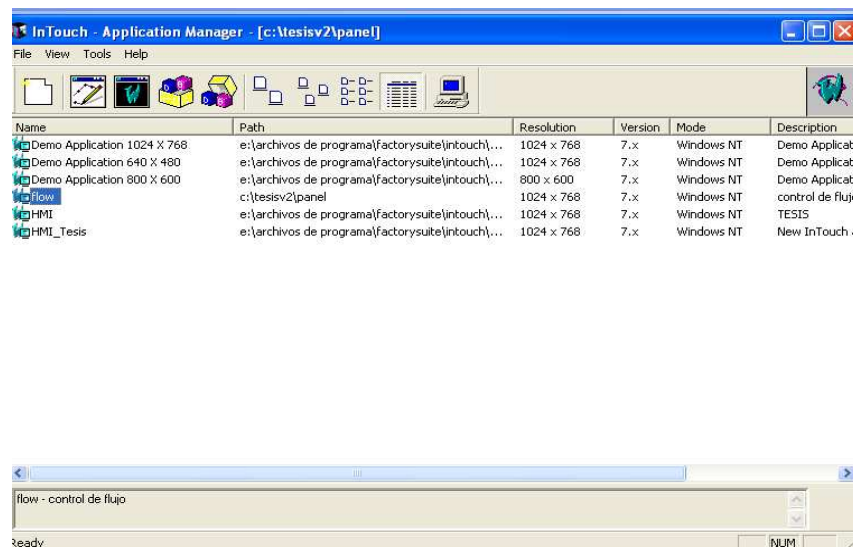


Figura 4.32 Ventana de Aplicación de INTOUCH

Luego de tener la ventana de aplicación de INTOUCH, se escoge la aplicación deseada y se iniciara WindowMaker automáticamente (Ver Figura 4.33).

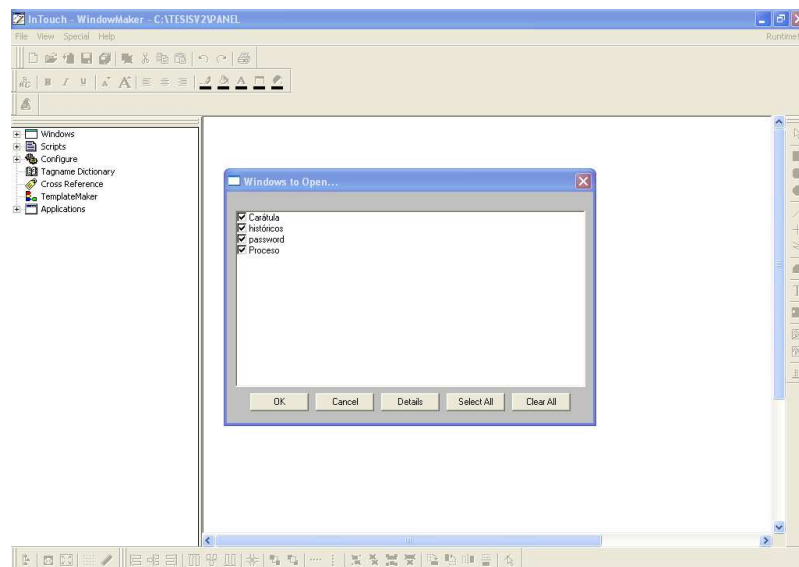


Figura. 4.33 Ventana de inicialización de WINDOW MAKER



En el cuadro de ventanas se selecciona todas las ventanas, se presiona el botón OK para desplegar las ventanas de proceso (Ver Figura 4.34).

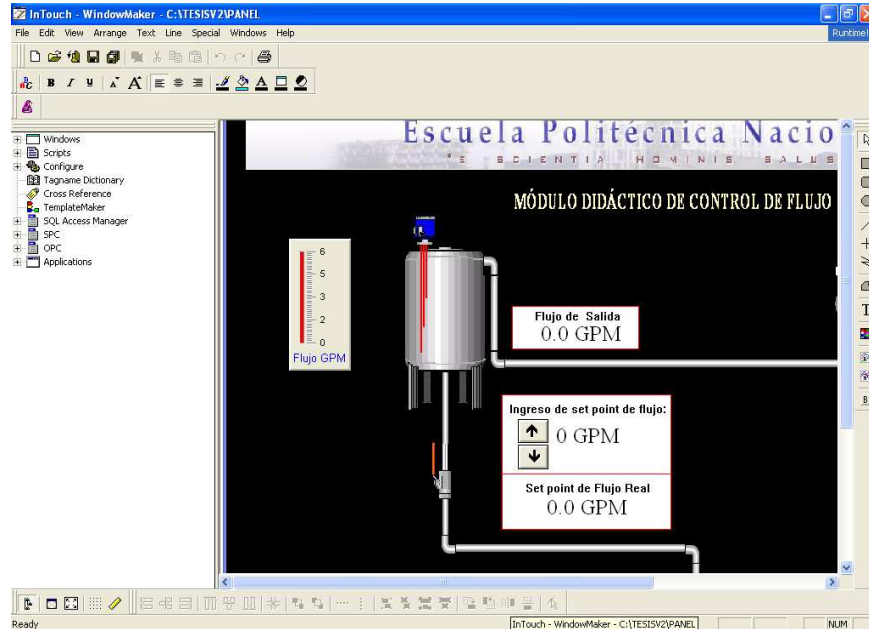


Figura 4.34 Visualización De Ventanas En Window Maker

Luego de tener las ventanas abiertas en WINDOWS MAKER, se debe ingresar al WINDOWS VIEWER, presionando el enlace ubicado en la parte superior derecha que dice "Runtime". Automáticamente se inicializará el WINDOW VIEWER (Ver Figura 4.35).

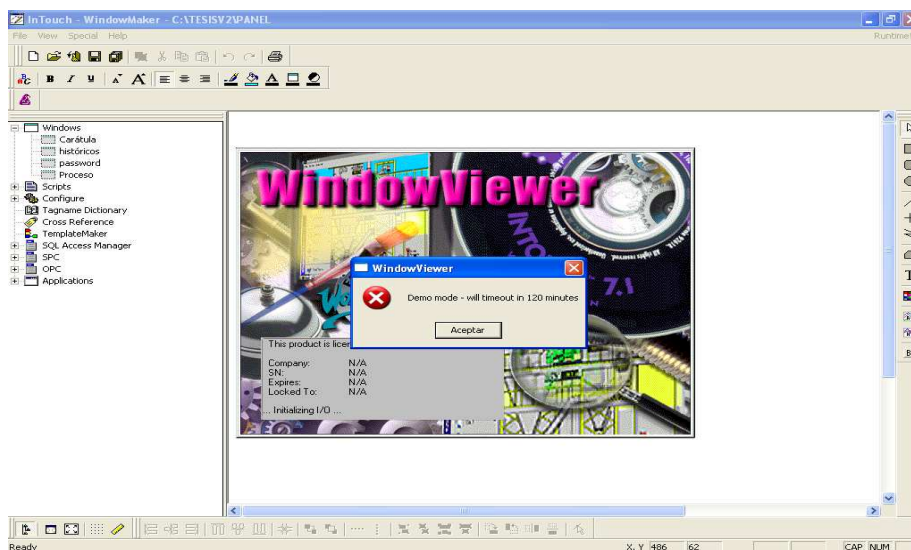


Figura. 4.35 Inicialización de WINDOW VIEWER

La Figura muestra que se está utilizando una versión “demo” del software INTOUCH por tanto se tiene la restricción que solamente se lo podrá utilizar por un tiempo de 120 minutos. Se da clic en aceptar y aparecerá la pantalla de inicio del proceso en WINDOW VIEWER (Ver Figura 4.36).



Figura 4.36 Ventana de Inicio del Proceso

Luego de diseñado la HMI del sistema, se procederá a realizar las pruebas y obtener resultados de la planta tanto en modo “local” como “remoto” para así comprobar el óptimo control de la planta y si cumple con los objetivos de la misma.

**CAPÍTULO 5.**  
**PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y**  
**RECOMENDACIONES.**

## CAPITULO 5.

### PRUEBAS Y RESULTADOS

Para el análisis del óptimo funcionamiento del módulo de control de flujo se realizaron las siguientes pruebas:

#### 5.1 PRUEBAS DE COMUNICACIÓN

La comunicación entre la HMI y el PLC es fundamental para el buen desempeño del sistema, ya que sin éste no se cumpliría en gran parte el propósito didáctico para el cual fue creado el módulo.

Para verificar que existe comunicación entre la HMI y el PLC se recurrió a la pantalla principal de la HMI, en donde existen dos indicadores luminosos que al momento de tener un color verde, indica en qué modo se encuentra trabajando en ese instante el sistema (Local o Remoto).

Para las pruebas desde el panel de control donde se tiene el selector para cambiar de modo “Local” a “Remoto”, se escogió la opción local y se observó en la pantalla de InTouch que se encienda el indicador luminoso correspondiente a local (Ver Figuras. 5. 1 y Figura 5.2)



Figura. 5.1 Panel trabajando en modo local.

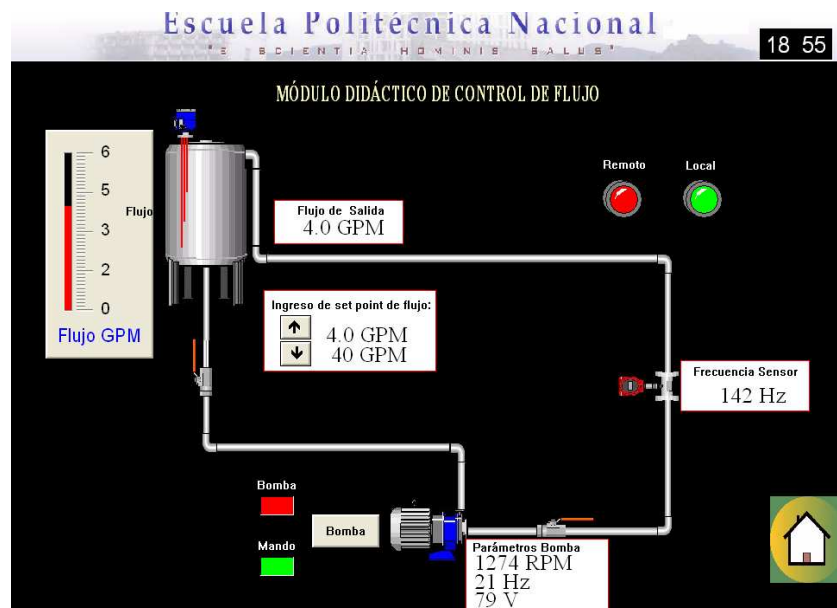


Figura. 5.2 Ventana de visualización modo local.

Repitiendo el mismo procedimiento seleccionó la posición Remoto y se observó cómo cambian de color los indicadores luminosos de InTouch, poniéndose ahora en verde el correspondiente a Remoto (Ver Figuras 5.3 y 5.4)



Figura 5.3 Panel trabajando en modo remoto.

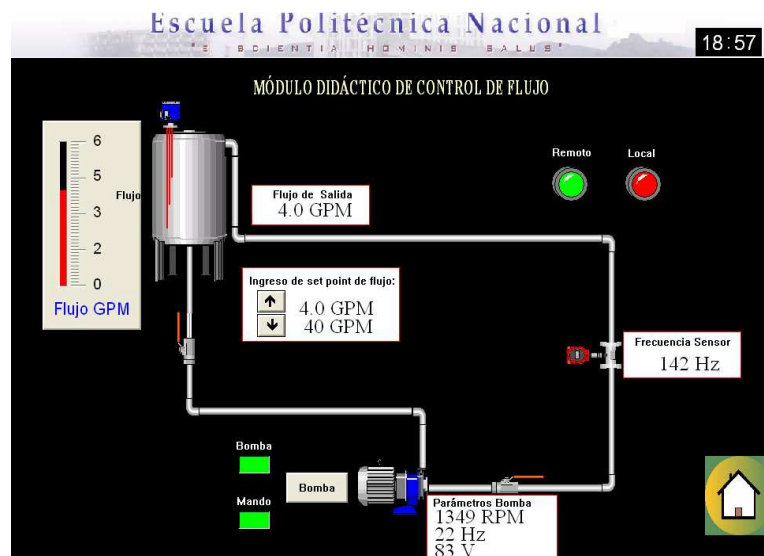


Figura 5.4 Ventana de visualización modo remoto.

Otra forma de comprobar que existe comunicación es observando el cable de comunicación el mismo que encenderá sus LEDs posteriores al momento de estar estableciendo comunicación (Ver Figura 5.5)



Figura 5.5 Cable de comunicación PPI trabajando.

## 5.2 RESPUESTA DINÁMICA DEL CONTROL PID

Entre los criterios con los que se podría evaluar la respuesta de un sistema están:  
El método analítico y el método experimental.

### El método analítico

Se determinan las ecuaciones o función 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 estáticas y dinámicas del sistema se obtienen a partir de una serie de medidas que se realizan al sistema físico.

Para este método se tienen dos alternativas:

Panel de autosintonía PID propio del PLC S7-200.

Método del tanteo

Aprovechando las ventajas del PLC, 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 utiliza el panel de autosintonía PID con el propósito de obtener parámetros de referencia de las constantes  $T_i$ ,  $T_d$  y  $K_p$ . De esta forma se obtuvo:

$T_i = 0.025$ ,  $T_d = 0.0$  y  $K_p = 0.5$ .

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



Figura 5.6 Valores de  $T_i=0.025$  y  $T_d=0.0$ ,  $K_p=0.5$ ,  $T_s = 10$  [s].



Figura 5.7. Valores de  $T_i=0.025$  y  $T_d=0.0$ ,  $K_p=0.5$ ,  $T_s = 11$  [s].

Se observó que al cambiar de 5 [GPM] a 2 [GPM] se obtuvo un tiempo de establecimiento de 10 segundos, (Ver Figura 5.6), y al variar nuevamente de 2 [GPM] a 5 [GPM] se obtuvo un tiempo de establecimiento de 11 segundos, (Ver Figura 5.7) por tanto se actuará sobre la constante  $K_p$  aumentándola a  $K_p=0.65$  para reducir el tiempo de establecimiento.





Figura 5.8 Valores de  $T_i=0.025$  y  $T_d=0.003$ ,  $K_p$  0.65  $T_s = 7$  [s].



Figura 5.9. Valores de  $T_i=0.025$  y  $T_d=0.003$ ,  $K_p$  0.65  $T_s = 7$  [s].

Con la constante  $K_p$  de 0.65, se observó un tiempo de establecimiento de 7 segundos, obteniéndose también un pequeño sobreimpulso el cual será

controlado con la inclusión de la constante  $T_d = 0.003$ . Sin embargo este tiempo de establecimiento no es óptimo para los propósitos de este trabajo. Por tanto se modifico  $K_p$  y  $T_d$  nuevamente.



Figura 5.10 Valores de  $T_i=0.025$  y  $T_d=0.0042$ ,  $K_p 0.77$   $T_s = 5$  [s].



Figura 5.11 Valores de  $T_i=0.025$  y  $T_d=0.042$ ,  $K_p 0.77$   $T_s = 6$  [s].

Se observó que el tiempo de establecimiento es de 5 segundos, considerado como un valor aceptable, teniendo en cuenta las características de la variable y la velocidad con que esta cambia.

### 5.3 RESPUESTA DEL SISTEMA A PERTURBACIONES

El módulo de control de flujo cuenta con una válvula de bola que se encuentra entre la salida de la bomba y el sensor de flujo, que permitirá ejecutar perturbaciones externas al sistema y así comprobar el buen funcionamiento del sistema de control, los efectos de la perturbación serán detectados, observando un cambio en los parámetros de la bomba. Los parámetros normales para un set point de 4GPM y sin perturbación externa se los observa en la Figura 5.12.

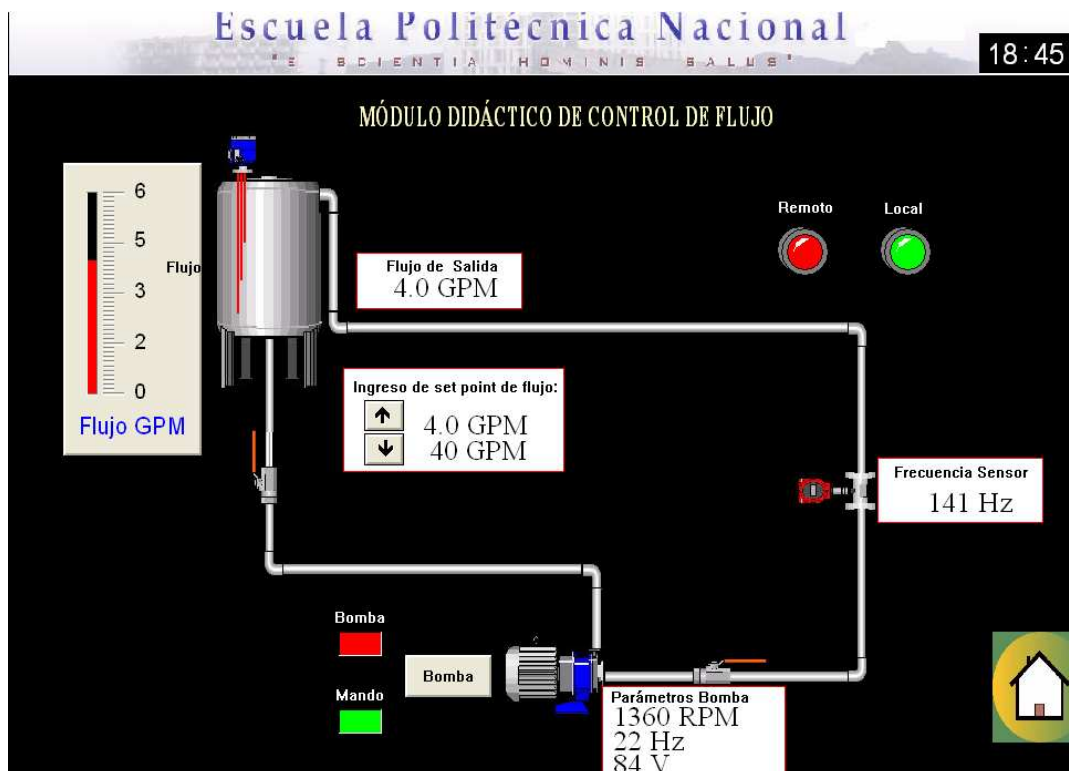


Figura5. 12 Parámetros de la bomba sin perturbaciones.

La perturbación externa consiste en cerrar la válvula hasta un 50%, provocando así una disminución del flujo que está midiendo el sensor. El descenso de flujo será detectado por el sistema de control que actuará elevando la salida del control PID, el cual podrá ser observado en el panel de control de sintonía PID (Figura 5.13)

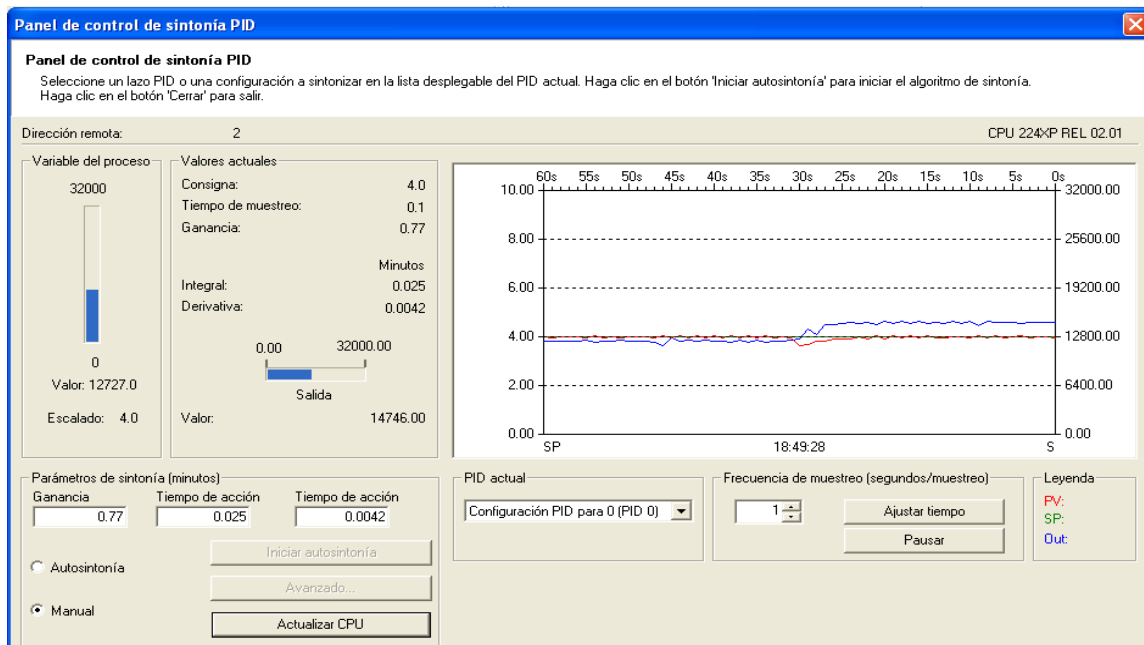


Figura5. 13 Compensación ante un decremento de flujo. Ver la salida del PID.

Como se puede observar en la Figura. 5.13, al momento de tener un descenso en el valor de proceso (línea roja) inmediatamente se tiene un aumento en la salida de control para así tener nuevamente el valor de set point establecido.

En cuanto a los parámetros de la bomba, se observa un aumento en la velocidad, frecuencia y voltaje en relación a los parámetros que debe tener al mismo set point (Ver Figura. 5.14)

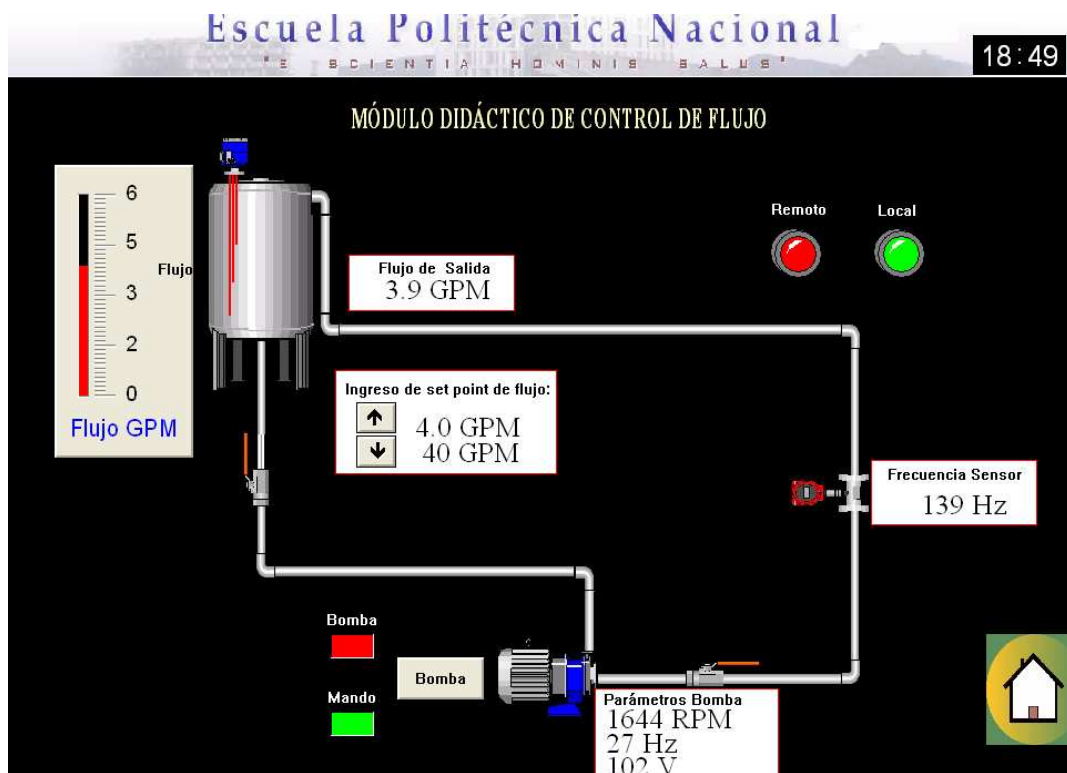


Figura 5.14 Parámetros de la bomba ante un decremento de flujo por perturbación externa.

La válvula será nuevamente colocada en su posición original (abierta 100%) y se observa en el panel de control de sintonía PID como por instantes el valor de la variable de proceso aumenta e inmediatamente el valor de la salida de control disminuye hasta estabilizarse nuevamente en el valor de set point (Ver Figura.5.15)

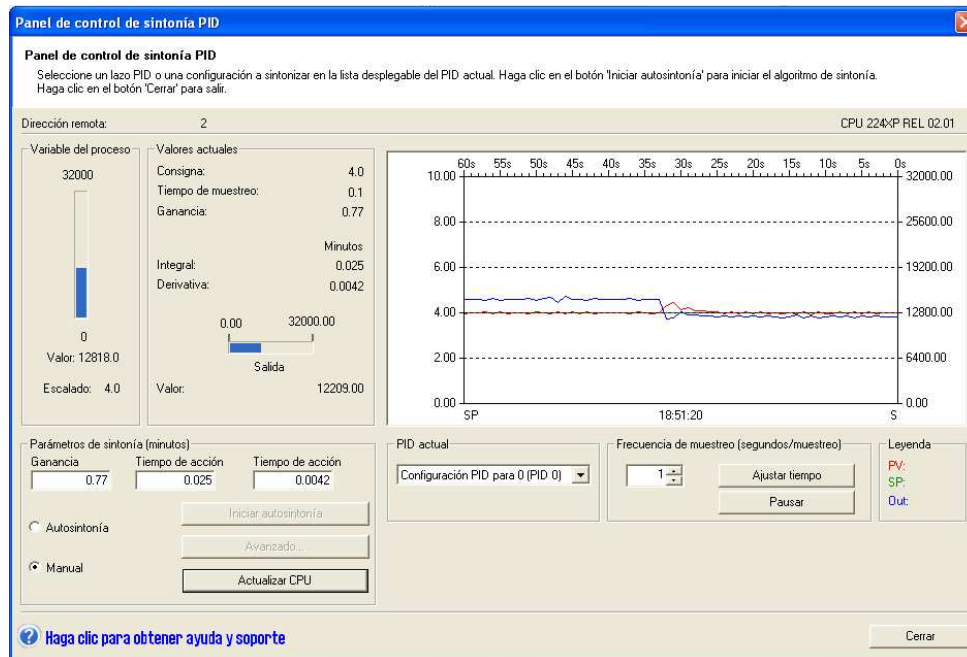


Figura 5.15 Compensación ante un incremento de flujo. Ver la salida del PID.

Luego de volver a condiciones normales de operación se observa que nuevamente los valores de los parámetros de la bomba disminuyen hasta estabilizarse en los valores correspondientes a 4GPM (Ver Figura.5.16)

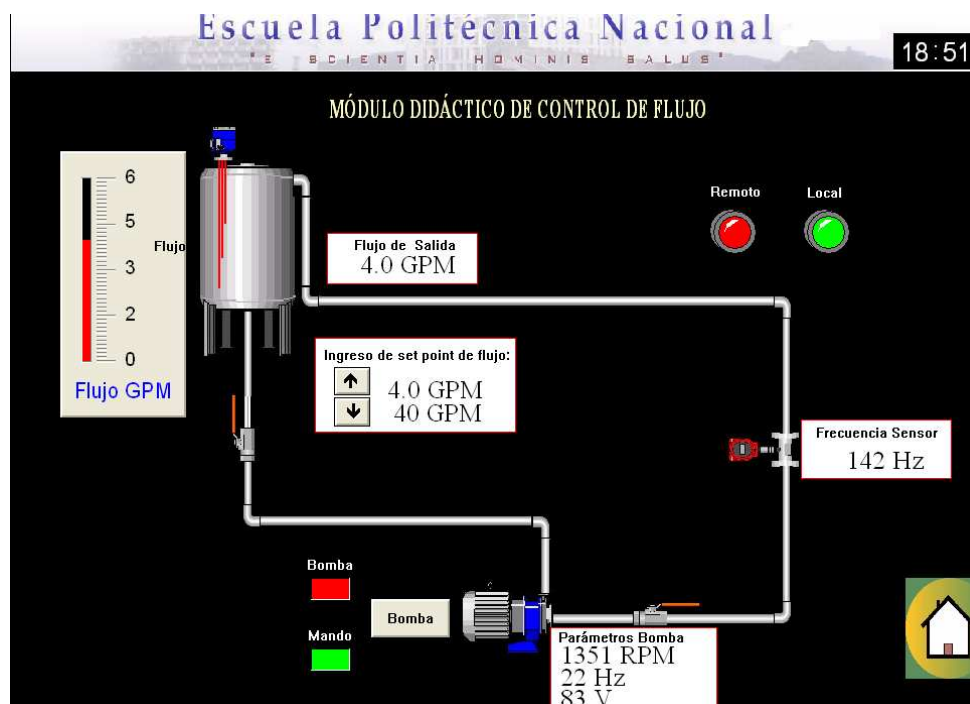


Figura 5.16 Parámetros de la bomba ante un incremento de flujo.

## 5.4 PRUEBAS DE CONTROL DE VELOCIDAD DE LA BOMBA DESDE EL VARIADOR

Uno de los propósitos del módulo de control de flujo es trabajar con diferentes tipos de controladores, por ejemplo el PLC, cumpliendo de esta forma el fin didáctico del módulo, o desde el variador de velocidad; es decir, cambiar de controlador.

Para esto se debe cambiar los parámetros del variador (P700 y P1000) los mismos que darán la alternativa de controlar la bomba solo desde el variador o desde el PLC.



Figura 5.17 Pruebas sobre el variador de velocidad desde el BOP (bomba funcionando a 17.4 Hz)

Aquí se actúa directamente sobre el BOP; es decir que se está trabajando en control en lazo abierto.

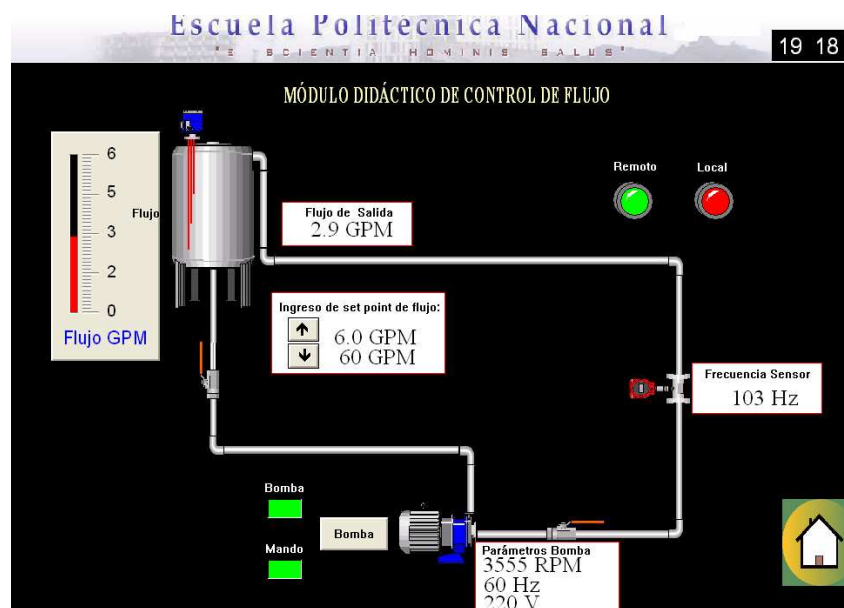


Figura 5.18 HMI con control del variador de velocidad desde el BOP.

Notar que los parámetros del motor no se puede observar ya que el variador está trabajando de modo BOP y no existe comunicación con el PLC.

Se puede visualizar tanto el flujo actual como la frecuencia del sensor ya que estos valores pasan a través del PLC.

Como se observa en la Figura 5.19, en este caso solamente se podrá visualizar en la HMI el valor actual del proceso, más no el set point



Figura 5.19 Flujo con control sobre el variador desde el BOP.

Con las pruebas realizadas en este capítulo se puede afirmar que el modulo de control de flujo 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.



## 5.5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de realizadas las pruebas, de los resultados obtenidos es posible extraer las siguientes conclusiones:

### CONCLUSIONES

- Se pudo evidenciar que un control “PI” sobre la planta no era suficiente para obtener los resultados deseados, por tal motivo fue necesario realizar un control “PID” el cual proporcionó un control bastante apropiado para esta aplicación.
- Tanto la HMI como el control local “TD200” demostraron cumplir con las expectativas: ser de fácil comprensión y manipulación por parte del usuario, teniendo así un sistema amigable y atractivo para su estudio en el laboratorio de instrumentación.
- El diseño del módulo de control de flujo permite visualizar los cambios de flujo mediante tuberías transparentes; además, la facilidad para acoplar diferentes controladores mediante el uso de las regletas colocadas dentro del mismo, permiten cumplir con el objetivo didáctico.
- El módulo de control de flujo se diseñó de tal forma que un cambio brusco del valor de consigna tenga una respuesta rápida de la variable controlada. Esto permite visualizar el proceso de control de flujo en tiempos cortos como para la realización de prácticas de laboratorio.
- Diferentes pruebas de campo que se realizaron permiten concluir que la implementación de una planta con tuberías perfectamente sujetadas evita que ingrese aire dentro de la tubería disminuyendo el error producido en la medición de flujo.

De la experiencia adquirida durante la elaboración de éste proyecto de titulación se puede proponer las siguientes recomendaciones.

## 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.
- Cuando se realice una perturbación, evitar cerrar al máximo el flujo de agua mediante la válvula de bola ubicada en la planta. Dicha válvula de bola ha sido calibrada de tal forma que no sea posible interrumpir al máximo el flujo de agua.
- Se recomienda verificar el ajuste de los elementos asociados al circuito hidráulico tales como: abrazaderas, empaques, tuercas y tornillos de sujeción de la bomba para evitar el ingreso de aire a la tubería y vibraciones que afecten al sistema.
- En caso de producirse una falla en el variador de velocidad, utilizar el panel de operador acoplado al mismo y verificar las posibles causas y soluciones que proporciona el fabricante. Esta información se encuentra detallada en el manual técnico del equipo.
- Para trabajar sin inconvenientes en la comunicación entre el PLC y la HMI, se recomienda el uso del software diseñado por SIEMENS para el

desarrollo de las HMIs. Este software no presenta inconvenientes de comunicación con el PLC ya que ambos son de una misma casa comercial.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**CREUS, Antonio**, Instrumentación Industrial. 7ª Edición. Alfaomega. México. 2005.

**OGATA, Katsuhiko**, Ingeniería de Control Moderna. 4ª Edición. México. 1998.

**Siemens AG**, Manual del sistema de automatización del S7-200. 6ª Edición. Bereich Automation and Drives. Nuremberg, 2004.

**Siemens AG**, Manual Técnico del Variador de Velocidad G110. 4ª Edición, Sinamics G110. 2003.

**Siemens AG**, Manual de programación del Variador de Velocidad G110. 4ª Edición. Sinamics G110. 2003.

**Kobolt**, Manual Técnico del medidor de caudal tipo turbina DRS-F300. 1ª Edición. M-Zert, 2007.

**CORRALES, Luis**, Instrumentación Industrial, Quito, EPN, 2006.

WIKIPEDIA, La enciclopedia libre.

[http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero\\_de\\_Reynolds](http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_de_Reynolds)

[http://es.wikipedia.org/wiki/Estado\\_de\\_agregaci%C3%B3n\\_de\\_la\\_materia](http://es.wikipedia.org/wiki/Estado_de_agregaci%C3%B3n_de_la_materia)

[http://es.wikipedia.org/wiki/Principio\\_de\\_Bernoulli](http://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_Bernoulli)

Escuela de ingeniería de Antioquia, Mecánica de fluidos y recursos hidráulicos.

<http://fluidos.eia.edu.co/lhidraulica/guias/bombas/Bombas.html>

Portal Ecuador, Propiedades de los líquidos y gases.

<http://portalecuador.ec/module-PageSetter-viewpub-tid-2-pid-208.php>

National Instruments, OLE para Control de Proceso.

<http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/FB06C0084030B2F186256C130055734A>