

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

FACULTAD DE INGENIERÍAS

CARRERA DE MECÁNICA

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA
CONTROL AUTOMÁTICO DE NIVEL Y CAUDAL DE
LÍQUIDOS PARA LOS LABORATORIOS DE INGENIERÍA
MECÁNICA UPS-QUITO**

CÉSAR ORLANDO MACHADO RAMÍREZ

cesar_machadoramiz@hotmail.com

ROBINSON PAÚL MOLINA CORONADO

rmolina87@gmail.com

DIRECTOR: Ing. Joseph Ramón Vergara Cedeño

jvergara@ups.edu.ec

Quito, Julio 2011

DECLARACIÓN

Nosotros, César Orlando Machado Ramírez y Robinson Paúl Molina Coronado, 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 los conceptos desarrollados, análisis realizados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Quito, 12 de julio de 2011

César O. Machado R.

Robinson P. Molina C.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por César Orlando Machado Ramírez y Robinson Paúl Molina Coronado, bajo mi supervisión.

Ing. Joseph Vergara

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, a mis padres y mis hermanos por el apoyo incondicional y moral que me entregaron y la paciencia que me tuvieron durante todos estos años de estudiante.

Agradezco a todas las personas que de una u otra manera hicieron posible con su apoyo la culminación de este proyecto y en especial a mi compañero de tesis.

Agradezco a la “UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA”, por haberme brindado la oportunidad de adquirir excelentes conocimientos para así forjarme como profesional y por el financiamiento durante toda la investigación.

Un agradecimiento muy especial para el Ing. Joseph Vergara por haber dirigido este proyecto.

César Machado

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a Dios, a todas las personas que de una u otra manera me han ayudado a realizar este proyecto, a mis padres Carmita y José, mi hermano William por haber colaborado en todo este tiempo en todo lo que hizo falta, al Ing. Joseph Vergara por su constante y confiable colaboración, al Ing. William Díaz por favorecer activamente la aprobación y buen resultado del proyecto. Asimismo agradezco al personal administrativo de la UPS especialmente a Pablo Zambrano, Amparito Valdez, Vinicio Ordóñez por hacer efectivo el financiamiento por parte de la Universidad. Otro agradecimiento aparte para el personal administrativo de la sede Kennedy y además a los profesores que invirtieron su tiempo para encaminar correctamente la investigación como el Ing. Orlando Pineda y el Ing. Fabio Obando. Finalmente agradezco a mis amigos por el apoyo brindado y a César Machado por la gran cantidad de tiempo y esfuerzo invertidos en concluir el prototipo.

Robinson Molina

DEDICATORIA

Este logro va dedicado a Dios quien me ha guiado por el camino del bien y en especial a mis padres, César y Enma quienes con sus sabios consejos supieron cultivar en mí día a día la honradez, la humildad, la perseverancia y el trabajo, gracias a ellos luchar con esfuerzo y dedicación para culminar con éxito uno más de mis sueños.

César Machado

DEDICATORIA

Dedicado a mi familia –incondicional—, a mis amigos/as y a mi Universidad.

Robinson Molina

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN	ii
CERTIFICACIÓN	iii
AGRADECIMIENTO	iv
DEDICATORIA	vi
INDICE DE CONTENIDOS	viii
INDICE DE ANEXOS	xv
RESUMEN	xviii
PRESENTACIÓN	xx

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO I	1
MEDICIÓN Y CONTROL DE NIVEL Y CAUDAL	1
1.1 Conceptos Básicos de los líquidos	1
1.1.1 Propiedades de los líquidos	1
1.1.1.1 Flujo	1
1.1.1.1.1 Flujo Laminar	1
1.1.1.1.2 Flujo Turbulento	2
1.1.1.2 Compresión y Expansión	2
1.1.1.3 Forma y Volumen	2
1.1.1.4 Viscosidad	3
1.1.1.5 Fluidez	3
1.1.1.6 Difusión	3
1.1.1.7 Tensión Superficial y Efecto de Capilaridad	4
1.1.1.8 Densidad	4
1.1.1.8.1 Densidad absoluta	4
1.1.1.8.2 Densidad relativa	4
1.1.1.9 Presión	4
1.1.1.9.1 Presión Absoluta y Presión de Vacío	5
1.1.1.9.2 Presión Manométrica	6
1.1.1.9.3 Presión Atmosférica	6
1.1.1.9.4 Presión Hidrostática	7

1.1.1.10 Cavitación	8
1.2 Medición de Nivel de Líquidos	8
1.2.1 Métodos de Medición de Nivel de Líquidos	9
1.2.1.1 Métodos de medición directa	10
1.2.1.1.1 Método de medición por sonda (o varilla)	10
1.2.1.1.2 Método de medición por aforación (o cinta y plomada)	10
1.2.1.1.3 Método de medición por indicador de cristal.....	11
1.2.1.1.4 Método de medición flotador-boya.....	12
1.2.1.2 Métodos de medición indirecta	13
1.2.1.2.1 Método de medidores actuados por desplazadores.	13
1.2.1.2.2 Método de medidores actuados por presión hidrostática	14
1.2.1.2.2.1 Sistema básico o Manómetro	15
1.2.1.2.2.2 Método de diafragma-caja.....	16
1.2.1.2.2.3 Método de presión diferencial.....	16
1.2.1.3 Métodos de medición por las características eléctricas del líquido	
17	
1.2.1.3.1 Método Conductivo	17
1.2.1.3.2 Método Capacitivo	18
1.2.1.3.3 Método Ultrasónico	19
1.3 Medición de Caudal de Líquidos	20
1.3.1 Número de Reynolds.....	21
1.3.2 Tipos de Medidores de Caudal.....	24
1.3.2.1 Medidores de Presión Diferencial	24
1.3.2.1.1 Medidor de Placa Orificio	24
1.3.2.1.2 Medidor de Boquilla o Tobera de Flujo.....	25
1.3.2.1.3 Medidor de Tubo Venturi	25
1.3.2.1.4 Medidor de Tubo Pitot o sonda de Pitot	26
1.3.2.1.5 Medidor de Sistemas Elbow o de Codo	27
1.3.2.1.6 Medidor de Área Variable o Rotámetro.....	28
1.3.2.2 Medidores de desplazamiento positivo	29
1.3.2.2.1 Medidor de Pistón Oscilante	29
1.3.2.2.2 Medidor de Rueda de Paletas	30
1.3.2.2.3 Medidor de Engranaje Oval	31
1.3.2.3 Medidores de velocidad	31
1.3.2.3.1 Medidor de turbina	31
1.3.2.3.2 Medidor tipo Vortex.....	32
1.3.2.3.3 Medidores Electromagnéticos	33
1.3.2.3.4 Medidores ultrasónicos	34
1.3.2.4 Medidores de masa.....	36
1.3.2.4.1 Medidores tipo Coriolis.....	36
1.3.2.4.2 Medidores térmicos	37
1.4 Bombas	37
1.4.1 Clasificación.....	38
1.4.1.1 Bombas de desplazamiento positivo o volumétrico	39

1.4.1.1.1 Bombas de émbolo alternativo	39
1.4.1.1.2 Bombas volumétricas rotativas o rotoestáticas.....	39
1.4.1.2 Bombas rotodinámicas	40
1.4.1.2.1 Bomba Centrífuga	40
1.4.1.2.1.1 Cebado de Bomba	42
1.4.2 Punto de Operación	43
1.4.3 Curvas de Isoeficiencia	44
1.5 Válvulas	44
1.5.1 Definición.....	44
1.5.2 Tipos de Válvulas.....	45
1.5.2.1 Válvula de Globo	45
1.5.2.2 Válvula de compuerta	46
1.5.2.3 Válvula de mariposa.....	47
1.5.2.4 Válvula de bola	48
1.5.2.5 Válvula de Retención (Check)	48
1.5.2.6 Válvula de alivio o desahogo	49
1.5.2.7 Válvula de Solenoide o Electroválvula	50
1.6 Sistema de Control.....	51
1.6.1 Definiciones.	51
1.6.1.1 Variable controlada y variable manipulada.....	51
1.6.1.2 Plantas.	51
1.6.1.3 Procesos.	51
1.6.1.4 Sistemas.	52
1.6.1.5 Perturbaciones.	52
1.6.1.6 Control realimentado.....	52
1.6.2. Sistemas de control realimentados.....	52
1.6.3. Sistemas de control en lazo cerrado.....	53
1.6.4. Sistemas de control en lazo abierto.....	53
1.6.6 Acciones básicas de control	55
1.6.6 .1 Clasificación de los controladores industriales.....	55
1.7. Controladores lógicos programables (PLC).	55
1.7.1. Evolución de los autómatas programables.....	56
1.7.2. Funcionamiento del autómata.	57
1.7.2.3 Sistema Operativo (Memoria ROM):	59
1.7.2.4 Imágenes de proceso:	59
1.7.2.5 Conector canal serie de comunicación:.....	59
1.7.2.6 Temporizadores, contadores y marca:.....	59
1.7.2.7 Unidad aritmética y lógica (ALU):	59
1.7.2.8 Unidad de control.....	60
1.7.2.9 Bus periférico externo	60
1.7.3 Ciclo de datos.....	60
1.7.4 Lenguajes de programación.	61
1.7.4.1 Lista de instrucciones.....	61
1.7.4.2 Diagrama de funciones.....	62

1.7.4.3 Esquema de contactos.....	62
1.7.4.4 Tipos de instrucciones.....	63
1.7.5. Algoritmo PID.....	64
1.7.5.1 Término proporcional de la ecuación PID	67
1.7.5.2 Término integral de la ecuación PID	67
1.7.5.3 Término diferencial de la ecuación PID.....	68
1.7.5.4 Modos.....	69
1.7.5.5 Alarmas y operaciones especiales.....	70
1.7.5.6 Condiciones de error	70
1.7.6.1. Definir el proceso a automatizar	71
1.7.6.2. Dibujar el esquema eléctrico de potencia de la parte operativa de la instalación.....	72
1.7.6.3. Elección del autómata	72
1.7.6.4. Asignación de las entradas y salidas de información y control	73
1.7.6.6. Diseñar los ciclos de funcionamiento previstos.....	75
1.7.6.7. Diseñar y gestionar los defectos previstos y las seguridades necesarias para un correcto funcionamiento de la instalación	76
1.7.6.8. Implementar el programa con el software adecuado para mejorar el mantenimiento y control de productividad de la instalación (programa SCADA).....	77
1.8 Accionamientos eléctricos de velocidad variable.....	78
1.8.1 El control escalar o control voltaje-frecuencia (v/f)	79
1.8.2 El control vectorial.....	79
1.8.2.1 El control vectorial tiene dos métodos:.....	80
1.8.3 El control directo del par.....	81
1.9 Variador de velocidad.....	81
1.9.1 Razones para emplear variadores de velocidad	82
1.9.1.1 El control de procesos	83
1.9.1.1.1 El ajuste de la velocidad como una forma de controlar un proceso	83
1.9.1.2 El ahorro de la energía	83
1.9.2 Tipos de variadores de velocidad.....	84
1.9.2.1 Variadores mecánicos	85
1.9.2.2 Variadores hidráulicos	85
1.9.2.3 Variadores eléctrico-electrónicos.....	86
1.10 Características mecánicas de las cargas.....	89
1.11 Características mecánicas de máquinas eléctricas	90
1.12 Interfaz Hombre-Máquina (HMI).....	91
1.12.1 Funciones de un software HMI.	92
1.12.1.1 Monitoreo.....	92
1.12.1.2 Supervisión.....	93
1.12.1.3 Alarmas	93
1.12.1.4 Control	93
1.12.1.5 Históricos	93

1.12.2 Tareas del software HMI.....	93
1.12.3 Tipos de software HMI para PC	94
1.12.3.1 Lenguaje de programación visual	94
1.12.3.2 Paquetes de desarrollo orientados a tareas HMI	94
1.13 Descripción del prototipo a construir.....	94
CAPITULO II	96
DISEÑO Y CONTRUCCION DEL MODULO	96
2.1 Estructura del módulo	96
2.2 Selección de la tubería	99
2.3 Selección de los actuadores requeridos	101
2.3.1 Bomba	101
2.3.1.1 Criterios de selección	101
2.3.1.2 Utilidad para la aplicación	108
2.3.2 Electroválvulas	108
2.3.2.1 Criterios de selección	109
2.3.2.2 Utilidad para la aplicación	110
2.4 Definición de sensores y captadores	110
2.4.1 Sensor de Presión	111
2.4.1.1 Criterios de selección	111
2.4.1.2 Utilidad para la aplicación	113
2.4.2 Sensor de Caudal.....	114
2.4.2.1 Criterios de selección	115
2.4.2.2 Utilidad para la aplicación	115
2.4.3 Presostato (switch de presión).....	116
2.4.4 Variador de Frecuencia	116
2.4.4.1 Criterios de selección	117
2.4.4.2 Utilidad para la aplicación	118
2.4.5 Fuente de alimentación para 24 V.....	119
2.4.5.1 Criterios de selección	119
2.4.5.2 Utilidad para la aplicación	119
2.4.6 Relés de estado sólido	120
2.5 Función realizada por cada actuador.	121
2.6 Medidas de seguridad para operar el prototipo.....	122
2.7 Posibles averías y tratamiento.....	123
2.8 Formas de comunicación con el operador.	124
2.8.1 Computador.....	124
2.8.1.1 Criterios de selección	125
2.8.1.2 Utilidad para la aplicación	125
2.9 Mantenimiento del prototipo	126
2.10 Esquema eléctrico de potencia del sistema.....	127
2.11 Elección del autómat (PLC y Módulo analógico).....	128
2.11.1 Criterios de selección	128
2.11.2 Utilidad para la aplicación	124

2.12	Asignación de las entradas y salidas de información y control	125
2.13	Esquema de mando del sistema	126
CAPITULO III	127
DESARROLLO DEL SOFTWARE HMI		127
3.1	Ciclos de funcionamiento previstos	127
3.2	Programas utilizados para el adecuado control del prototipo	127
3.2.1	Utilidades de los programas utilizados	128
3.2.1.1	Software de visualización Intouch.	128
3.2.1.1.1	Tipos de ventanas	129
3.2.1.1.2	Elaboración de variables.	129
3.2.1.1.3	Scripts.....	129
3.2.1.1.4	Animación Links.....	130
3.2.1.1.5	Direccionamiento de I/O en Intouch	130
3.2.1.1.6	Creación de Access Names en Intouch	130
3.2.1.1.6.1	Herramientas de un Access Name.....	131
3.2.1.2	KEPserver EX5	132
3.2.1.3	S7-200_PC_ACCESS	133
3.2.1.4	MICROWIN STEP 7 V4.0	134
3.3	Programación realizada en MICROWIN STEP 7 V4.0.....	135
3.4	HMI desarrollada en Intouch.	153
3.4.1	Descripción general de cada una de las ventanas.....	153
3.4.2	Programación de las ventanas del HMI	157
3.4.2.1	Curvas históricas.	158
3.4.2.2	Definición de los Tagnames.....	158
3.4.2.3	Scripts del HMI.	159
3.5	Comunicación	160
3.5.1	Establecimiento de la comunicación.....	161
3.5.2	Comunicación entre el PLC e Intouch	163
CAPITULO IV	167
PRUEBAS RESULTADOS CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.		167
4.1	Simulación de caudal en el sistema	167
4.2	Calibración del transmisor de caudal	169
4.2.1	Captación de los pulsos.....	169
4.2.2	Conversión de la frecuencia a un valor entre 0 y 32000	171
4.2.3	Filtro de la señal del transmisor de caudal	172
4.2.4	Pruebas en el sistema para verificar el caudal.....	173
4.3	Datos reales del caudal con respecto a la velocidad de la bomba.....	173
4.4	Cálculo de la eficiencia de la bomba	175
4.5	Control PID para la variable Nivel	176
4.5.1	Calibración de la variable de proceso	176
4.5.2	Datos de la configuración PID de nivel	180
4.5.4	Control de nivel por PID	183

4.5.5 Reacción del PID ante los cambios de setpoint y a perturbaciones	185
4.6 Control PID para la variable Caudal	188
4.6.1 Datos del control PID para caudal	188
4.6.2 Resultados del PID de caudal	188
4.6.3 Reacción del PID de caudal frente a cambios en el Setpoint	190
1.5 4.7 Medida de volumen y contador de litros	191
4.8 Conclusiones	195
4.9 Recomendaciones:	197
GLOSARIO	199
BIBLIOGRAFÍA	207

ANEXOS INCLUIDOS EN EL DOCUMENTO PRINCIPAL

CATÁLOGOS

- Transmisor de caudal *KOBOLD DRS OEM TURBINE FLOW SENSOR*. 4 páginas. Documento electrónico adjunto “DRS_datasheet.PDF, DRS_datasheet_man.pdf”.
- Bomba Thebe TH16AL. 1 página. Documento electrónico adjunto “TH16AL.pdf”.
- Transductor de presión Endress+Hauser Cerabar T PMC 131.2 páginas. Documento electrónico adjunto “ti279es Cerabar T.pdf”.
- SIMULACION DE HYDROFLO™ COMPLETA. 4 páginas. Documento electrónico adjunto “Reporte de Hidroflow_Completo.pdf”.
- MANUAL DE OPERACIÓN DEL EQUIPO. 2 Páginas. Documento electrónico adjunto “Manual de operación del usuario.docx”.
- RESUMEN DE COMPRAS. 1 Página. Documento electrónico adjunto “Resumen de compras.docx”.
- PLAN DE MANTENIMIENTO. 13 Páginas. Documento electrónico adjunto “PLAN DE MANTENIMIENTO.pdf”.
- FOTOS DEL PROTOTIPO. 5 Páginas. Documento electrónico adjunto “Fotos del prototipo.pdf”.

PLANOS

- Plano del almacén con medidas de la estructura. 1 pagina formato A3. Documento electrónico adjunto “Planos del almacén.pdf”.
- Plano de tubería. 1 página formato A3. Documento electrónico adjunto “TUBERÍA DE ENTRADA AL TANQUE.pdf”.
- Plano del compartimento eléctrico. 1 página formato A3. Documento electrónico adjunto “COMPARTIMENTO.pdf”.
- Plano eléctrico de fuerza (Corriente alterna 110-220 VAC). 1 página formato A3. Documento electrónico adjunto “PLANO DE FUERZA.pdf”.
- Plano eléctrico de mando (Corriente continua 24 VDC). 1 página formato A3. Documento electrónico adjunto “PLANO DE MANDO.pdf”.

ANEXOS INCLUIDOS EN EL DVD QUE ACOMPAÑA AL DOCUMENTO PRINCIPAL

CATÁLOGOS

- Catálogo del cable PPI/USB Siemens. “s7200cable.pdf”.
- Manual del PLC S7-200 Siemens. “S7200_Manual.pdf”.
- Catálogo de la válvula solenoide Danfoss EV250B. “EV250B-AssistedLift-PD200-H202.pdf”.
- Manual del variador de frecuencia Siemens Sinamics G110. “G110_OPI_22102965_SP.pdf”.
- Lista de parámetros del variador de frecuencia Siemens Sinamics G110. “Manual_SINAMICS_G110.pdf”.
- Ejemplo de aplicación entre PLC S7-200 y Sinamics G110. “MAP_Ind_Product_Information_Manual_V1d1_en.pdf”
- Transmisor de caudal *KOBOLD DRS OEM TURBINE FLOW SENSOR*. 4 páginas. Documento electrónico adjunto “DRS_datasheet.PDF, DRS_datasheet_man.pdf”.
- Bomba Thebe TH16AL. 1 página. Documento electrónico adjunto “TH16AL.pdf”.
- Transductor de presión Endress+Hauser Cerabar T PMC 131.2 páginas. Documento electrónico adjunto “ti279es Cerabar T.pdf”.
- MANUAL DE OPERACIÓN DEL EQUIPO. 2 Páginas. Documento electrónico adjunto “Manual de operación del usuario.docx”.
- RESUMEN DE COMPRAS. 1 Página. Documento electrónico adjunto “Resumen de compras.docx”.
- PLAN DE MANTENIMIENTO. 13 Páginas. Documento electrónico adjunto “PLAN DE MANTENIMIENTO.pdf”.
- FOTOS DEL PROTOTIPO. 5 Páginas. Documento electrónico adjunto “Fotos del prototipo.pdf”.

ARCHIVOS DE PROGRAMAS REALIZADOS

Archivo comprimido “Intouch.zip”. Contiene:

- Carpeta Intouch, la cual debe ser copiada al disco “D:” del equipo con Windows XP si se desea restaurar en la totalidad los archivos relacionados con el proyecto.
- El archivo “\Intouch\PLC1\Microwin\PLC1.mwp” es el programa principal en Microwin™.
- El archivo “\Intouch\PLC1\Pc Access\PLC1.pca” contiene los datos de las variables que utiliza PAccess™ para la comunicación OPC.
- El archivo “\Intouch\PLC1\Kepserver\Kep1.opf” contiene los datos de las variables que utiliza KepServer™ EX 5 para la comunicación DDE.
- La carpeta “\Intouch\PLC1” contiene los datos para cargar el programa en el explorador de Wonderware Intouch™.
- El archivo “\Intouch\PLC1\Excel\Libro1.xlsm” contiene un programa en Excel para extraer datos guardados por medio del software Intouch™.
- La carpeta “\Intouch\PLC1\Trend” contiene los resultados que se obtiene por medio de la grabación de datos del programa Intouch™ ordenados de acuerdo a la fecha y hora en que han sido guardados.
- La carpeta “\Intouch\PLC1\Microwin\Programas adicionales” contiene los ejemplos de programación para control ON-OFF y para control Proporcional que utiliza Microwin™.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad dotar a los laboratorios de mecánica de un sistema mediante el cual los estudiantes podrán realizar prácticas físicas de automatización y control industrial, como son la medición, control y monitoreo de variables de proceso en este caso nivel y caudal.

Para cumplir con el objetivo planteado, se diseñó y construyó un prototipo automatizado con posibilidad de controlar dos variables caudal y nivel, dicho prototipo cuenta con un sistema de tubería por el cual circula agua impulsada por una bomba. Dicha bomba está regulada en su velocidad por un variador de frecuencia.

Tanto para el control de caudal así como para el control de nivel, el agua circula desde el tanque de reserva hacia el tanque de prueba, y de éste hacia el tanque de reserva nuevamente formando de esta manera un circuito cerrado de agua.

Para la medición de caudal se utilizó un sensor tipo turbina marca KOBOLD con un rango de medición de 2 a 40 [lts/min] con una exactitud de medición de 1.5%, además se consideró que es de un costo bajo. El incremento o decremento del flujo (caudal) se lo realizó variando la velocidad de la bomba mediante el variador de velocidad SINAMICS G110.

Mientras que para la medición de nivel se ha utilizado un sensor de presión hidrostática que tiene un rango de medición de 0 a 10 [Kpa] con una exactitud en la medición del 0.5%, el cual censará la columna de agua y de acuerdo a la presión nos dará la altura de la misma de forma directa. Para hacer posible la variación del nivel en el tanque de medición se utilizó en conjunto una válvula manual tipo compuerta y una electroválvula al final del mismo.

Para el control del prototipo se utilizó el PLC S7-200 (Controlador Lógico Programable), con un CPU 224 DC/DC/DC, con una señal de 4 a 20 [mA], para el cual se diseñaron algoritmos de control con rutinas PID.

El manejo del prototipo es de forma remota, para lograr esto se implementó un HMI realizado el software Intouch 10, con ventanas que permiten interactuar de

acuerdo a las necesidades planteadas al momento de abrir la ventana de control principal.

Para el manejo total del prototipo y su comunicación, con la finalidad de realizar una adquisición de datos en cada una de las pruebas realizadas se utilizó en conjunto un grupo de programas como son: Intouch 10, STEP 7 MicroWIN SP7 4, KEPServer EX5 y S7-200 PC Access V1.02.

En las pruebas de funcionamiento realizadas se determinaron parámetros óptimos (Ganancia = 7.5, Tiempo de Integración = 0.21 min, Tiempo de Derivación = 0 y tiempo de muestreo = 0.1 seg.), para el control de nivel, con los cuales arrojaron resultados satisfactorios, haciendo notar que la calibración del controlador fue apropiada, al variar cada uno de estos valores se notó que el sistema tiende a variar en rapidez de respuesta y estabilidad.

Para el tramo de 0 a 100 mm se obtuvo un tiempo de reacción de 1 minuto con 25 segundos para estabilizarlo totalmente, el error en el *setpoint* de nivel fue de 0.5 mm. Para un segundo tramo tomado de 390 a 500 mm se obtuvo un tiempo de reacción de 1 minuto para una estabilización satisfactoria y el error máximo en el *setpoint* de nivel fue de 2.6 mm.

Para el control de caudal el PID tiene los siguientes valores (Ganancia = 0.8, Tiempo de Integración = 0.02, Tiempo de Derivación = 0 y tiempo de muestreo = 0.1 segundos), se tomó muy en cuenta que el sensor de turbina no arroja valores exactos cuando el caudal es menor a 0.5 [GPM], es decir cuando son menores al 5%, esto de acuerdo a los valores de diseño del transmisor de caudal KOBOLD DRS. Para el tramo de 0 a 15 litros sobre minuto se obtuvo un tiempo de estabilización de 40 segundos, mientras que el error de caudal se reduce en la práctica a la exactitud del transmisor que es 1.5 %.

Además de realizó un tercer PID utilizando el transmisor de caudal para realizar dosificaciones tomando en cuenta el volumen del líquido con los siguientes valores (Ganancia = 0.8, Tiempo de Integración = 0.02, Tiempo de Derivación = 0 y tiempo de muestreo = 0.1 segundos). Para un valor de 4 litros se obtuvo un tiempo de reacción de 16 segundos, mientras que el error fue de 0.032 litros.

ABSTRACT

In this document it is shown the design and performance of laboratories equip with a system through which students can perform physical practices of industrial automation and control, such as measurement, control and monitoring of process variables. To meet the goal set, it was designed and built an automated prototype with the ability to control flow and level, the prototype has a system of pipes through which water flows driven by a pump. The pump speed is regulated by an inverter.

In both, flow control and level control, water flows from the reservoir into the test tank, and then into the reservoir again thus forming a closed water circuit.

For flow measurement it was used a KOBOLD turbine sensor with a measuring range from 2 to 40 [l / min], a measurement accuracy of 1.5%. The increase or decrease of the flow was made by varying the speed of the pump through the SINAMICS G110 drive speed.

As for the level measurement it is used a hydrostatic pressure sensor that has a measuring range from 0 to 10 [kPa] with a measurement accuracy of 0.5%, which still counted the water column and according to the pressure will transmit the height of it directly.

For the control of the prototype it was used the S7-200 (Programmable Logic Controller) with a CPU 224 DC / DC / DC, a signal 4 to 20 [mA], for which control algorithms were designed with PID routines.

The handling of the prototype was implemented in Intouch HMI software, with windows that let you interact according to the needs.

For the overall management of the prototype and its communication, in order to perform data acquisition in each of the tests, are used together as a group of programs: Intouch 10, STEP 7 MicroWIN SP7 4, EX5 and S7 KEPServer -200 V1.02 PC Access. In performance tests were determined optimal parameters (gain = 7.5, integration time = 0.21 min, derivative time = 0 and sampling time = 0.1 sec.) The control level yielded

satisfactory results before the calibration of the controller was completed. For the range from 0 to 100 mm it was obtained a reaction time of 1 minute 25 seconds to fully stabilize, the error in the setpoint level was 0.5 mm. For a second segment taken from 390 to 500 mm it was obtained a reaction time of 1 minute for a successful stabilization and the maximum error in the setpoint level was 2.6 mm. The PID flow control has the following settings (gain = 0.8, Integration Time = 0.02, Derivation time = 0 and sampling time = 0.1 seconds). For the range from 0 to 15 liters per minute it yielded a stabilization time of 40 seconds, while the accuracy of the transmitter is 1.5%.

In addition it was programmed a third PID to dosage volume of water by counting the volume that pass through the flow meter. The following settings were obtained (gain = 0.8, Integration Time = 0.02, Derivation time = 0 and sampling time = 0.1 seconds). For a volume of 4 liters it was obtained a reaction time of 16 seconds, while the error was 0.032 liters.

PRESENTACIÓN

Nuestro proyecto tiene como objetivo el diseño e implementación de un prototipo comandado mediante un PLC, para controlar nivel y caudal. Y además con la ayuda de un Interfaz Hombre – Máquina (HMI), visualizar como se comporta el sistema.

El presente proyecto está estructurado como se indica a continuación:

En el capítulo 1 se encuentra detallada la base teórica sobre líquidos y sus propiedades así como las diferentes técnicas para medir tanto nivel como también caudal, además cada uno de los instrumentos existentes con sus principios de funcionamiento y sus diferentes aplicaciones. Se habla sobre temperatura y tipos de termómetros. También se hace mención a conceptos generales sobre bombas y su clasificación, características y aplicaciones, así como también lo que tiene que ver con lo correspondiente a válvulas para el control de líquidos.

Se ha mencionan conceptos generales sobre tipos de control de variables, sobre los PLC's y sus características. También sobre variadores de velocidad sus principios, características, clasificación y razones para su utilización.

Finalmente en este capítulo se exponen conceptos generales sobre las interfaces Hombre-Máquina (HMI) y se presenta una breve descripción del prototipo a construir.

El capítulo 2 contiene el diseño y construcción del prototipo. Se hace un estudio más detallado de los instrumentos a utilizar y se fundamenta el por qué de su utilización y las bondades que ofrece para el sistema. Además se incluyen diagramas de conexiones eléctricas y el montaje del sistema de tuberías.

El capítulo 3 contiene el desarrollo del software implementado detalle a detalle, dando además una breve explicación sobre los diferentes programas utilizados para este lograr este propósito, sobre la configuración entre ellos para una correcta comunicación y, especialmente la programación del HMI. También se muestra explicativamente los diagramas de flujo de cada programa desarrollado.

El capítulo 4 corresponde a las pruebas y los resultados obtenidos cuando el prototipo entra en funcionamiento y al ser controlado el sistema con el HMI diseñado en Intouch.

Se realizaron tres tipos de pruebas: una de nivel con sus respectivas variaciones de perturbación, una de caudal y una última de dosificación aprovechando el sensor de caudal.

Finalmente, se mencionan las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron a lo largo del proyecto.

CAPITULO I

MEDICIÓN Y CONTROL DE NIVEL Y CAUDAL

1.1 Conceptos Básicos de los líquidos

Una sustancia existe en tres estados de agregación: sólido, líquido y gas, la fase líquida es el estado intermedio entre sólido y gas. Una sustancia en estado líquido es un fluido que posee un volumen constante a presión y temperatura constantes, su forma natural es esférica pero por la acción de la gravedad el líquido adopta la forma del elemento que lo contiene a más de que forma una superficie libre en el contenedor.

“En los líquidos los grupos de moléculas se mueven unos con respecto a otros. Pero el volumen se mantiene relativamente constante debido a las fuerzas de cohesión entre ellas. Las distancias entre moléculas son constantes en un margen estrecho”.¹

Los líquidos tienden a expandirse cuando sufren un aumento en su temperatura, y si sobrepasa su punto de ebullición cambia a estado gaseoso, por el contrario si experimenta una disminución en su temperatura tiende a comprimirse, y cuando alcanza su punto de congelación cambia a estado sólido.

“Todo líquido presenta tensión superficial y capilaridad, cuando un objeto es inmerso en un líquido este experimenta un fenómeno conocido como flotabilidad”.²

1.1.1 Propiedades de los líquidos

1.1.1.1 Flujo

Se considera flujo al movimiento de un fluido y se lo define como el paso de un fluido por unidad de superficie en una unidad de tiempo.

1.1.1.1.1 Flujo Laminar

¹ YUNUS A. CENGEL, JOHN M. CIMBALA. *Mecánica de fluidos* 2009.

² YUNUS A. CENGEL, JOHN M. CIMBALA. *Mecánica de fluidos* 2009-

En el flujo laminar, partículas fluyen en orden a lo largo de trayectorias, y la cantidad de movimiento y la energía se transfieren a través de líneas de corriente mediante difusión molecular. El fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse.

1.1.1.1.2 Flujo Turbulento

El flujo turbulento se caracteriza por fluctuaciones aleatorias y rápidas de regiones giratorias de fluido, llamadas remolinos (remolinos aperiódicos) a través del flujo.

Como resultado el flujo turbulento está relacionado con valores mucho más altos de coeficientes de fricción, transferencia de calor y transferencia de masa.

1.1.1.2 Compresión y Expansión

A los líquidos se los considera como sustancias incompresibles debido a que su densidad permanece aproximadamente constante a lo largo de todo el flujo, además que dentro del fluido existen fuerzas extremas de atracción entre sus moléculas, razón por la cual las moléculas tienen poco espacio entre sí, esto explica el porqué cuando a un líquido se le aplica una presión su volumen no se ve afectado en gran cantidad. Por otra parte si se le aplica un cambio de temperatura su volumen no sufrirá cambios considerables.

1.1.1.3 Forma y Volumen

Las fuerzas de atracción que actúan sobre las moléculas de los líquidos son suficientemente agudas para poder limitarlas en su movimiento dentro de un volumen definido, a pesar de esto las moléculas no logran guardar un estado fijo, lo cual indica que las moléculas no permanecen constantes en una sola posición. Las moléculas pueden moverse libremente unas alrededor de otras dentro de los límites del volumen del líquido, esto es lo que hace posible que los líquidos fluyan, debido a esta capacidad de fluir los líquidos adoptan la forma del contorno del recipiente que lo contiene aún cuando posea un volumen definido.

1.1.1.4 Viscosidad

La viscosidad se debe a la fuerza de fricción interna que se desarrolla entre las diferentes capas de los fluidos a medida que se produce movimiento uno con respecto al otro, entonces se puede decir que la resistencia a fluir se conoce como viscosidad. Un líquido es más viscoso cuanto menor es su fluidez.

“La viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia a la deformación”.³

La viscosidad en los líquidos depende tanto de la temperatura como de la presión, la dependencia con la presión es débil lo que no sucede con la temperatura ya que con una mayor temperatura la viscosidad decrece y por ende la fluidez aumenta.

1.1.1.5 Fluidez

Se conoce con el nombre de fluidez a la capacidad que poseen tanto líquidos así como gases para progresivamente desplazarse hacia un lugar o pasar a través de orificios pequeños, esto gracias a la capacidad de las partículas para moverse.

1.1.1.6 Difusión

Al mezclar dos líquidos, las moléculas de uno de ellos se difunde en todas las moléculas del otro líquido con una velocidad bastante menor en comparación con los gases. La difusión puede visualizarse dejando caer una pequeña cantidad de tinta en un poco de agua. Las moléculas en ambos líquidos se encuentran muy cerca lo cual causa que cada molécula sufra innumerable número de choques antes de alejarse, la distancia promedio que se genera en los choques se llama trayectoria libre media y en los líquidos es mucho más corta que en los gases. En los líquidos se producen constantemente interrupciones en las trayectorias moleculares, razón por la cual los líquidos se difunden mucho más lentamente que los gases.

³ YUNUS A. CENGEL, JOHN M. CIMBALA. *Mecánica de fluidos* 2009.

1.1.1.7 Tensión Superficial y Efecto de Capilaridad

En un líquido la tensión puede definirse como la cantidad de energía que este necesita para aumentar su superficie por unidad de de área. Esta es una expresión de las fuerzas de atracción moleculares de los líquidos. La fuerza de tracción causa que la superficie actúe como una membrana elástica sometida a tensión, lo cual permite que algunos insectos puedan desplazarse por la superficie del líquido sin hundirse.

El efecto de la capilaridad no es más que el ascenso o descenso de un líquido en un tubo de diámetro pequeño insertado en un líquido, la fuerza de tensión superficial actúa hacia arriba sobre el agua en un tubo de vidrio, a lo largo de toda la circunferencia, esto tiende a jalar al agua hacia arriba, estos tubos angostos son llamados capilares.

1.1.1.8 Densidad

1.1.1.8.1 Densidad absoluta

A la densidad absoluta se la conoce también como densidad real, se define como masa por unidad de volumen. Si en cualquier circunstancia no se hace ninguna aclaración acerca del tipo de densidad, se asumirá que se está tratando con densidad absoluta.

1.1.1.8.2 Densidad relativa

Se conoce como densidad relativa o aparente a la relación producida entre la densidad de una sustancia y la densidad del agua, dando como resultado una magnitud adimensional.

1.1.1.9 Presión

A la presión se la puede definir como la fuerza normal ejercida por un fluido por unidad de área, se habla de presión solo cuando se trata de un gas o un líquido.

“La presión en el Sistema Internacional de Unidades se mide en newton por metro cuadrado, esta unidad originada se llama pascal (Pa)”.⁴

1.1.1.9.1 Presión Absoluta y Presión de Vacío

Al hablar de presión absoluta hacemos referencia a la presión real que existe en un determinado lugar, es decir a la suma de la presión atmosférica local más la medida de la presión manométrica.

Para medir esta presión se toma como referencia el cero absoluto (vacío absoluto) y la presión atmosférica local siendo esta última la más usual, la mayoría de los equipos utilizados para medir presión se calibran para que den una lectura de cero en la atmósfera.

Cuando tenemos una presión por abajo de la presión atmosférica local se dice que esta es una presión de vacío, esta es medida con instrumentos de vacío los cuales indican la diferencia entre la presión atmosférica y la absoluta.

Tanto la presión absoluta así como la manométrica y la de vacío son todas cantidades positivas y se encuentran relacionadas mediante las siguientes expresiones:

(Ec. 1.1)

(Ec. 1.2)

donde, en unidades del Sistema Internacional:

es la presión absoluta (Pa).

es la presión atmosférica (Pa).

es la presión manométrica (Pa).

es la presión manométrica (Pa).

⁴ VALLEJO ZAMBRANO

1.1.1.9.2 Presión Manométrica

Cuando tenemos un espacio cerrado comúnmente un recipiente de cualquier tamaño, dentro de este se genera una nueva presión diferente a la atmosférica, esta presión es la llamada presión manométrica debido a que los instrumentos utilizados para su medición se llaman manómetros. Su valor es igual a la diferencia entre el valor de la presión absoluta y el de la presión atmosférica del lugar. Las relaciones entre las presiones se ilustran en la figura 1.1.

(Ec. 1.3)

1.1.1.9.3 Presión Atmosférica

La tierra posee una capa de aire que la rodea por completo esta capa se llama atmosfera y ejerce una presión en todas las direcciones sobre cualquier punto dentro de ella. Esta presión es igual al peso de la columna de aire que exista sobre ese punto.

“Debido a que la presión atmosférica depende del peso de la columna de aire, esta será muy variable de acuerdo a la altitud del lugar donde sea medida”.⁵ Generalmente la presión atmosférica va disminuyendo mientras vaya incrementándose la altura.

Esta presión es medida mediante un aparato llamado barómetro razón por la cual se la conoce también como presión barométrica, en el barómetro generalmente se utiliza mercurio como fluido y se utiliza la siguiente expresión para determinar el valor de presión:

(Ec. 1.4)

donde, utilizando unidades del SI:

es la presión atmosférica (Pa).

⁵ VALLEJO ZAMBRANO

es la densidad ().

es la aceleración gravitacional local ().

es la altura de la columna por arriba de la superficie ().

1.1.1.9.4 Presión Hidrostática

La presión hidrostática se debe al peso de un fluido en reposo, cuando un fluido se encuentra en estado de reposo la única presión existente es la hidrostática. La velocidad que posee un fluido en movimiento da lugar a que pueda aparecer una presión hidrodinámica.

Un fluido contenido en un recipiente ejerce presión sobre todas las paredes del mismo y sobre la superficie de cualquier objeto que se sumerja en él. Esta presión llamada presión hidrostática ejerce una fuerza perpendicular a las paredes del recipiente o a la superficie del objeto sumergido esto sin importar la orientación que adopten las superficies, las fuerzas resultantes de las presiones no serían necesariamente perpendiculares a las superficies si el líquido se encontraría fluyendo.

Esta presión depende de la densidad del líquido con el cual se esté tratando así como también de la altura a la que esté sumergido el cuerpo y se la puede calcular mediante la siguiente expresión:

(Ec. 1.5)

donde, utilizando unidades del SI:

es la presión hidrostática (Pa).

es la densidad del líquido (Kg/m^3).

es la aceleración de la gravedad (m/s^2).

es la altura del fluido (m).

es la presión atmosférica (Pa).

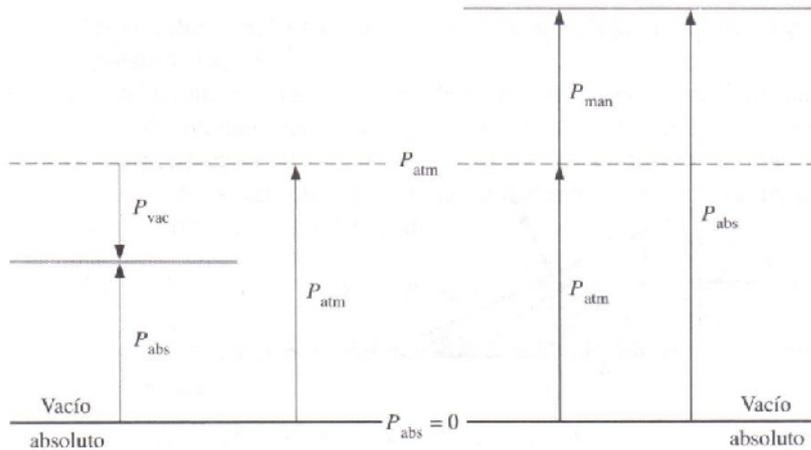


Figura 1.1: Relación de Presiones

1.1.1.10 Cavitación

El fenómeno de la cavitación consiste en la formación de burbujas de aire en la tubería por donde se transporta el fluido debido a los cambios de dirección del flujo (codos, válvulas, etc.) Esto es producido al ser forzada una corriente a cambiar de dirección, donde la reducción en la presión interna hace que los gases disueltos se expandan y se generen presiones negativas, formando así una cavidad entre la superficie aguas abajo de un cuerpo móvil y el líquido con el cual está en contacto.

La cavitación generalmente causa el desgaste de la estructura hidráulica afectada, debido a que estas burbujas son arrastradas por la corriente y al chocar con la superficie del tubo se produce la explosión de la burbuja y es esta presión liberada la que afecta a la superficie. “La cavitación ocurre cuando la presión en la corriente del flujo alcanza la presión de vapor de agua”.⁶

1.2 Medición de Nivel de Líquidos

La industria, especialmente aquella que trabaja con líquidos realiza procesos en los cuales la medición y el control de nivel es de vital importancia y mucho más cuando se pretende tener una producción continua, cuando se desea mantener

⁶ YUNUS A. CENGEL, JOHN M. CIMBALA. 2009. Mecánica de fluidos

constante una presión hidrostática, cuando un existen procesos en los cuales se requiere de control y medición de volúmenes de líquidos o bien en el caso más simple, para evitar que un líquido se derrame del recipiente que lo contiene.

Para medir nivel en un líquido se determina la distancia existente entre una línea de referencia y la superficie del fluido y generalmente dicha línea de referencia se toma como el fondo del recipiente, en consecuencia, los medidores de nivel podrían tener sus escalas directamente en unidades de longitud, de masa, de peso o de volumen.

Parecería sencilla la medición de nivel de líquidos dentro de un recipiente, pero existen varios factores que pueden complicar la medición en ciertos casos, se debe tomar muy en cuenta que tipo de sustancia es la que se va a manejar si es corrosiva, abrasiva o radioactivo, que viscosidad tiene además de aspectos relacionados con el recipiente como es la presión ya que puede ser este presurizado o no y finalmente el tipo de medición deseada; todos estos aspectos traen como consecuencia que existan varios métodos y tipos de instrumentos medidores del nivel.

Para seleccionar el medidor de nivel más adecuado se tomará en cuenta las necesidades y condiciones de operación. Los métodos utilizados para la medición del nivel de líquidos básicamente pueden ser clasificados en: Métodos de medición directa e indirecta; pero también podemos tener otros métodos.

1.2.1 Métodos de Medición de Nivel de Líquidos

Los métodos de medición de nivel de líquidos son:

- Métodos de medición directa.
- Métodos de medición indirecta.
- Métodos de medición por las características eléctricas del líquido.

1.2.1.1 Métodos de medición directa

Los métodos de medición directa de nivel son:

- Método de medición por sonda.
- Método de medición por aforación o conocido también como cinta y plomada.
- Método de medición por indicador o nivel de cristal.
- Método de medición flotador-boya.

1.2.1.1.1 Método de medición por sonda (o varilla)

Básicamente consiste en una varilla o regla graduada, cuya longitud deberá ser conveniente para introducirla dentro del depósito. La determinación del nivel se efectúa directamente por la lectura de la longitud mojada por el líquido. Al momento de realizar la lectura el tanque debe estar abierto a la atmósfera es decir que el líquido estará a presión atmosférica. Se emplea en tanques de agua, fuel oil o gasolina abiertos, como se indica en la figura 1.2.

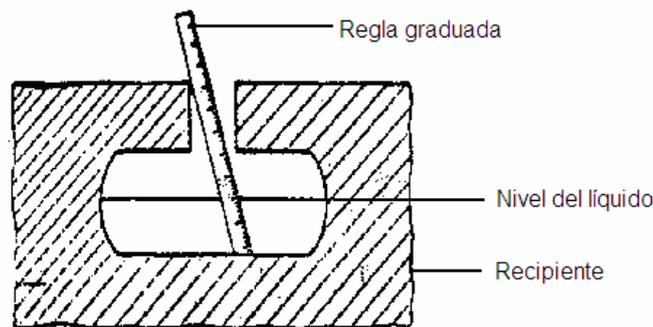


Figura 1.2: Medición por sonda

1.2.1.1.2 Método de medición por aforación (o cinta y plomada)

Este método es empleado para medir el nivel cuando es difícil que la varilla tenga acceso al fondo del tanque.

El instrumento está compuesto por tres partes principales que son: el carrete, la cinta graduada y un peso o plomada, como se muestra en la figura 1.3. La plomada sirve para que se mantenga la cinta tensa al penetrar en el líquido, para medir el nivel se deja que la cinta baje lentamente hasta que la plomada toque el fondo del recipiente. “Una vez que la plomada toca el fondo se empieza a recoger la cinta con el carrete, hasta que aparezca la parte donde el líquido ha dejado la marca que indica su nivel”.⁷

También se usa midiendo la distancia desde la superficie del líquido hasta la parte superior del tanque, obteniendo el nivel por diferencia.

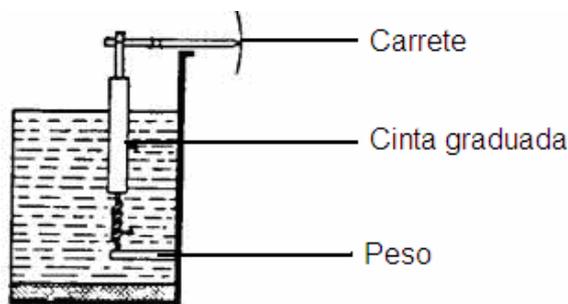


Figura 1.3: Medición por Aforación

1.2.1.1.3 Método de medición por indicador de cristal

Este método consiste en un tubo de vidrio en el caso del indicador de bajas presiones hasta de 7 bar y de un vidrio plano (de sección rectangular) protegido por una armadura metálica en el caso del indicador para altas presiones, con su extremo inferior conectado al tanque generalmente mediante tres válvulas (dos de cierre de seguridad en los extremos del tubo, las cuales se utilizan para sacar de servicio el indicador sin necesidad de parar el proceso además de impedir el escape del líquido en caso de rotura del cristal y una de purga). Funciona por principio de vasos comunicantes. El nivel de vidrio va acompañado de una regla graduada.

⁷ <http://proton.ucting.udg>

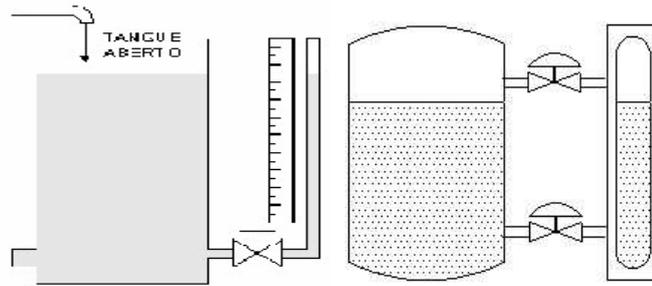


Figura 1.4: Medidor de nivel de cristal

1.2.1.1.4 Método de medición flotador-boya

Este método consiste en un flotador ubicado en el seno del líquido y conectado al exterior del tanque, indicando directamente el nivel sobre una escala graduada. Es el método más antiguo y el más usado en tanques de capacidad grande abiertos y cerrados a presión o a vacío, y son independientes del peso específico del líquido. Tiene el inconveniente de que las partes móviles están expuestas al fluido y pueden romperse.

Los instrumentos que utilizan un flotador-boya no dependen de la presión estática para medir el nivel de líquidos. Pero de todos modos se debe tomar en cuenta a la presión estática para proyectar el flotador, ya que siendo éste hueco, ha de construirse lo suficientemente robusto como para soportarla sin deformarse, además los tubos guía muy largos pueden dañarse ante olas bruscas en la superficie del líquido o ante la caída violenta del líquido en el tanque.

Es importante mantener limpios de forma permanente tanto el flotador así como el tubo guía, ya que puede darse un eventual depósito de los sólidos o cristales que el líquido pueda contener lo cual provocaría que el flotador se trabe. El material del flotador debe ser más liviano que el fluido, esto permitirá que siga el movimiento del nivel de líquido.

El flotador puede tener formas muy variadas y estar formado por materiales muy diversos según sea el tipo de fluido. Los instrumentos de flotador tienen una precisión de 0,5 %.

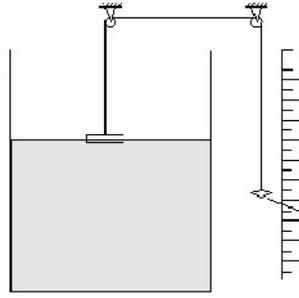


Figura 1.5: Medidor de flotador

1.2.1.2 Métodos de medición indirecta

Los métodos de medición indirecta son:

- Método de medidores actuados por desplazadores.
- Método de medidores actuados por presión hidrostática.

1.2.1.2.1 Método de medidores actuados por desplazadores.

Este método de medidores de nivel por desplazamiento está basado en el principio de Arquímedes. Básicamente está compuesto por un flotador parcialmente sumergido en el líquido y conectado mediante un brazo a un tubo de torsión, unido al tanque. En el interior del tubo y unido a su extremo libre se encuentra una varilla que transmite el movimiento de giro a un transmisor que se encuentra fuera del tanque.

“El ángulo de rotación del extremo libre del tubo de torsión es función directa de la fuerza aplicada”.⁸ Al subir el nivel, el líquido ejerce un empuje sobre el flotador igual al volumen de la parte sumergida multiplicada por la densidad del líquido, tendiendo a neutralizar su peso propio, así que el esfuerzo medido por el tubo de torsión será muy pequeño.

⁸ VILLALOBOS Gustavo, RICO Raúl, ORTIZ Fernando, MONTÚFAR Marcela. *Medición y control de procesos industriales*. Instituto Politécnico Nacional– México, 2006

Basados en esto podemos resumir lo siguiente: el peso del desplazador ejerce una fuerza sobre el tubo de torsión, pero al subir el nivel, el desplazador desplaza más líquido y éste ejercerá una fuerza o empuje sobre el desplazador el cual se vuelve más liviano. Esto trae como consecuencia que el tubo de torsión gire debido a la disminución de la torsión que el desplazador ejerce sobre él. Este giro es aprovechado acoplándose una aguja, la cual indicará el nivel directamente.

Este instrumento puede ser utilizado en tanques abiertos y cerrados, a presión o a vacío, con una buena sensibilidad, pero existe el riesgo que se presenten depósitos de sólidos o crecimiento de cristales en el flotador, este constituye un grave inconveniente ya que afectan a la precisión de la medida.

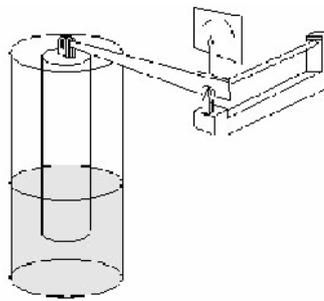


Figura 1.6: Medidor por desplazamiento

1.2.1.2.2 Método de medidores actuados por presión hidrostática

Mediante una fórmula matemática se establece que la presión en cualquier punto debajo de la superficie de un líquido depende solamente de la profundidad a la que se encuentre el punto en cuestión y del peso específico del líquido, es decir, que . La figura 1.7 muestra este tipo de medidor.

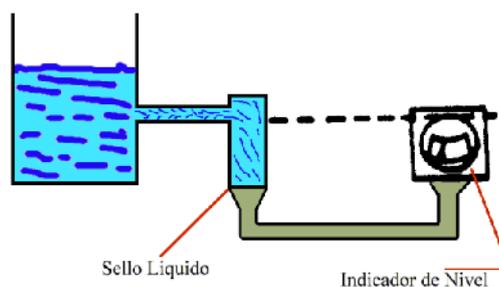


Figura 1.7: Medidor Actuado Por Presión Hidrostática

Existen varios tipos de medidores de nivel que trabajan y operan bajo este principio, de los cuales los más comunes son:

- Sistema básico o Manómetro.
- Método de diafragma-caja.
- Método de presión diferencial.

1.2.1.2.2.1 Sistema básico o Manómetro

Este sistema es el más sencillo, consiste solamente de un manómetro conectado directamente a la parte inferior del tanque, y en el caso de que el líquido cuyo nivel se desea medir sea corrosivo o viscoso, es necesario, además del manómetro, un equipo de sello con la finalidad de aislar el instrumento de dicho fluido ya que pueden hacer perder la elasticidad del fuelle.

El manómetro mide la presión debida a la altura de líquido que existe entre el nivel del tanque y el eje del instrumento. La medición está limitada a tanques abiertos y el nivel viene influido por las variaciones de densidad del líquido.

El manómetro puede ser uno convencional, con la diferencia de que la escala en lugar de ser graduada en unidades de presión, es graduada en unidades de nivel.

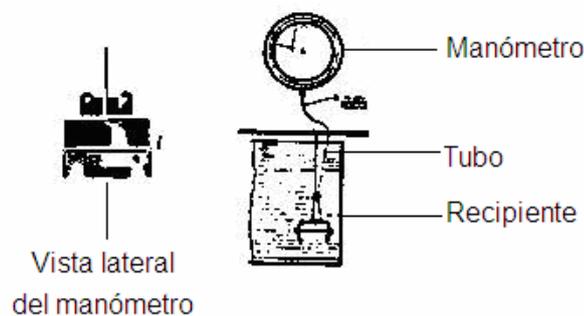


Figura 1.8: Manómetro

1.2.1.2.2.2 Método de diafragma-caja

Este método consiste en sumergir la caja en el líquido que se va a medir y un capilar lleno de aire se extiende desde ella hasta el instrumento receptor. La deflexión del diafragma, que se produce por la altura del líquido, provoca que el aire que contiene el capilar se comprima. “El instrumento que recibe el aire del capilar responde indicando la altura del líquido que está ejerciendo presión en el diafragma. La caja se construye en dos secciones, entre estas está colocado el diafragma de caucho o de una composición sintética resistente al aceite”.⁹

El instrumento es delicado ya que una fuga del aire contenido en el diafragma destruiría la calibración del instrumento.

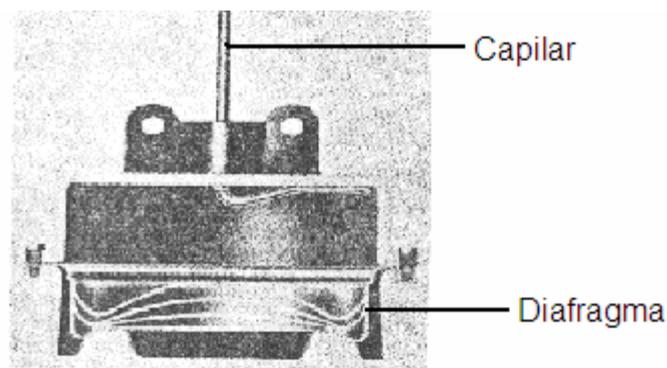


Figura 1.9: Medidor Diafragma – Caja

1.2.1.2.2.3 Método de presión diferencial

Al medir nivel en tanques al vacío o bajo presión se utilizan los medidores basados en presión diferencial. El medidor de presión diferencial consiste en un diafragma en contacto con el líquido del tanque, que permite medir la presión hidrostática en un punto del fondo del tanque. En un tanque abierto esta presión es proporcional a la altura del líquido en ese punto y a su peso específico. El diafragma forma parte de un transmisor neumático o electrónico de presión diferencial.

⁹ <http://www.monografias.com/trabajos11/valvus>

Existe una diferencia con los mencionados anteriormente, ya que este dará una lectura inversa, es decir cuando señale un cero de presión, se leerá un máximo de nivel.

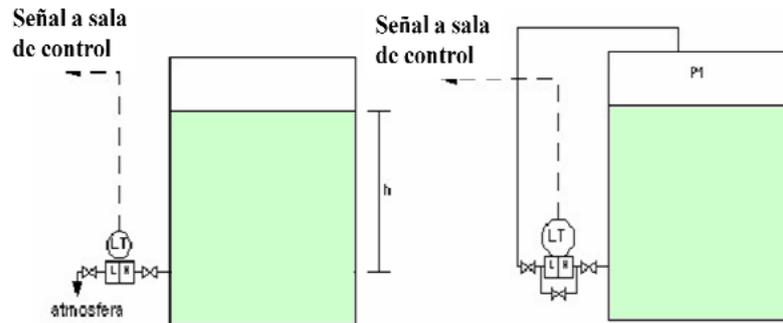


Figura 1.10: Medidor de presión diferencial de diafragma

1.2.1.3 Métodos de medición por las características eléctricas del líquido

Los métodos de medición de nivel por las características eléctricas del líquido son:

- Método Conductivo.
- Método Capacitivo.
- Método Ultrasónico.

1.2.1.3.1 Método Conductivo

Existen líquidos conductores de electricidad, para los cuales la medición de nivel se la puede realizar mediante un medidor de nivel conductivo que consiste en uno o varios electrodos y un relé eléctrico o electrónico que es excitado cuando el líquido moja a dichos electrodos.

Se tiene un electrodo de referencia que cierra el circuito con el electrodo colocado a la altura requerida en el instante que entra en contacto con el líquido, este debe

ser lo suficientemente conductor como para excitar el circuito electrónico. El relé electrónico dispone de un temporizador de retardo que impide su enclavamiento ante una ola del nivel del líquido o ante cualquier perturbación momentánea o bien en su lugar se disponen dos electrodos poco separados enclavados eléctricamente en el circuito. Si el tanque es metálico, puede usarse su pared en lugar del electrodo de referencia.

Dicho instrumento puede utilizarse con diferentes propósitos: alarmas, control de nivel alto y bajo, arranques de motores o paradas de los mismos. Es versátil, sin partes móviles, su campo de acción es grande con la limitación física de la longitud de los electrodos. “El líquido debe tener un mínimo de conductividad y la corriente generada debe ser baja para evitar el deterioro de los electrodos”.¹⁰

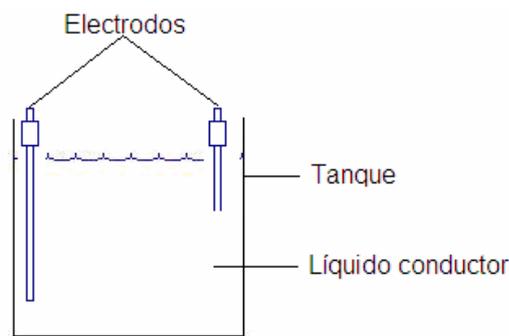


Figura 1.11: Método Conductivo

1.2.1.3.2 Método Capacitivo

Este método utiliza electrodos sumergidos en el líquido formando un condensador entre los electrodos y las paredes del tanque, es la capacidad de este condensador la que se mide, la capacidad del conjunto depende linealmente del nivel del líquido, las variaciones del dieléctrico entre ellos, debidas a la subida o bajada del nivel, provocan cambios en la capacidad entre los mismos. Dicha variación en la capacidad se usa para determinar el nivel del líquido en un tanque.

¹⁰ <http://www.monografias.com/trabajos11/valvus>

Cuando tenemos fluidos no conductores se emplea un electrodo normal y la capacidad total del sistema se compone de la del líquido, la del gas superior y la de las conexiones superiores. En fluidos conductores el electrodo está aislado usualmente con teflón interviniendo las capacidades adicionales entre el material aislante y el electrodo en la zona del líquido y del gas.

Este método es aplicable a muchas clases de líquidos más no en los que poseen sólidos conductores en suspensión, ya que se producen cambios en la constante dieléctrica, ocasionando un porcentaje de error en la medición.

Las características principales que poseen los sensores que trabajan bajo este principio es la de no tener partes móviles, son ligeros, resisten la corrosión pero su constante dieléctrica puede verse afectada por la acción de la temperatura.

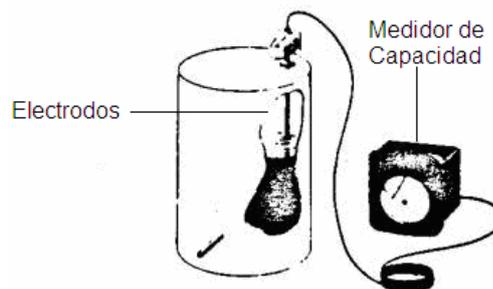


Figura 1.12: Método Capacitivo

1.2.1.3.3 Método Ultrasónico

Este último método está basado en la emisión de un impulso de ultrasonido hacia una superficie reflectante y la recepción del eco del mismo en un receptor. El tiempo que se demore en la captación del eco depende del nivel del líquido.

Los sensores que trabajan bajo este principio operan a una frecuencia de unos 20KHz y pueden estar en contacto con el líquido o montados en el exterior del tanque de donde se hará la medición; este último tipo no es aplicable en algunas instalaciones o su uso puede quedar limitado por las características del líquido

(como la densidad) en el cual se va a determinar el nivel. Se usan para medir nivel en forma continua o discreta; su precisión es del orden de ± 1 a 3%, en la figura 1.13 se puede visualizar este tipo de medidor.

Las ondas emitidas atraviesan el medio ambiente de gases o vapores con cierto amortiguamiento para reflejarse en la superficie del sólido o del líquido, pueden dar señales erróneas cuando la superficie del nivel del líquido no es nítida (por ejemplo: líquido que forme espuma), ya que se crean falsos ecos de los ultrasonidos.

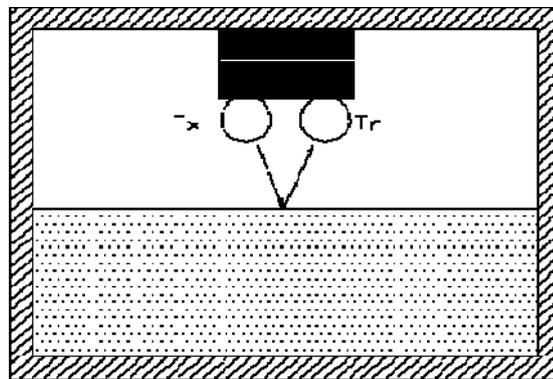


Figura 1.13: Medidor ultrasónico

1.3 Medición de Caudal de Líquidos

La medición del caudal de líquidos en muchas de las industrias es tan necesaria e indispensable para ciertos procesos, en los cuales el objetivo principal es el de obtener un producto por medio de dosificaciones específicas de varios subproductos. La capacidad de realizar mediciones precisas del caudal es tan importante que puede hacer la diferencia entre obtener beneficios o tener pérdidas.

Se han diseñado varios tipos de instrumentos para medir el flujo o caudal de líquidos, estos instrumentos son conocidos como caudalímetros o también como flujómetros, el caudal se determina mediante la medición de la velocidad del

líquido o mediante el cambio en la energía cinética. La velocidad depende de la presión diferencial que está obligando a que el líquido circule a través de un tubo o conducto. Debido a que la sección transversal de la cañería conocida y se mantiene constante, el promedio de velocidad es una indicación de la velocidad de flujo. En consecuencia, la medición del caudal por lo general se realiza cuando se mide la velocidad de flujo, y la mayoría de los flujómetros simplemente son velocímetros que se usan con el propósito de medir flujo.

La relación básica para la determinación del caudal del líquido en estos casos es:

(Ec. 1.6)

donde:

es el flujo de líquido a través de la tubería (m^3 / s).

es la velocidad promedio del flujo (m / s).

es la sección transversal de la tubería (m^2).

Otros factores que afectan el caudal del líquido son la viscosidad y la densidad, y la fricción del líquido en contacto con la tubería.

En una tubería la velocidad varía de cero en la pared a un máximo en el centro. Se debe prestar atención cuando se toman mediciones de velocidad, al igual que el tipo de flujo que se tiene, ya que la velocidad no será la misma en un flujo laminar que en un flujo turbulento donde puede ser necesario tomar varias medidas para sacar un promedio ponderado.

1.3.1 Número de Reynolds

Existen varios factores que influyen en la transición de flujo laminar a turbulento entre los cuales podemos considerar la geometría, la rugosidad de la superficie, la velocidad del flujo, la temperatura de la superficie, el tipo de fluido, entre otros. “El régimen de flujo depende del cociente entre fuerzas inerciales y fuerzas

viscosas o de arrastre del mismo”¹¹; a este cociente se lo conoce como el Número de Reynolds, que también influye en el desempeño de los flujómetros y se expresa mediante la siguiente expresión:

$$\text{Ec. 1.7}$$

donde:

es el Número de Reynolds (adimensional).

es la velocidad de Flujo promedio (m/s).

es la longitud característica de la geometría, diámetro (m).

es la viscosidad cinemática del fluido (m²/s).

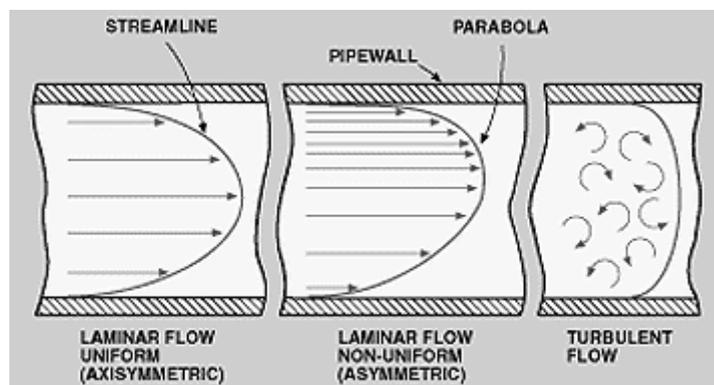


Figura 1.14: Flujo laminar y turbulento de dos tipos que normalmente se encuentran en las operaciones de medición de caudal de líquidos.

En la mayoría de las aplicaciones industriales y a nivel de laboratorio tenemos un flujo turbulento, con valores de R superiores o iguales a 4000. Los líquidos viscosos generalmente presentan flujo laminar, con valores de R por debajo o

¹¹ CENGEL Yunus A, JOHN M. CIMBALA. *Mecánica de fluidos* 2009.

iguales a los 2300, y cuando se encuentran en transición presentar un valor intermedio entre los dos anteriores, se puede expresar de la siguiente manera:

Para determinar con exactitud el Número de Reynolds en la zona de transición entre los dos niveles laminar y turbulento se emplea la siguiente expresión:

(Ec. 1.8)

donde:

es el Número de Reynolds (adimensional).

es el caudal del líquido (g.p.m).

es la densidad Relativa del líquido (adimensional).

es el diámetro interior de la tubería (pulg).

es la viscosidad del líquido (cp).

Las fuerzas inerciales están representadas por el caudal y el peso específico, mientras que el diámetro de la tubería y la viscosidad representan las fuerzas de arrastre, en la mayoría de aplicaciones el diámetro de la tubería y la densidad permanecen constantes.

A muy bajas velocidades o a altas viscosidades, Re es bajo, y el líquido fluye en buenas capas con la mayor velocidad en el centro de la tubería y con menores velocidades en la pared de la tubería donde las fuerzas viscosas restringen la circulación, constituyéndose así en un flujo laminar. Una de las características del flujo laminar es la forma parabólica de la velocidad de contorno.

En la práctica, la mayoría de las aplicaciones implican un flujo turbulento, con valores de Re altos. Este flujo turbulento se produce a altas velocidades o a bajas viscosidades. El flujo se rompe en remolinos turbulentos que fluyen a través de la tubería con la misma velocidad promedio. La velocidad del fluido es menos

importante y la velocidad de contorno es mucho más uniforme en su forma. Existe una zona de transición entre las corrientes turbulentas y laminar. Dependiendo de la configuración de las tuberías y otras condiciones de instalación, el flujo puede ser turbulento o laminar en esta zona.

1.3.2 Tipos de Medidores de Caudal

Actualmente existen numerosos tipos de instrumentos que se pueden utilizar en tuberías cerradas. Generalmente se los puede clasificar en los siguientes tipos:

- Medidores de presión diferencial.
- Medidores de desplazamiento positivo.
- Medidores de velocidad.
- Medidores de masa.

A continuación realizamos una breve descripción de los diferentes equipos utilizados para el censo del caudal.

1.3.2.1 Medidores de Presión Diferencial

Entre los dispositivos de presión diferencial podemos encontrar:

- Medidor de placa orificio.
- Medidor de boquilla o tobera de flujo.
- Medidor de tubo Venturi.
- Medidor de tubo Pitot o sonda de Pitot.
- Medidor de sistemas elbow o de codo.
- Medidor de área variable o Rotámetro.

1.3.2.1.1 Medidor de Placa Orificio

Se lo conoce también como uno de los flujómetros de obstrucción ya que como se observa en la figura 1.15 consiste de una placa con un agujero en medio, el

orificio limita el flujo del líquido para producir una diferencia de presión a través de la placa la cual es proporcional al caudal de agua.

Se utiliza con líquidos limpios; algunos líquidos viscosos, es ideal para aplicaciones extremas para medir razones de flujo de gases.

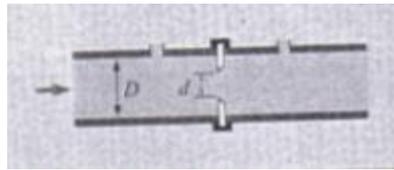


Figura 1.15: Medidor de Placa Orificio

1.3.2.1.2 Medidor de Boquilla o Tobera de Flujo

El funcionamiento es similar a la placa orificio, con la ventaja de que puede medir mayores caudales. En este flujómetro de obstrucción la placa se sustituye por una tobera como se puede ver en la figura 1.16 y, por lo tanto, el flujo en la tobera es continuo. Su sección hidrodinámica evita que se depositen materias sólidas que pudiesen cambiar el perfil de entrada. Por esta razón se la utiliza para líquidos que contengan sedimentos o sustancias sólidas en suspensión.

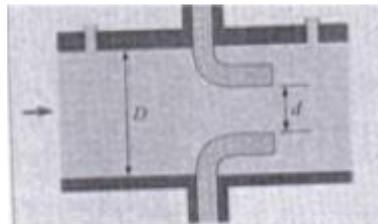


Figura 1.16: Tobera de Flujo

1.3.2.1.3 Medidor de Tubo Venturi

Dentro de este grupo es el flujómetro más preciso, pero también el más caro. Su contracción y expansión graduales forman un tubo cónico con una entrada y una garganta, con lo cual se evita la separación del flujo y los remolinos, y sólo tiene pérdidas de fricción en las superficies de la pared interior.

Cuando el líquido pasa a través de la garganta, su velocidad aumenta, causando un diferencial de presión entre la entrada y salida de las regiones.

Estos medidores son adecuados para utilizarlos con líquidos viscosos, sucios y limpios.

La Industria Automotriz los utiliza en el carburador de los vehículos, el uso de éste se puede observar en lo que es la alimentación de combustible.

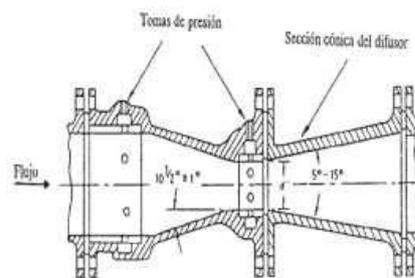


Figura 1.17: Medidor Venturi

1.3.2.1.4 Medidor de Tubo Pitot o sonda de Pitot

Las sondas de Pitot (también llamadas tubos de Pitot) y las sondas de Pitot estáticas (tubos de Prandtl), existen estas dos variantes debido a que la primera solo censa la presión de estancamiento, mientras que la última puede censar al mismo tiempo la presión de estancamiento o impacto y la presión estática.

La sonda consiste como se puede observar en la figura 1.18 de un tubo doble delgado alineado con el flujo y conectado a un medidor de presión diferencial o manómetro. El tubo interior está totalmente abierto al flujo en la boquilla y por lo tanto mide la presión de estancamiento en dicha posición, mientras que el tubo exterior está sellado en la nariz, pero tiene agujeros a los lados de la pared exterior y por lo tanto mide la presión estática.

La velocidad del fluido en la entrada del tubo se hace nula, al ser un punto de estancamiento, convirtiendo su energía cinética en energía de presión, lo que da lugar a un aumento de presión dentro del tubo de Pitot.

Este tipo de medidores son utilizados en tuberías de grandes diámetros con líquidos limpios. Son muy limitados en la industria debido a la facilidad que tienen para ser obstruidos.

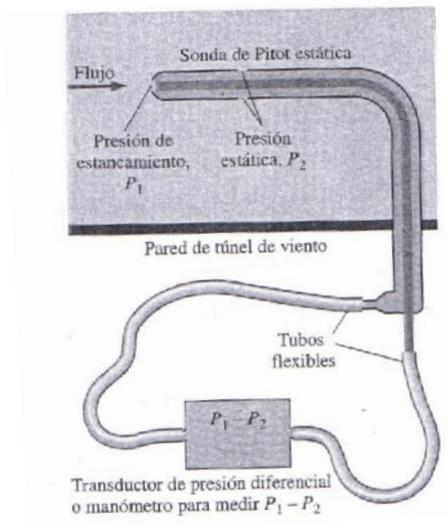


Figura 1.18: Sonda de Pitot Estática

1.3.2.1.5 Medidor de Sistemas Elbow o de Codo

Cuando un fluido circula por el codo de una tubería, está sujeto a una aceleración angular. La fuerza centrífuga resultante crea una presión diferencial entre el radio interior y el radio exterior. La raíz cuadrada de esta presión diferencial es proporcional al caudal.

Debido a que en la mayoría de las configuraciones de tuberías existen codos, se puede instalar en ellos las tomas de presión como se observa en la figura 1.19. Esto nos permite una instalación económica, sin pérdidas de presión, y sin introducir obstrucciones en la línea de flujo.

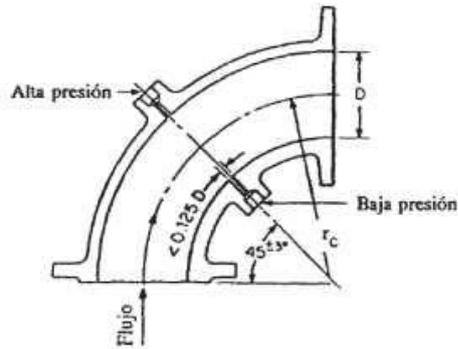


Figura 1.19: Sistemas Elbow o de Codo

1.3.2.1.6 Medidor de Área Variable o Rotámetro

Este medidor es simple, confiable, barato, fácil de instalar con caída de presión baja, no tiene conexiones eléctricas y además proporciona una lectura directa de la razón de flujo para una amplia variedad de líquidos y gases. Consiste en un flotador (indicador) que se mueve libremente dentro de un tubo vertical ligeramente cónico, con el extremo angosto hacia abajo como se muestra en la figura 1.20. El fluido entra por la parte inferior del tubo y hace que el flotador suba hasta una posición donde el peso del flotador, la fuerza de arrastre y la fuerza de flotabilidad se equilibran mutuamente y la fuerza neta que actúa sobre el flotador es cero. La posición del flotador varía directamente con el caudal razón por la cual para determinar el caudal, simplemente se debe igualar la posición del flotador contra la escala de flujo graduada en el exterior del estrecho tubo transparente.

Son utilizados para medir líquidos limpios que no sean tóxicos, de bajos caudales en tuberías de diámetros pequeños. Se los encuentra en la industria química, alimenticia, farmacéutica entre otras.



Figura 1.20: Medidor de Área Variable o Rotámetro

1.3.2.2 Medidores de desplazamiento positivo

En los medidores de desplazamiento positivo se encuentran incluidos:

- Medidor de pistón oscilante.
- Medidor de rueda de paletas.
- Medidor de engranaje oval.

1.3.2.2.1 Medidor de Pistón Oscilante

Tal como se puede observar en la figura 1.21 este medidor consiste básicamente de un pistón hueco montado excéntricamente dentro de un cilindro. Cuando está en funcionamiento, el pistón oscila alrededor de un puente divisor, que separa la entrada de la salida de líquido. Un ciclo de funcionamiento de éste puede describirse desde el instante en que el líquido entra al medidor a través de la puerta de entrada forzando al pistón a moverse hasta que el líquido delante del pistón es forzado a salir a través de la puerta de salida.

Se utilizan, habitualmente, para medidas precisas de pequeños caudales, siendo una de sus aplicaciones en unidades de bombeo de distribución de petróleo.

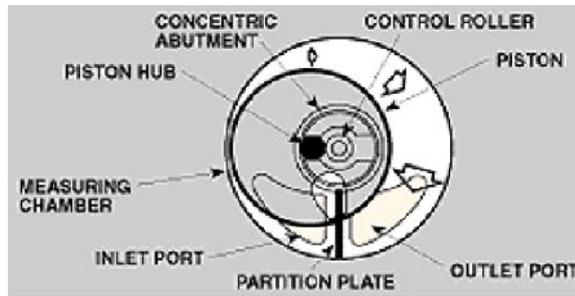


Figura 1.21: Medidor de Pistón Oscilante

1.3.2.2.2 Medidor de Rueda de Paletas

Este medidor consiste en, la rueda (el rotor y las paletas) que esta posicionada de forma perpendicular al flujo como se muestra en la figura 1.22 y un sensor que permite contabilizar los movimientos de las aspas de la rueda.

Estas paletas se encuentran cubriendo únicamente una porción de la sección transversal del flujo (generalmente menos de la mitad) razón por la cual la pérdida de carga es pequeña, pero la profundidad de la inserción de la rueda de paletas en el flujo es de importancia vital para la precisión en la medición. No se necesitan filtros porque las ruedas de paletas no son susceptibles de atascarse. El sensor mencionado anteriormente detecta el paso de cada aspa de la rueda de paletas y trasmite una señal, es un microprocesador el encargado de convertir esta información de velocidad rotacional en razón de flujo o cantidad de flujo integrada.

Se los utiliza comúnmente en aplicaciones con flujos donde no se necesita una muy alta precisión como camiones cisternas para la distribución de combustible para la calefacción.

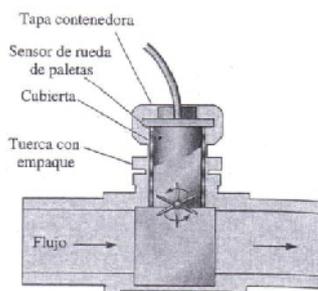


Figura 1.22: Medidor Rueda de Paletas

1.3.2.2.3 Medidor de Engranaje Oval

El dispositivo dispone de dos ruedas ovas que engranan entre sí y tienen un movimiento de giro debido a la presión diferencial creada por el flujo de líquido. La acción del líquido actúa de forma alternativa sobre cada una de las ruedas, dando lugar a un giro suave de un par prácticamente constante. La cantidad de líquido que pasa por el medidor en cada revolución es fija.

Son utilizados en aplicaciones sin suministro de energía eléctrica. Se los puede encontrar en industrias como: alimenticia, química, petroquímica, laboratorios y automotriz.

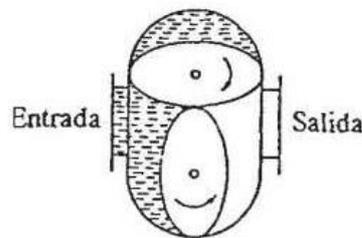


Figura 1.23: Medidor de Engranaje Oval

1.3.2.3 Medidores de velocidad

Dentro de los medidores de velocidad se incluyen:

- Medidor de turbina.
- Medidor tipo Vortex.
- Medidores electromagnéticos.
- Medidores ultrasónicos.

1.3.2.3.1 Medidor de turbina

El medidor de turbina consta de una sección de flujo cilíndrico que contiene una turbina (un rotor con alabes directores) como se muestra en la figura 1.24 que rota con libertad, alabes directores estacionarias adicionales a la entrada que sirven para enderezar el flujo y un sensor que genera un pulso cada vez que es detectado

un punto marcado en la turbina para determinar la razón de rotación, estos pulsos eléctricos pueden ser contados y totalizados. El rotor gira a medida que el líquido pasa a través de las paletas.

“La rapidez rotacional de la turbina es aproximadamente proporcional a la razón de flujo del fluido”¹². Estos tipos de medidores proporcionan resultados precisos (tan precisos como 0.25%) sobre un amplio rango de razones de flujo cuando se calibran adecuadamente para las condiciones de flujo anticipadas.

Son adecuados para grandes flujos y sobrepresiones, altas temperaturas y bajas viscosidades. Se los encuentra en industrias petroleras, petroquímicas, químicas, agua, alimenticia y refresquería.

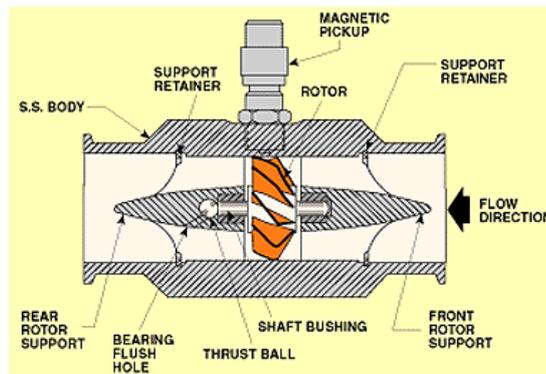


Figura 1.24: Medidor de Turbina

1.3.2.3.2 Medidor tipo Vortex

Basado en el fenómeno natural, que ocurre cuando un líquido fluye en torno a un objeto que se interpone en su trayectoria produciéndose de esta manera remolinos o vórtices. Dichos vórtices se desprenden periódicamente, la frecuencia de los desprendimientos de vórtice es directamente proporcional a la velocidad del líquido que fluye a través del medidor. Esto sugiere que el caudal se puede determinar cuándo se generan vórtices en el flujo cuando se coloca una obstrucción a lo largo del flujo y se mide la frecuencia de derrame.

¹² VILLALOBOS Gustavo, RICO Raúl, ORTIZ Fernando, MONTÚFAR Marcela. *Medición y control de procesos industriales*. Instituto Politécnico Nacional– México, 2006

El medidor de vórtice (Figura 1.25) está constituido por un cuerpo acuñado de bordes agudos colocado en el flujo que sirve como el generador de vórtice, y un detector (como un transductor de presión que registra la oscilación en la presión) colocado a una corta distancia corriente abajo en la superficie interior del revestimiento para medir la frecuencia de derrame. El detector no es más que un sensor de tipo ultrasónico, electrónico o de fibra óptica que monitorea los cambios en el patrón de vórtice y trasmite una señal de salida pulsátil.

No contiene partes móviles y es inherentemente confiable, versátil y tiene una precisión de $\pm 1\%$, pero obstruye el flujo y por lo tanto causa considerable pérdida de carga.

Se utiliza con líquidos limpios de de baja viscosidad y en aplicaciones donde se requiera bajo mantenimiento del sensor.

Encontrados en industrias: automotriz, química, hierro, acero y metales, plantas de energía, petróleo y gas, papel y pulpa, agua.

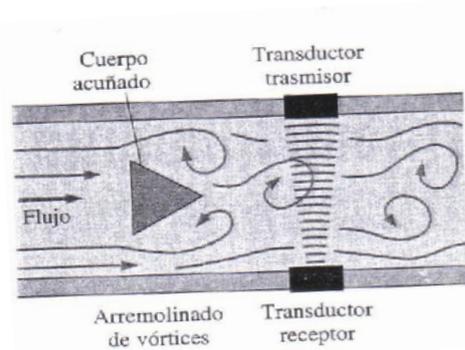


Figura 1.25: Medidor de Vortex

1.3.2.3.3 Medidores Electromagnéticos

Es un dispositivo no-invasivo que consiste de una bobina magnética que encierra a la tubería y dos electrodos introducidos en la tubería a lo largo de un diámetro a través de las perforaciones y colocados al nivel de la superficie interior de la tubería, así de esta manera los electrodos están en contacto con el fluido, pero no interfieren con el flujo por lo tanto no provocan pérdida de carga alguna (Figura. 1.26).

Operan mediante la ley de Faraday de inducción electromagnética, que establece que un voltaje será inducido cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético. En este caso el conductor sólido es reemplazado por un líquido, el campo magnético es generado por las bobinas de energía ubicadas afuera de la tubería de flujo. La cantidad de tensión producida es directamente proporcional al caudal del fluido.

Son utilizados con líquidos sucios y limpios; líquidos viscosos y conductores. Son comúnmente empleados en las industrias: alimenticia, de bebidas y farmacéutica.

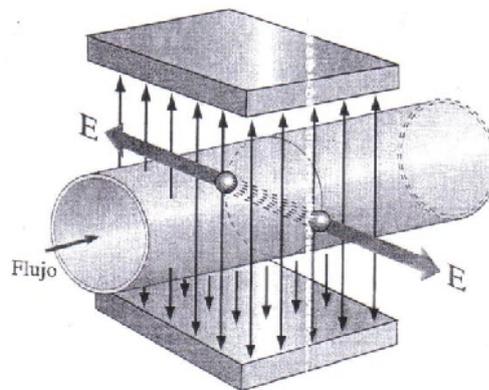


Figura 1.26: Medidor Electromagnético

1.3.2.3.4 Medidores ultrasónicos

Se basa en la propagación de ondas sonoras mediante un transductor, con el uso de estas ondas sonoras en el rango ultrasónico (por lo general a una frecuencia de 1 MHz), se realiza mediciones del número de ondas, propagación de dichas ondas en el fluido tanto corriente arriba como también corriente abajo.

Existe una diferencia entre el número de ondas en las partes del flujo corrientes arriba y abajo por unidad de longitud, esta es proporcional a la velocidad del flujo. Lo cual sugiere que la velocidad del flujo se puede medir cuando se compara la propagación de las ondas en las direcciones de ida y vuelta al flujo.

Existen dos tipos de medidores ultrasónicos, uno de ellos es el de tiempo de tránsito (Figura 1.27), en este se utilizan dos transductores los cuales emiten ondas, uno de estos en el mismo sentido de la corriente y el otro en sentido contrario, esto permite medir la diferencia en el tiempo de viaje de las ondas emitidas por cada transductor. La velocidad de flujo es proporcional a la diferencia de tiempo de tránsito.



Figura 1.27: Medidor Tiempo de Tránsito

Al otro medidor se lo conoce con el nombre de efecto Doppler (Figura 1.28), consiste en que al apretar contra la tubería por la parte exterior un transductor piezoeléctrico, este genera ondas las cuales se dispersan mientras avanzan, produciéndose así un corrimiento en la frecuencia que es lo que conoce como efecto Doppler.

El transductor se encarga de transmitir una onda sonora de frecuencia fija a través de la pared de la tubería y hacia el líquido que fluye para luego recibirla con un cambio en su frecuencia. El cambio en la frecuencia de las ondas reflejadas es proporcional a la velocidad del flujo y un microprocesador determina la velocidad del flujo cuando compara el desplazamiento de la frecuencia entre las señales transmitida y reflejada.

Los medidores ultrasónicos se los utiliza en la medición de caudal bi-direccional en aplicaciones con líquidos sucios y líquidos viscosos, pueden ser estos hidrocarburos y sus derivados así como también en sistemas de medición de agua.

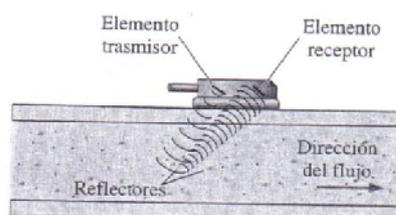


Figura 1.28: Medidor Efecto Doppler

1.3.2.4 Medidores de masa

Los medidores de masa se pueden clasificar en:

- Medidores tipo Coriolis.
- Medidores térmicos.

1.3.2.4.1 Medidores tipo Coriolis

Básicamente consiste en un tubo de flujo en forma de U encerrado en una cubierta detectora como se indica en la figura 1.29. El tubo de flujo en forma de U está dotado de un dispositivo magnético situado en la curva del tubo lo cual hace que vibre a su frecuencia natural. Debido a que el líquido fluye a través de la tubería, éste se ve obligado a seguir el movimiento vertical del tubo. La superposición del movimiento circular del líquido con el movimiento vibratorio del tubo en U hace que el tubo se tuerza. La cantidad de torsión es directamente proporcional al caudal másico del líquido que fluye a través del tubo. Los sensores magnéticos situados a cada lado del tubo miden la velocidad del mismo, que cambia mientras se tuerce.

Se utiliza para medir caudal bi-direccional en aplicaciones que requieran independencia de la temperatura, densidad o presión del fluido, y que sólo dependan de la masa. Tiene una amplia gama de aplicaciones desde adhesivos y recubrimientos hasta nitrógeno líquido. Además es utilizado en medición de caudal en la dosificación por lotes.

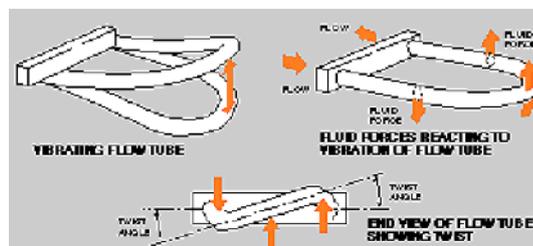


Figura 1.29: Medidor tipo Coriolis

1.3.2.4.2 Medidores térmicos

Este utiliza un elemento sensor que es calentado y que está aislado de la ruta del fluido. El sensor es calentado por el calor que es transportado por la corriente de líquido (Figura 1.30). El calor conducido es directamente proporcional al caudal másico.

Principalmente se los utiliza en procesos de bajos caudales y ambientes difíciles y complejos. Están presentes en aplicaciones como producción de natural, refinerías, químicas manufactureras, laboratorios científicos, etc.

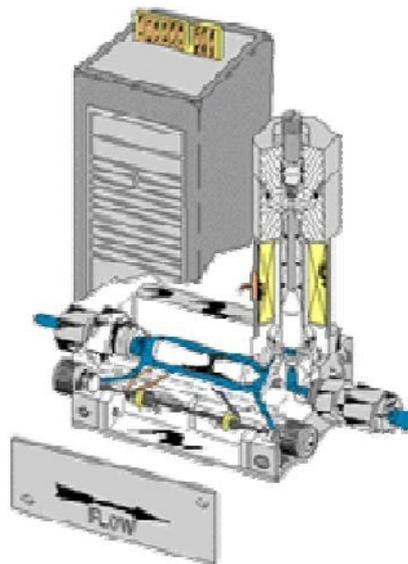


Figura 1.30: Medidor Térmico

1.4 Bombas

Cuando se trate temas de circulación o transportación de fluidos, trataremos el tema de bombas.

Una bomba actúa como un convertidor de energía mecánica (par de giro, velocidad de rotación) en energía cinética, pero en forma correcta se hablaría de energía hidráulica debido a que genera presión y caudal respectivamente en el fluido.

Existen varios tipos de bombas para distintas aplicaciones, pero al momento de seleccionar una o varias bombas para un determinado proyecto, se deberá tomar muy en cuenta los siguientes puntos:

- El valor de presión máxima exigida.
- El valor máximo de caudal necesario.
- La velocidad a que debe girar.
- La temperatura máxima y mínima que el medio puede alcanzar.
- El tipo de fluido, su viscosidad más alta y más baja.
- La situación del montaje (entubado, etc.).
- El tipo de accionamiento.
- La vida útil que se prevé.
- El nivel de ruido.
- El precio (por razón de presupuesto).

En el mercado existen una variada serie de bombas con distintos criterios constructivos y no todas cumplen con las mismas funciones.

Todas las bombas siguen un principio común: pues son diseñadas según el principio de desplazamiento de fluido. Es decir, la bomba está construida basándose en cámaras estancas. Dichas cámaras cumplen con la función de:

1. Absorber fluido por el orificio de entrada (aspiración), para lo que, mecánicamente, se crea en ellas (las cámaras) un vacío.
2. Transportar el fluido, una vez llena la cámara, hasta el orificio de salida.
3. Expulsar con fuerza (presión) el fluido por el orificio de salida o de presión.

1.4.1 Clasificación

Se clasifican en dos grupos principales sobre los cuales vamos tratar y que son los siguientes:

- Bombas de desplazamiento positivo o volumétrico.
- Bombas rotodinámicas.

1.4.1.1 Bombas de desplazamiento positivo o volumétrico

Este tipo de bombas se basan 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 cada ciclo el órgano propulsor genera de manera positiva un volumen dado o cilindrada, razón por la cual se las denominan también bombas volumétricas”.¹³

Si la bomba es capaz de variar el volumen máximo de la cilindrada se habla de bombas de volumen variable. Pero si ese volumen no se puede variar, entonces se dice que la bomba es de volumen fijo. Dentro de esta gama de bombas podemos tener:

- Bombas de émbolo alternativo.
- Bombas volumétricas rotativas o rotoestáticas.

1.4.1.1.1 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 bombas, el movimiento del fluido no continuo y los procesos de carga y descarga se realizan por válvulas que abren y cierran alternativamente. Entre estos tipos de bombas tenemos:

- Bomba alternativa de pistón.
- Bomba rotativa de pistones.
- Bomba pistones de accionamiento axial.

1.4.1.1.2 Bombas volumétricas rotativas o rotoestáticas

Este tipo de bombas son aquellas en las que una masa fluida es confinada en uno o varios compartimentos que se desplazan desde la zona de baja presión (entrada)

¹³ <http://fluidos.eia.edu.co/lhidraulica/guias/bombas/Bombas.html>

hasta la zona de alta presión (salida) de la bomba. Este tipo de bombas pueden clasificarse a su vez en:

- La bomba de paletas.
- La bomba de lóbulos.
- La bomba de engranajes.
- La bomba de tornillo o bomba peristáltica.

1.4.1.2 Bombas rotodinámicas

Este tipo de bombas basa su funcionamiento en el intercambio de cantidad de movimiento entre los álabes de la bomba y el fluido, aplicando la hidrodinámica. En el interior de estas bombas hay uno o varios rodetes con álabes que giran generando un campo de presiones sobre el fluido. Con estas bombas el flujo del fluido es continuo.

A estas bombas las podemos clasificar rápidamente 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.

Trataremos en forma muy particular, la bomba centrífuga, ya que este tipo de bomba será la utilizada en nuestro módulo didáctico.

1.4.1.2.1 Bomba Centrífuga

Este es el tipo más corriente de bombas rotodinámicas, su denominación se debe a la cota de presión que se genera mediante la acción centrífuga.

Es el tipo de bomba más utilizada, son muy versátiles, 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 bombas grandes puede llegar al 90%.

El rodete está constituido por un cierto número de álabes curvados en dirección contraria al movimiento y colocados entre dos discos metálicos conectados al rotor.

“El agua ingresa por el centro u ojo del rodete y los álabes son los encargados de arrastrarla y lanzarla en dirección radial”¹⁴. Esta aceleración produce un apreciable aumento de energía cinética y presión. En el momento que el fluido abandona los álabes, su movimiento está descrito por componentes radial y transversal.

Es recomendable y esencial transformar en la mayor medida posible la considerable cota cinemática a la salida del rodete en la más útil cota de presión, con esto evitamos que haya pérdida de energía y por lo tanto rendimiento.

Esto se consigue construyendo la carcasa en forma de espiral, esto permite que la sección del flujo en la periferia del rodete vaya aumentando gradualmente.

Cuando se necesita trasladar grandes caudales 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.

Cara y compleja de fabricar, pero tiene la ventaja adicional de solucionar el problema del empuje axial. Las superficies de guía están cuidadosamente pulimentadas para minimizar las pérdidas por rozamiento.

Generalmente el montaje se lo realiza horizontalmente, ya que así se facilita el acceso. Sin embargo, debido a la limitación del espacio, algunas unidades de gran tamaño se montan verticalmente.

¹⁴ MARTINEZ SANCHEZ, Victoriano A. *Potencia hidráulica controlada por PLC México*: Alfaomega, 2009, 283 p. ISBN: 978-970-15-1432-0, Es.

Los rodetes pueden ser de numerosas proporciones, esto permite hacer frente a una gran gama de condiciones de funcionamiento.

Para que la bomba centrífuga esté en condiciones de funcionar satisfactoriamente, todo el sistema en si debe estar lleno de agua, tanto la tubería de aspiración como la bomba misma.

La posición adecuada de la bomba debe ser a un nivel inferior a la del agua del pozo de aspiración, pero si esta condición no se cumple es necesario expulsar el aire de la tubería de aspiración y de la bomba para reemplazarlo por agua; ésta operación se denomina cebado.

1.4.1.2.1.1 Cebado de Bomba

El simple giro del rodete, aún a una alta velocidad, es insuficiente para efectuar el cebado y sólo se conseguirá recalentar los cojinetes. Se conocen dos métodos principales de cebado, los cuales exigen una válvula de retención en la proximidad de la base del tubo de aspiración, o en las unidades mayores con la ayuda de una bomba de vacío.

Aplicando el primer caso, se debe hacer entrar el agua de la tubería de impulsión o de cualquier otra procedencia, en el cuerpo de bomba y así el aire será expulsado por una llave de purga.

Se fabrican este tipo de bombas, teniendo como objetivos un rendimiento de trabajo que sea óptimo, una gama amplia de aplicaciones y una fácil mantención del equipo. Una bomba centrífuga tiene un cuerpo húmedo que está fabricado en un polímero de grandes cualidades mecánicas y de excelente resistencia química. Estos materiales evitan las incrustaciones de partículas, y aún mejor no son afectados por problemas de cavitación.

Esta bomba es utilizada y con un óptimo rendimiento en plantas de ácido, agua de cola, aguas marinas, y en general en lugares con gran concentración de corrosivos. Y sobre todo tiene un gran campo de aplicación en la industria alimenticia dado que no contamina los productos.

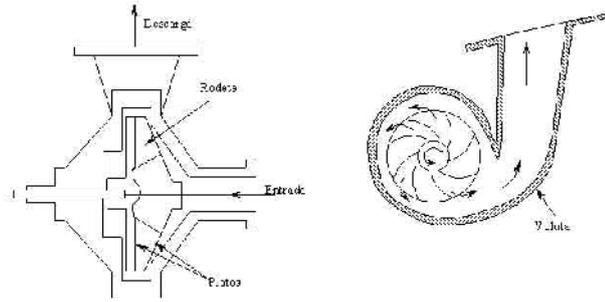


Fig. 1.31: Bomba Centrífuga.

1.4.2 Punto de Operación

Cuando se requiere una bomba se toma muy en cuenta, la curva de resistencia del sistema y la curva característica cabeza/descarga (H/Q) de la bomba, que graficadas en el mismo sistema de coordenadas H vs. Q como se muestra en la Figura 1.32 deben intersectarse en un punto, a dicho punto se lo conoce como punto de operación, y es el cual nos indicará si la bomba es no adecuada para aplicarla al sistema.

En la mayoría de los casos, el punto de operación no coincide con el punto de mayor eficiencia de una bomba disponible, no se puede ajustar el sistema a la bomba.

“Los fabricantes de bombas suministran diagramas que indican el rango adecuado de operaciones para cada bomba producida”.¹⁵

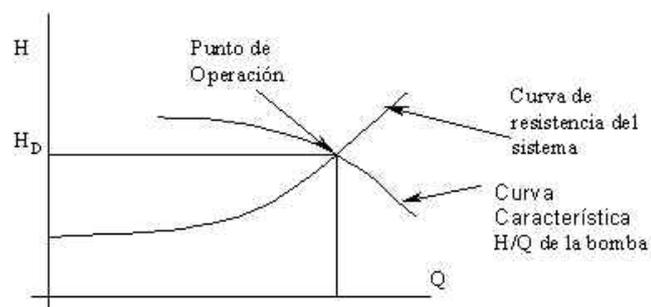


Fig. 1.32: Punto de operación de una bomba.

¹⁵ SALDARRIAGA Juan. *Hidráulica de Tuberías*, 2009, 6ª. Ed, Alfaomega.

1.4.3 Curvas de Isoeficiencia

Probando una bomba para diferentes velocidades y con la relación H/Q para cada velocidad, se puede graficar como se muestra en la Figura 1.33. 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 solo diagrama la relación entre cabeza, descarga, velocidad y eficiencia de una bomba.

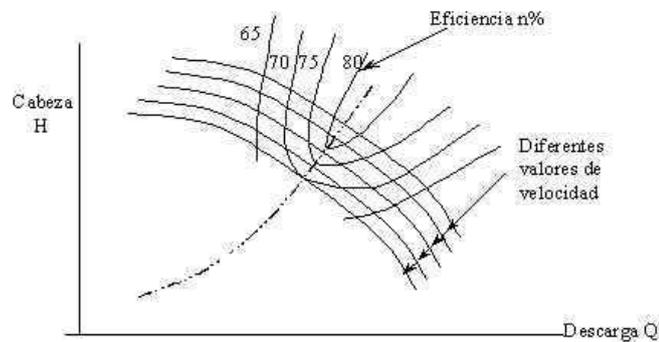


Figura 1.33: Curvas de Isoeficiencia

1.5 Válvulas

1.5.1 Definición

Se define a una válvula como un dispositivo mecánico utilizado para controlar, obstruir o dar paso a cualquier fluido que es transportado por una tubería.

Podemos considerar en automatismos a una válvula de control como un dispositivo que sirve para mantener dentro de un rango determinado (al abrirse o cerrarse) una determinada variable (nivel, presión, caudal, etc.) dependiendo de lo que se requiera en un determinado proceso.

En un sistema de control de nivel de líquidos las válvulas son usadas para mantener el nivel dentro de un rango apropiado, esto es posible mediante la interacción de abrir o cerrar la válvula de control.

El cuerpo de la válvula contiene en su interior el obturador y los asientos y está provisto de rosca o de bridas para conectar la válvula a la tubería. El obturador es

quien realiza la función de control de paso del fluido y puede actuar en la dirección de su propio eje o bien tener un movimiento rotativo tal cual se indica en la figura 1.34, donde se indica una válvula típica usada para control. Este se encuentra unido a un vástago que pasa a través de la tapa del cuerpo y que es accionado por el servomotor.

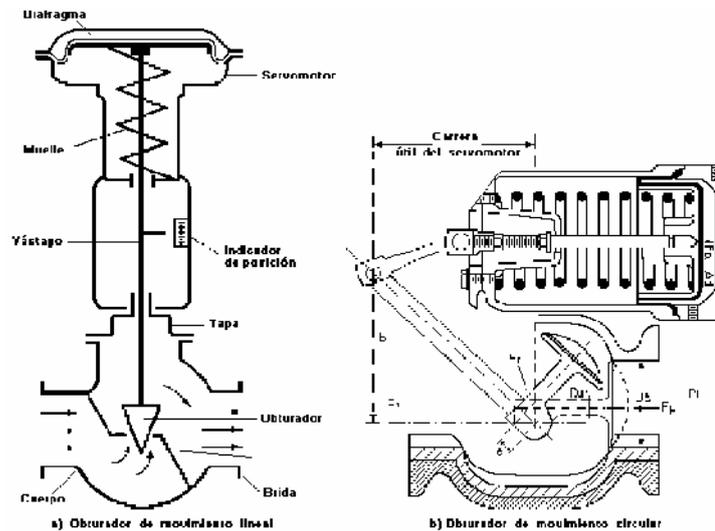


Fig. 1.34: Válvula de control

1.5.2 Tipos de Válvulas

Existen varios tipos de válvulas, según sea el diseño del cuerpo y el movimiento del obturador que con el paso de los años la industria ha ido perfeccionando de acuerdo a las necesidades que se presentan en un proceso.

Así tenemos válvulas manuales y automáticas, las manuales son de movimiento lineal en las que el obturador se mueve en la dirección de su propio eje se clasifican como se especifica a continuación.

1.5.2.1 Válvula de Globo

Existen de simple asiento, de doble asiento y de obturador equilibrado respectivamente como se puede observar en la figura 1.35. Las válvulas de simple asiento precisan de un actuador de mayor tamaño para que el obturador cierre en

contra de la presión diferencial del proceso. Por lo tanto, se emplean cuando la presión del fluido es baja y se precisa que las fugas en posición de cierre sean mínimas. En la válvula de doble asiento o de obturador equilibrado la fuerza de desequilibrio desarrollada por la presión diferencial a través del obturador es menor que en la válvula de simple asiento. Por este motivo se emplea en válvulas de gran tamaño o bien cuando se trabaja con una alta presión diferencial. En posición de cierre las fugas son mayores que en una válvula de simple asiento.

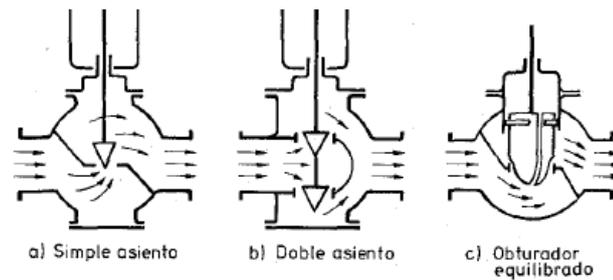


Fig. 1.35: Tipos de válvulas de globo.

Se componen principalmente de volante, vástago, bonete, asientos, disco cuyo movimiento se da en forma perpendicular al fluido dentro del cuerpo de la válvula como se indica en la figura 1.36 y cuerpo.

Se aplican para servicio general, líquidos, vapores, gases, corrosivos, pastas semilíquidas.

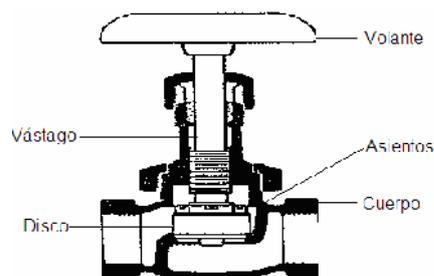


Fig. 1.36: Válvula de globo de simple asiento

1.5.2.2 Válvula de compuerta

Esta válvula efectúa su cierre con un disco vertical plano, o de forma especial, y que se mueve verticalmente al flujo del fluido. Por su disposición es adecuada generalmente para control todo-nada o para regular sin estrangulación y en usos

pocos frecuentes, ya que en posiciones intermedias tiende a bloquearse. Tiene la ventaja de presentar muy poca resistencia al flujo de fluido cuando está en posición de apertura total (fig. 1.37).

Se las aplica en servicio general, aceites y petróleo, aire, pastas semilíquidas, líquidos espesos, vapor, gases y líquidos no condensables, líquidos corrosivos.¹⁶

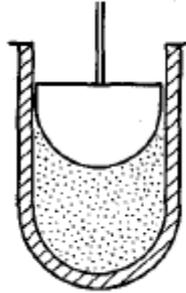


Fig. 1.37: Válvula de compuerta.

1.5.2.3 Válvula de mariposa

Su cuerpo está formado por un anillo cilíndrico dentro del cual gira transversalmente un disco circular (fig. 1.38). La válvula puede cerrar herméticamente mediante un anillo de goma encastrado en el cuerpo. Un servomotor exterior acciona el eje de giro del disco y ejerce su par máximo cuando la válvula está totalmente abierta (en control todo-nada se consideran 90° y en control continuo 60° , a partir de la posición de cierre ya que la última parte del giro es bastante inestable), siempre que la presión diferencial permanezca constante. En la selección de la válvula es importante considerar las presiones diferenciales correspondientes a las posiciones de completa apertura y de cierre; se necesita una fuerza grande del actuador para accionar la válvula en caso de una caída de presión elevada.

Las válvulas de mariposa se emplean para el control de grandes caudales de fluidos a baja presión.

¹⁶ C. Soeres. *Process Engineering Equipment handbook*. Ed. MacGraw-Hill. 2002



Fig. 1.38: Válvula de mariposa.\

1.5.2.4 Válvula de bola

El cuerpo de esta válvula tiene una cavidad interna esférica que alberga un obturador en forma de esfera o de bola (de ahí su nombre) (fig. 1.39). La posee un corte adecuado (usualmente en V) que fija la curva característica de la válvula, y gira transversalmente accionada por un servomotor exterior. El cierre estanco se logra con un aro de teflón incorporado al cuerpo contra el cual asienta la bola cuando la válvula está cerrada. En posición de apertura total, la válvula equivale aproximadamente en tamaño a 75 % del tamaño de la tubería. La válvula de bola se emplea principalmente en el control de caudal de fluidos negros, o bien en fluidos con gran porcentaje de sólidos en suspensión.

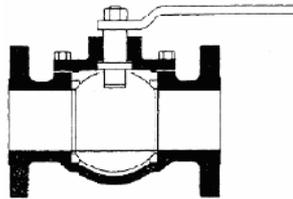


Fig. 1.39: Válvula de bola.

1.5.2.5 Válvula de Retención (Check)

Esta válvula tiene como fin impedir una inversión de la circulación como vemos en la figura 1.40. La circulación de líquido en el sentido deseado abre la válvula; al invertirse la circulación, esta se cierra inmediatamente.

Es utilizada principalmente en procesos en los que el sentido de circulación del fluido en la tubería cambia. Son útiles en tuberías tanto horizontales o verticales según el modelo de la válvula.

Las principales aplicaciones de la válvula son: servicio para vapor de agua, aire, gas, agua y vapores con altas y bajas velocidades de circulación dentro del sistema.

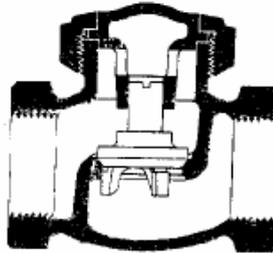


Fig. 1.40: Válvula check

1.5.2.6 Válvula de alivio o desahogo

La válvula de desahogo es de acción automática para obtener regulación automática de la presión. Su uso principal es para servicio con fluidos no comprimibles y se abre con lentitud conforme aumenta la presión, para regularla (fig.1.41).

Una válvula de seguridad es similar a la válvula de desahogo, pero con la diferencia de que esta se abre con rapidez con un salto para descargar la presión excesiva ocasionada por gases o líquidos comprimibles.

Esta válvula se recomienda usar en sistemas en donde se trabaja con una gama predeterminada de presiones, como por ejemplo agua caliente, vapor de agua, gases y otros vapores.



Fig. 1.41: Válvula de alivio.

1.5.2.7 Válvula de Solenoide o Electroválvula

A diferencia de todas las otras válvulas mencionadas anteriormente, este tipo de válvula es un dispositivo operado eléctricamente, y es utilizado para controlar el flujo de líquidos o gases en posición completamente abierta o completamente cerrada. Son elementos muy sencillos y posiblemente el de uso más común de los actuadores eléctricos.

En la figura 1.42 se puede ver la válvula solenoide típica, está formada por una bobina solenoide encajada en un núcleo fijo en forma de tubo cilíndrico, en cuyo interior desliza un núcleo móvil provisto en su extremo de un disco o tapón.

Al recibir voltaje la bobina actúa como un electroimán, la excitación de esta crea un campo magnético que atrae al núcleo móvil y vástago, mientras que al dejar de recibir voltaje se invierte la posición de éste gracias a un resorte que empuja el disco contra el asiento, cerrando así la válvula. La válvula representada en la figura 1.42 pertenece a las denominadas, válvulas cerradas en fallo de corriente.

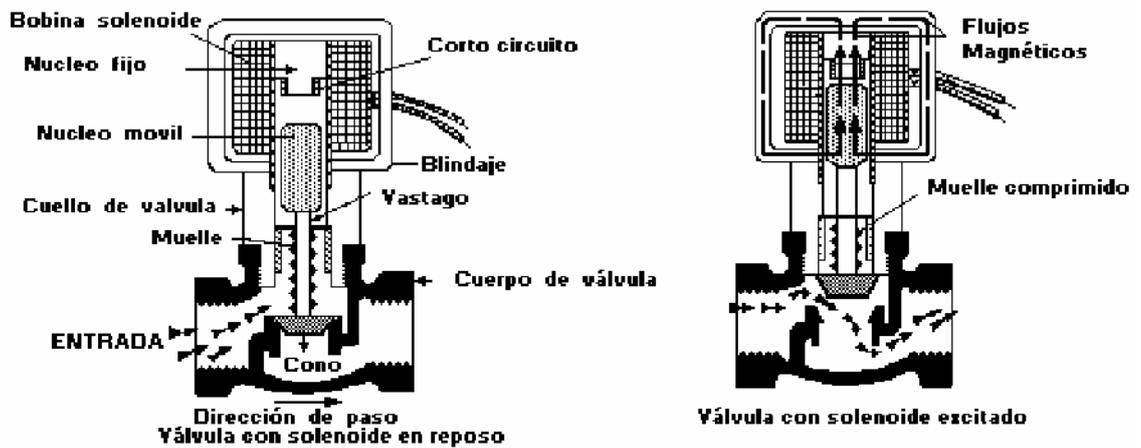


Fig. 1.42: Electroválvula

1.6 Sistema de Control

1.6.1 Definiciones.

Antes de analizar los sistemas de control, deben definirse ciertos términos básicos.

1.6.1.1 Variable controlada y variable manipulada

La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla. La, variable manipulada es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada. Por lo común, la variable controlada es la salida (el resultado) del sistema. Controlar significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar una desviación del valor medido a partir de un valor deseado.

En el estudio de la ingeniería de control, necesitamos definir términos adicionales que resultan necesarios para describir los sistemas de control.

1.6.1.2 Plantas.

Una planta puede ser una parte de un equipo, tal vez un conjunto de las partes de una máquina que funcionan juntas, el propósito de la cual es ejecutar una operación particular.

1.6.1.3 Procesos.

El Diccionario Merriam-Webster define un proceso como una operación o un desarrollo natural progresivamente continuo, marcado por una serie de cambios graduales que se suceden uno al otro en una forma relativamente fija y que conducen a un resultado o propósito determinados; o una operación artificial o voluntaria progresiva que consiste en una serie de acciones o movimientos controlados, sistemáticamente dirigidos hacia un resultado o propósito determinados.

1.6.1.4 Sistemas.

Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado. Un sistema no necesariamente es físico. El concepto de sistema se aplica a fenómenos abstractos y dinámicos, tales como los que se encuentran en la economía. Por tanto, la palabra sistema debe interpretarse como una implicación de sistemas físicos, biológicos, económicos y similares.

1.6.1.5 Perturbaciones.

“Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema”¹⁷. Si la perturbación se genera dentro del sistema se denomina interna, en tanto que una perturbación externa se produce fuera del sistema y es una entrada.

1.6.1.6 Control realimentado.

El control realimentado se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia y lo continúa haciendo con base en esta diferencia.

1.6.2. Sistemas de control realimentados.

Un sistema que mantiene una relación prescrita entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control, se denomina sistema de control realimentado. Un ejemplo sería el sistema de control de temperatura de una habitación. Midiendo la temperatura real y comparándola con la temperatura de referencia (la temperatura deseada), el termostato activa o desactiva el equipo de calefacción o de enfriamiento para asegurar que la temperatura de la habitación se conserve en un nivel cómodo sin considerar las condiciones externas.

¹⁷ OGATA, *Ingeniería de Control Moderna*, 3era edición

Los sistemas de control realimentados no se limitan a la ingeniería, sino que también se encuentran en diversos campos ajenos a ella. Por ejemplo, el cuerpo humano es un sistema de control realimentado muy avanzado. Tanto la temperatura corporal como la presión sanguínea se conservan constantes mediante una realimentación fisiológica. De hecho, la realimentación realiza una función vital: vuelve el cuerpo humano relativamente insensible a las perturbaciones externas, por lo cual lo habilita para funcionar en forma adecuada en un ambiente cambiante.

1.6.3. Sistemas de control en lazo cerrado.

Los sistemas de control realimentados se denominan también sistemas de control en lazo cerrado. En la práctica, los términos control realimentado y control en lazo cerrado se usan indistintamente. En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema.

1.6.4. Sistemas de control en lazo abierto.

Los sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control se denominan sistemas de control en lazo abierto. En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada. Un ejemplo práctico es una lavadora. El remojo, el lavado y el enjuague en la lavadora operan con una base de tiempo. La máquina no mide la señal de salida, que es la limpieza de la ropa.

En cualquier sistema de control en lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia. Por tanto, a cada entrada de referencia le corresponde una

condición operativa fija; como resultado, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea deseada.

En la práctica, el control en lazo abierto sólo se usa si se conoce la relación entre la entrada y la salida y si no hay perturbaciones internas ni externas. Es evidente que estos sistemas no son de control realimentado. Observe que cualquier sistema de control que opere con una base de tiempo es en lazo abierto. Por ejemplo, el control del tránsito mediante señales operadas con una base de tiempo es otro ejemplo de control en lazo abierto.

1.6.5. Sistemas de control en lazo cerrado en comparación con los sistemas en lazo abierto.

Una ventaja del sistema de control en lazo cerrado es que el uso de la realimentación vuelve la respuesta del sistema relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema. Por tanto, es posible usar componentes relativamente precisos y baratos para obtener el control adecuado de una planta determinada, en tanto que hacer eso es imposible en el caso de un sistema en lazo abierto.

Desde el punto de vista de la estabilidad, el sistema de control en lazo abierto es más fácil de desarrollar, porque la estabilidad del sistema no es un problema importante. Por otra parte, la estabilidad es una función principal en el sistema de control en lazo cerrado, lo cual puede conducir a corregir en exceso errores que producen oscilaciones de amplitud constante o cambiante.

Debe señalarse que, para los sistemas en los que se conocen con anticipación las entradas y en los cuales no hay perturbaciones, es aconsejable emplear un control en lazo abierto. Los sistemas de control en lazo cerrado sólo tienen ventajas cuando se presentan perturbaciones impredecibles y/o variaciones impredecibles en los componentes del sistema.

Observe que la valoración de la energía de salida determina en forma parcial el costo, el peso y el tamaño de un sistema de control. La cantidad de componentes

usados en un sistema de control en lazo cerrado es mayor que la que se emplea para un sistema de control equivalente en lazo abierto. Por tanto, el sistema de control en lazo cerrado suele tener costos y potencias más grandes. Para disminuir la energía requerida de un sistema, se emplea un control en lazo abierto cuando puede aplicarse. Por lo general, una combinación adecuada de controles en lazo abierto y en lazo cerrado es menos costosa y ofrecerá un desempeño satisfactorio del sistema general.

1.6.6 Acciones básicas de control

1.6.6 .1 Clasificación de los controladores industriales.

Los controladores industriales se clasifican, de acuerdo con sus acciones de control, como:

1. De dos posiciones o de encendido y apagado (on/off).
2. Proporcionales.
3. Proporcionales-integrales.
4. Proporcionales-derivativos.
5. Proporcionales-integrales-derivativos.

Casi todos los controladores industriales emplean como fuente de energía la electricidad o un fluido presurizado, tal como el aceite o el aire. Los controladores también pueden clasificarse, de acuerdo con el tipo de energía que utilizan en su operación, como neumáticos, hidráulicos o electrónicos. El tipo de controlador que se use debe decidirse con base en la naturaleza de la planta y las condiciones operacionales, incluyendo consideraciones tales como seguridad, costo, disponibilidad, confiabilidad, precisión, peso y tamaño.

1.7. Controladores lógicos programables (PLC).

Un controlador lógico programable o autómeta es un equipo electrónico programable. En él la arquitectura, el sistema operativo y el lenguaje de

programación están diseñados para controlar, en tiempo real y en un ambiente industrial, procesos secuenciales. “Un autómata programable dispone de un sistema de exploración cíclico de las entradas y salidas, de una rápida resolución de operaciones lógicas y aritméticas sencillas y de un lenguaje de programación fácil”.¹⁸

1.7.1. Evolución de los autómatas programables.

En la mitad de la década de los años 60, la empresa General Motors se preocupa por los elevados costes de los sistemas de control a base de relés, la poca flexibilidad para adaptarse a las necesidades de producción y el elevado tiempo de averías. Esto hace que General Motors contacte con Digital Corporation para la búsqueda de un sistema de control que solventase estos problemas y que respondiera, entre otros, a los siguientes requerimientos:

- Adaptación al medio industrial.
- Sistema programable en lenguaje asequible al personal de operación y mantenimiento de la planta.
- Fácil mantenimiento, reutilizables y de alta fiabilidad.

De este modo nace el primer autómata programable que utilizaba memoria de ferritas y un procesador cableado a base de integrados, constituyendo la CPU. Su utilización se centró en la sustitución de los armarios de relés que controlaban procesos típicamente secuenciales.

En la década de los años 70 se incorpora la tecnología del microprocesador, lo que permite aumentar las prestaciones:

- Operaciones aritméticas y manipulación de datos.
- Entradas y salidas analógicas. Control de posicionamiento.
- Comunicación con ordenadores y periféricos.
- Mejora de los lenguajes de programación.

¹⁸ ARAGONÉS-SAIGÍ-ZABALETA. *Automatismos Eléctricos Programables*.

Las aplicaciones se extienden al control de procesos, ya que gracias a las entradas y salidas analógicas se pueden realizar lazos de regulación en procesos continuos y no puramente secuenciales.

En la década de los 80 se incorporan masivamente las mejoras de la tecnología de los microprocesadores consiguiendo:

- Altas velocidades de respuesta y reducción de las dimensiones.
- Aparición de módulos inteligentes (PID)
- Lenguajes gráficos de programación.
- Mayor capacidad de diagnóstico de funcionamiento.

En la primera mitad de la década de los 90 aparecen diversas tarjetas inteligentes para procesos específicos y diversos entornos de software para gestionar el funcionamiento de los autómatas y el proceso de la planta, así como una total integración del autómata en las redes informáticas.

En cuanto a la capacidad de direccionamiento de entradas y salidas, los fabricantes han desarrollado diversas familias que comprenden equipos que van desde 10 E/S, para pequeñas aplicaciones y a unos precios bajos, a grandes equipos capaces de controlar 10000E/S, para grandes procesos industriales, aunque la tendencia es a distribuir el control del proceso mediante una red de autómatas.

1.7.2. Funcionamiento del autómata.

Los autómatas utilizan un procesador para gestionar una serie de instrucciones, mediante las cuales se especifican las acciones de control necesarias en función del estado de las variables del sistema. El hecho de poseer un único procesador hace que las instrucciones se ejecuten de manera secuencial, aunque a una gran velocidad. Estas instrucciones son almacenadas en una memoria que se denomina memoria de programa. Por otro lado, los datos de entrada y salida son

almacenados en otra zona de memoria reservadas, a las cuales se les suele denominar imágenes del proceso.

1.7.2.1 Estructura interna de un autómata.

Los autómatas programables poseen una gran diversidad de estructuras internas en función del fabricante, pero de forma general se pueden distinguir los siguientes bloques:

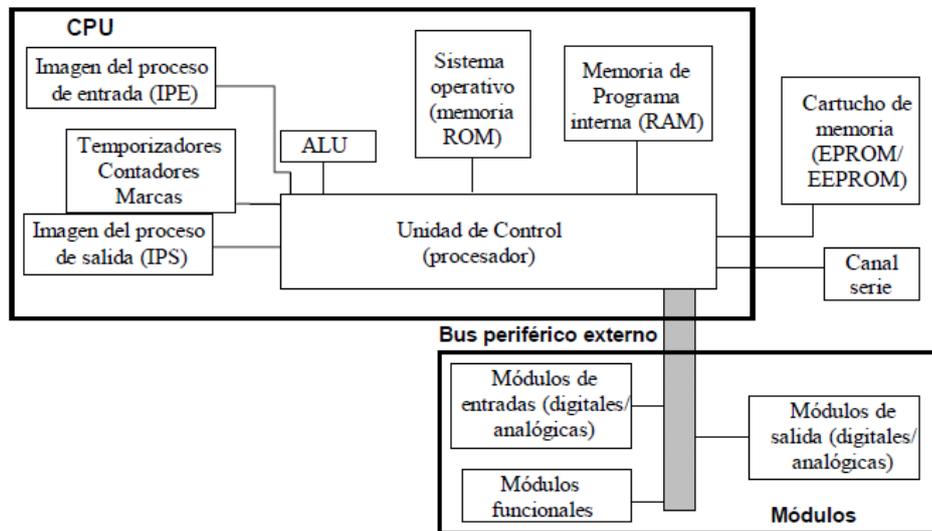


Fig. 1.43: Estructura interna de un autómata programable

1.7.2.2 Memoria de programa:

El programa de mando se ubica en la zona de memoria RAM, la cual posee la característica de que su contenido se puede modificar rápidamente, pero si falla la alimentación y no hay batería tampón, se pierde dicho contenido. Para conservar un programa del autómata a prueba de fallos de alimentación, existe la posibilidad de transferirlo a un cartucho de memoria EPROM o EEPROM.

1.7.2.3 Sistema Operativo (Memoria ROM):

El sistema operativo incluye los programas de sistema que fijan la ejecución del programa de usuario, la gestión de entradas y salidas, el reparto de la memoria, la gestión de datos y similares. El sistema operativo es fijo y no se puede modificar.

1.7.2.4 Imágenes de proceso:

Los estados de señal de los módulos de entrada y salida se depositan en la CPU dentro de las denominadas "Imágenes de proceso". Son zonas reservadas de memoria RAM. Para módulos de entrada y salida existen imágenes separadas, imagen de proceso de las entradas (IPE) e imagen de proceso de las salidas (IPS).

1.7.2.5 Conector canal serie de comunicación:

En él se conectan los aparatos de programación, operación y observación. En la mayoría de los autómatas es posible formar una red local por medio de esta vía.

1.7.2.6 Temporizadores, contadores y marca:

Los temporizadores y contadores pueden cargarse, borrarse, arrancarse y pararse desde el programa. Los valores de tiempo y cuenta se almacenan en zonas reservadas de la memoria RAM. Otra zona de la memoria RAM permite almacenar información, por ejemplo resultados intermedios, en calidad de marcas.

1.7.2.7 Unidad aritmética y lógica (ALU):

La unidad aritmética y lógica se compone de uno o dos acumuladores (AC 1 ó AC 2) que procesan las operaciones por "bytes" y por "words".

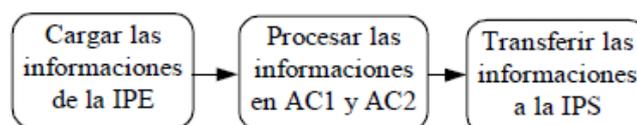


Fig. 1.44: Unidad ALU

1.7.2.8 Unidad de control

Siguiendo el programa, llama sucesivamente a las instrucciones contenidas en la memoria y las ejecuta. La estructura típica de una unidad de control queda reflejada en la figura.

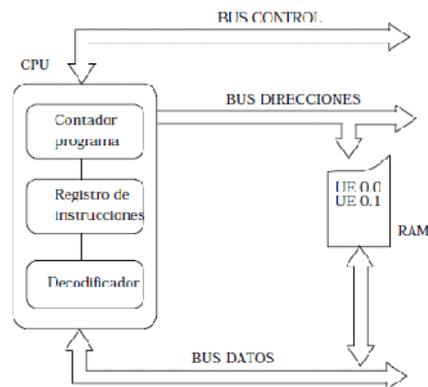


Fig. 1.45: Unidad de control

1.7.2.9 Bus periférico externo

El bus periférico externo constituye la vía eléctrica por la que se intercambian todas las señales entre la CPU y los módulos externos. Existe un abanico muy amplio de módulos externos, ya sean de entradas, salidas y funcionales, con diferentes características para adaptarse lo mejor posible a nuestra aplicación de control.

1.7.3 Ciclo de datos.

La principal función del procesador de un autómata programable es la lectura y ejecución de las instrucciones del programa de usuario, mediante la utilización de los estados de las entradas, salidas y variables internas del sistema. La mayoría de los autómatas actuales efectúan esta tarea de forma cíclica y para ello antes de cada ejecución del programa el bus periférico externo transporta a la IPE los datos

actuales de los módulos de entrada. Simultáneamente se pasan a los módulos de salida los datos contenidos en la IPS.

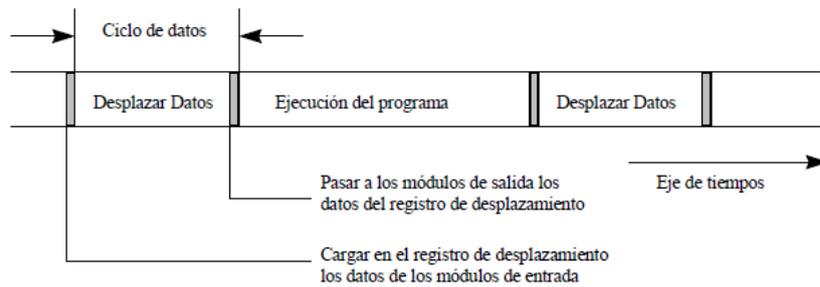


Fig. 1.46: Ciclo de datos.

Como medida de seguridad, existe una vigilancia del ciclo que desconecta el autómata en caso de error del sistema (perro guardián o watch dog).

1.7.4 Lenguajes de programación.

En los autómatas programables (PLC), las tareas de automatización se formulan en programas de mando. En ellos, el usuario fija mediante una serie de instrucciones cómo el autómata debe mandar o regular la instalación. Existen diversos lenguajes de programación en función del fabricante del autómata programable, pero se puede distinguir en todos ellos tres formas básicas de representación que son: esquema de contactos, lista de instrucciones y diagrama de funciones.

1.7.4.1 Lista de instrucciones.

Esta forma de representación del programa consiste en un conjunto de códigos simbólicos que corresponden a instrucciones de lenguaje máquina. Es un lenguaje indicado para usuarios familiarizados con la informática. Además este lenguaje es el único utilizable por las unidades de programación sencillas, que solo visualizan una o varias líneas de programa simultáneamente. La estructura que suelen tener estas instrucciones es:

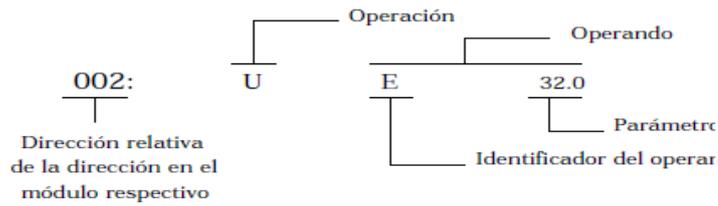


Fig. 1.47: Estructura de una instrucción para un autómata Siemens-Simatic S5.

1.7.4.2 Diagrama de funciones.

Consiste en un lenguaje simbólico, en el que las diferentes combinaciones entre variables se representan por medio de símbolos lógicos. Este lenguaje de programación está especialmente indicado para usuarios familiarizados con la electrónica digital.

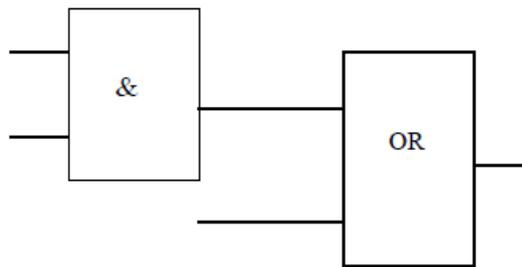


Fig. 1.48: Diagrama de funciones

1.7.4.3 Esquema de contactos.

En este tipo de lenguaje, las funciones de mando se representan mediante un esquema con simbología circuital, y está especialmente indicado para técnicos que estén habituados a diseñar sistemas de control a base de relés. La simbología utilizada por la mayoría de lenguajes es la correspondiente a la convención americana, según normas NEMA para la representación de esquemas eléctricos.

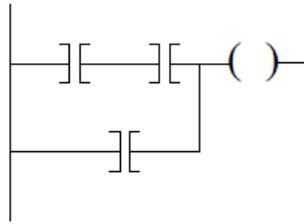


Fig. 1.49: Esquema de contactos.

1.7.4.4 Tipos de instrucciones

El conjunto de instrucciones de los autómatas programables se va ampliando continuamente con nuevas y más complejas instrucciones específicas de las nuevas aplicaciones que se van incorporando, como lazos de regulación PID o lazos de control de lógica difusa. De forma general, en el conjunto de instrucciones del autómata se pueden considerar los siguientes grupos:

- **Instrucciones binarias:** Son las instrucciones que definen, en el lenguaje utilizado, los operadores lógicos de *Boole*, *AND*, *OR*, así como los equivalentes negados.
- **Instrucciones de memorias:** Instrucciones que permiten memorizar el resultado de la combinación obtenido por el procesador. Habitualmente se utilizan básculas S-R o R-S.
- **Instrucciones de temporización y contaje:** Son instrucciones que generan una variable donde la activación o desactivación de la misma está en función del tiempo o del número de pulsos.
- **Instrucciones aritméticas y de comparación:** Generalmente forman parte de estas instrucciones las operaciones básicas suma, resta, mayor, menor e igual. Procesadores más potentes incluyen operaciones como multiplicación, división, utilización de la notación en coma flotante, etc.
- **Instrucciones de transferencia y manipulación de datos:** Es necesario disponer de instrucciones que permitan trasladar o copiar uno o varios datos contenidos en los registros de la memoria de datos a otros registros de la misma memoria, o bien, en un conjunto de variables numéricas.

- **Instrucciones de control del ciclo de ejecución:** Estas instrucciones permiten alterar la ejecución secuencial de las instrucciones del programa de control por medio de saltos condicionales o incondicionales a determinadas secciones del programa principal para realizar secuencias de instrucciones denominadas subrutinas.
- **Instrucciones de comunicación:** Estas instrucciones permiten la transferencia de información entre dos autómatas, o bien, hacia una impresora u ordenador personal (PC). La comunicación se realiza habitualmente por medio de un canal de comunicación serie.

1.7.5. Algoritmo PID

La operación PID (lazo de regulación con acción proporcional, integral, derivativa) sirve para ejecutar el cálculo PID en la CPU S7-200. Esta operación se ve determinada por 9 parámetros almacenados en una tabla del lazo que abarca 36 bytes.

En modo estacionario, un regulador PID varía el valor de su salida para llevar a cero el error de regulación (e). El error es la diferencia entre el valor de consigna (el punto de trabajo deseado) y la variable del proceso (el punto de trabajo real). El principio de una regulación PID se basa en la ecuación que se indica a continuación y que expresa la salida como una función de un término proporcional, uno integral y uno diferencial:

(Ec. 1.9)

Donde:

y es la salida del lazo en función del tiempo

K es la ganancia del lazo

e es el error de regulación (diferencia entre la consigna y la variable de proceso)

es el valor inicial de la salida del lazo

Para poder implementar esta función de regulación en un sistema digital, la función continua deberá cuantificarse mediante muestreos periódicos del valor del error, calculándose seguidamente el valor de la salida. La ecuación que constituye la base de la solución en un sistema digital es:

(Ec. 1.10)

Donde:

es el valor de salida del lazo calculado en el muestreo n-ésimo

es la ganancia del lazo

es el valor del error del lazo en el muestreo n-ésimo

es el valor previo del error de regulación (en el muestreo (n-1)-ésimo)

es la constante proporcional del término integral

es el valor inicial de la salida del lazo

es la constante proporcional del término diferencial

Para esta ecuación, el término integral se muestra en función de todos los términos del error, desde el primer muestreo hasta el muestreo actual. El término diferencial es una función del muestreo actual y del muestreo previo; mientras que el término proporcional sólo es función del muestreo actual. En un sistema digital no es práctico almacenar todos los muestreos del término del error, además de no ser necesario.

Puesto que un sistema digital debe calcular el valor de salida cada vez que se muestre el error, comenzando en el primer muestreo, sólo es necesario almacenar

el valor previo del error y el valor previo del término integral. Debido a la naturaleza repetitiva de la solución basada en un sistema digital, es posible simplificar la ecuación a resolver en cada muestreo. La ecuación simplificada es:

(Ec. 1.11)

Donde:

es el valor de salida del lazo calculado en el muestreo n-ésimo

es la ganancia del lazo

es el valor del error del lazo en el muestreo n-ésimo

es el valor previo del error de regulación (en el muestreo (n-1)-ésimo)

es la constante proporcional del término integral

es el valor previo del término integral (en el muestreo (n-1)-ésimo)

es la constante proporcional del término diferencial

Para calcular el valor de salida del lazo, la CPU utiliza una forma modificada de la ecuación simplificada anterior. Esta ecuación modificada equivale a:

(Ec. 1.12)

Donde:

es el valor de salida del lazo calculado en el muestreo n-ésimo

es el valor del término proporcional de salida del lazo en el muestreo n-ésimo

es el valor del término integral de salida del lazo en el muestreo n-ésimo

es el valor del término diferencial de salida del lazo en el muestreo n-ésimo

1.7.5.1 Término proporcional de la ecuación PID

El término proporcional es el producto de la ganancia , la cual controla la sensibilidad del cálculo de la salida, y del error (e), que es la diferencia entre el valor de consigna (SP) y el valor real o de la variable del proceso (PV) para un instante de muestreo determinado. La ecuación que representa el término proporcional según la resuelve la CPU es la siguiente:

(Ec. 1.13)

Donde:

es el valor del término proporcional de salida del lazo en el muestreo n-ésimo

es la ganancia del lazo

es el valor de la consigna en el muestreo n-ésimo

es el valor de la variable del proceso en el muestreo n-ésimo

1.7.5.2 Término integral de la ecuación PID

El término integral MI es proporcional a la suma del error (e) a lo largo del tiempo. La ecuación que representa el término integral tal y como la resuelve la CPU es:

(Ec. 1.14)

Donde:

es el valor del término integral de salida del lazo en el muestreo n-ésimo

es la ganancia del lazo

es el tiempo de muestreo del lazo

es el período de integración del lazo (también llamado tiempo de acción integral)

es el valor de la consigna en el muestreo n-ésimo

es el valor de la variable del proceso en el muestreo n-ésimo

es el valor previo del término integral (en el muestreo (n-1)-ésimo) (también llamado suma integral o "bias")

La suma integral o bias (MX) es la suma acumulada de todos los valores previos del término integral. Después de cada cálculo de $y(n)$ se actualiza la suma integral con el valor de $y(n-1)$ que puede ajustarse o limitarse (para más información, consulte la sección "Variables y rangos"). Por regla general, el valor inicial de la suma integral se ajusta al valor de salida $y(0)$ justo antes de calcular la primera salida del lazo. El término integral incluye también varias constantes tales como la ganancia K_c , el tiempo de muestreo T_s , que define el intervalo con que se recalcula periódicamente el valor de salida del lazo PID, y el tiempo de acción integral T_i , que es un tiempo utilizado para controlar la influencia del término integral en el cálculo de la salida.

1.7.5.3 Término diferencial de la ecuación PID

El término diferencial MD es proporcional a la tasa de cambio del error. La ecuación del término diferencial es la siguiente:

(Ec. 1.15)

Para evitar cambios o saltos bruscos de la salida debidos a cambios de la acción derivativa o de la consigna, se ha modificado esta ecuación bajo la hipótesis de que la consigna es una constante $w = w_0$. En consecuencia, se calcula el cambio en la variable del proceso en lugar del cambio en el error, como puede verse a continuación:

(Ec. 1.16)

o simplificando:

(Ec. 1.17)

Donde:

es el valor del término diferencial de salida del lazo en el muestreo n-ésimo

es la ganancia del lazo

es el tiempo de muestreo del lazo

es el período de diferenciación de lazo (también llamado tiempo de acción derivativa)

es el valor de la consigna en el muestreo n-ésimo

es el valor de la consigna en el muestreo (n-1)-ésimo

es el valor de la variable del proceso en el muestreo (n-1)-ésimo

es el valor de la variable del proceso en el muestreo (n-1)-ésimo

En lugar del error es necesario guardar la variable del proceso para usarla en el próximo cálculo del término diferencial. En el instante del primer muestreo, el valor de $y(n-1)$ se inicializa a un valor igual a $y(0)$.

1.7.5.4 Modos

Los lazos PID del S7-200 no incorporan el control del modo de operación. El cálculo PID sólo se ejecuta si circula corriente hacia el cuadro PID. Por ello resulta el modo "automático" (o "auto") cuando se ejecuta cíclicamente el cálculo PID. Resulta el modo "manual" cuando no se ejecuta el cálculo PID.

La operación PID tiene un bit de historial de circulación de corriente similar a una operación de contador. La operación utiliza el bit de historial para detectar una transición de la circulación de corriente de 0 a 1. Cuando se detecta una transición, la operación ejecuta una serie de acciones destinadas a lograr un cambio sin choques de modo manual a automático. Para evitar choques en la transición al modo automático, el valor de la salida ajustado manualmente deberá entregarse en calidad de entrada a la operación PID (escrita en la entrada para $y(n)$) antes de conmutar a modo automático. La operación PID ejecuta las siguientes acciones con los valores de la tabla del lazo a fin de asegurar un cambio sin

choques entre control manual y automático cuando se detecta una transición de la circulación de corriente de 0 a 1:

- Ajustar la consigna = variable del proceso
- Ajustar la variable del proceso antigua = variable del proceso
- Ajustar la suma integral (MX) = valor de salida

El estado por defecto de los bits de historial PID es "activado". Éste se establece en el arranque de la CPU o cada vez que haya una transición de modo STOP a RUN en el sistema de automatización. Si circula corriente hacia el cuadro PID la primera vez que se ejecuta tras entrar en el modo RUN, entonces no se detectará ninguna transición de la circulación de corriente y, por consecuencia, no se ejecutarán las acciones destinadas a evitar choques en el cambio de modo.

1.7.5.5 Alarmas y operaciones especiales

La operación PID es simple, pero ofrece grandes prestaciones para ejecutar cálculos PID. Si se precisan funciones de postprocesamiento (tales como funciones de alarma o cálculos especiales en base a las variables de lazo), ello deberá implementarse utilizando las operaciones básicas soportadas por la CPU en cuestión.

1.7.5.6 Condiciones de error

A la hora de compilar, la CPU generará un error de compilación (error de rango) y la compilación fallará si los operandos correspondientes a la dirección inicial o al número de lazo PID en la tabla del lazo están fuera de rango.

La operación PID no comprueba si todos los valores de entrada en la tabla del lazo respetan los límites de rango. Es decir, el usuario deberá vigilar que la variable del proceso y la consigna (al igual que la suma integral y la variable del proceso

previa, si se utilizan como entradas) sean números reales comprendidos entre 0.0 y 1.0.

Si se detecta algún error al ejecutar las operaciones aritméticas del cálculo PID se activará la marca SM1.1 (desbordamiento o valor no válido) y se finalizará la ejecución de la operación PID. (La actualización de los valores de salida en la tabla del lazo podría ser incompleta, por lo que se deberán descartar estos valores y corregir el valor de entrada que ha provocado el error matemático antes de volver a ejecutar la operación de regulación PID.)

1.7.6. Metodología de trabajo con autómatas programables

A la hora de abordar un proyecto de automatización es necesario sistematizar el proceso de trabajo.

Para definir esta metodología proponemos el orden que se detalla a continuación.

1.7.6.1. Definir el proceso a automatizar

Para definir la automatización de un proceso a nivel industrial es necesario:

- a) Descripción de la instalación mediante planos o croquis de implantación física de la parte operativa del proceso.
- b) Determinar los actuadores neumáticos, hidráulicos, electrónicos, electromecánicos, electroneumáticos, etc., que intervienen.
- c) Definir los sensores y captadores de señal que intervienen (detectores, finales de carrera, etc.).
- d) Definir, en el tiempo, la función que realiza cada actuador, mediante un diagrama de secuencias o un GRAFCET de primer nivel.
- e) Decidir las medidas de seguridad que debe haber, respetando las normas vigentes de protección del personal. Es necesario tener presente la posible presencia, en el entorno de la máquina, de personal que no conozca el proceso y evitar, en la medida de lo posible, que los problemas de

funcionamiento del automatismo puedan estropear los elementos de la máquina o del proceso.

- f) Prever posibles averías que pueda tener el proceso y su tratamiento.
- g) Tener presentes las posibles interferencias con el entorno.
- h) Prever el mando manual, que puede ser muy interesante para las puestas en marcha o para resolver problemas de funcionamiento. Incluso algunas instalaciones se hacen con la posibilidad de mando manual sin intervención del autómeta.
- i) Determinar las formas de diálogo del proceso con el operador (señales ópticas, sonoras, displays, etc.).
- j) Definir las normas para el mantenimiento de la instalación.

1.7.6.2. Dibujar el esquema eléctrico de potencia de la parte operativa de la instalación

1. Escoger la normativa a usar (DIN, CNOMO, JIC, etc.).
2. Dibujar el esquema eléctrico de potencia, teniendo presente la tensión normalizada de la red de alimentación. En las instalaciones con elementos no eléctricos es necesario prever otros tipos de alimentaciones de potencia (por ejemplo, aire comprimido en instalaciones con actuadores neumáticos).
3. Definir las alimentaciones de todos los actuadores y sensores usados.

1.7.6.3. Elección del autómeta

La elección será en función de diversos condicionantes, entre los que podemos destacar:

- a) Fabricante con un buen servicio de asistencia técnica.
- b) Autómeta conocido por el personal de mantenimiento de la instalación.
- c) El tipo de programación a usar (lenguajes disponibles, potencia de cálculo, soporte de software, entre otras características)

- d) Número de entradas y salidas a usar y su alimentación.
- e) Polaridad de las cartas de entrada del autómata (PNP o NPN) si se usan detectores o captadores en corriente continúa.
- f) Tipos de salidas a usar (relé, transistor o triac) según el tipo de alimentación de los elementos a conectarle. En el caso de las cargas en corriente continua es necesario prever la polaridad.
- g) La carga a soportar por las cartas de salida debe ser la adecuada en función de la alimentación escogida.
- h) Considerar futuras ampliaciones (aumentar el número de entradas y salidas, aumento de la necesidad de memoria para la mejora del programa, redes de comunicación, etc.).
- i) Datos de la unidad central (tiempo de scan, tipo de memoria, etc.).
- j) Criterios económicos.

1.7.6.4. Asignación de las entradas y salidas de información y control

Es necesario asignar a cada captador y a cada actuador que interviene en el proceso controlado por el autómata, una entrada o una salida, teniendo presente:

1. Consultar en el manual técnico del autómata escogido, el mapa de memoria ocupado por las entradas y salidas a usar, y así definir su asignación.
2. Si se trata de entradas/salidas analógicas o digitales. En el caso de entradas y salidas analógicas, el número de entradas o salidas por tarjeta suele ser muy reducido y es necesario realizar cuidadosamente el conexionado siguiendo las indicaciones de los fabricantes del captador y del autómata.
3. En principio las entradas y salidas de información se podrían conectar en cualquier orden, pero es conveniente agruparlas teniendo presente su implantación física en la máquina, de manera que los esquemas de conexión sean fáciles de seguir.
4. La mayoría de autómatas tienen un borne común para cada bloque de entradas o salidas; por tanto, es necesario que todas las entradas o salidas de un bloque trabajen a la misma tensión y con un punto común. En el

caso de entradas en corriente continua, este punto común corresponde a una determinada polaridad.

5. Muchos autómatas admiten entradas y salidas remotas; puede ser interesante hacer concentración por proximidad geográfica, con lo cual el número de hilos a transportar será menor. El refresco (actualización de las tablas de imágenes) de las entradas y salidas remotas suele ser más lento. Por tanto, no es conveniente usar tarjetas remotas para funciones que dependan fuertemente del tiempo (seguridad, precisión).
6. En algunos autómatas, hay entradas y salidas pensadas para la gestión de emergencias (programas externos al graficet, rutinas de interrupción, etc.). En cualquier caso todo lo que implique situaciones de emergencia debe dejar el proceso en posición de parada segura sin intervención del automático, informando, además, a éste para que tome las medidas previstas en el programa de control de paradas de emergencia.
7. Prever aproximadamente, un 10% de entradas y salidas libres para futuras modificaciones.

1.7.6.5. Dibujar el esquema eléctrico de conexión del automático a la red eléctrica

Es necesario tener presente:

- a) La puesta en marcha del automático, en función de la tensión de alimentación de la unidad central, y previendo un buen aislamiento del automático contra corrientes de defecto. La corriente de activación de las entradas de los autómatas es un valor muy pequeño (entre 5 y 15 mA) por tanto, un ligero defecto de aislamiento puede provocar la activación de una entrada sin que los dispositivos de protección contra corrientes de defecto lo detecten. En caso de que las entradas se alimenten en corriente alterna se puede usar un interruptor diferencial de alta sensibilidad (10 mA) o incluso se puede conseguir una sensibilidad más adecuada usando un diferencial tetrapolar y haciendo pasar los conductores de alimentación dos veces tal como muestra la figura

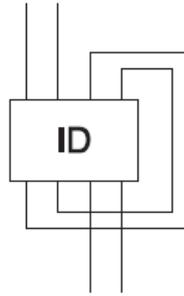


Fig. 1.50: Interruptor tetrapolar

En caso de que las entradas se alimenten en corriente continua, habitualmente en sistemas de red aislada, no se pueden proteger con interruptores diferenciales y es necesario usar vigiladores de intensidad de defecto. Los vigiladores de uso normal no permiten tampoco la detección de fugas tan pequeñas y es necesario usar detectores de asimetría.

- b) La alimentación de las cartas de entradas y salidas. En algunos casos estas cartas pueden alimentarse de la propia fuente de alimentación del autómata.
- c) Dibujar los esquemas eléctricos de conexión de las cartas de entradas y salidas asignadas.
- d) Algunos autómatas requieren una secuencia determinada en la puesta en tensión de los diferentes elementos. Por ejemplo, puede tenerse que alimentar primero la unidad central que las cartas de entradas y salidas, etc.

1.7.6.6. Diseñar los ciclos de funcionamiento previstos

En general se deben prever dos ciclos de trabajo:

1. El ciclo manual, usado en la puesta en marcha para verificar el correcto funcionamiento de cada uno de los actuadores del proceso. El proceso está bajo control del operador y se ejecuta etapa a etapa, mediante los elementos de mando manual previstos en la instalación. Este ciclo también se usa para resolver problemas de puesta a punto y averías de funcionamiento.

2. El ciclo automático, para realizar el proceso de producción de la máquina o instalación. Según el tipo de instalación este proceso puede ser:
 - 2.1. Funcionamiento ciclo a ciclo, que requiere la intervención del operador para iniciar cada ciclo de trabajo. En algunos casos es necesario proteger el funcionamiento contra el hecho de que el operador mantenga apretado (o bloqueado) el inicio de ciclo; en este caso se trata de un funcionamiento ciclo a ciclo con antirrepetición.
 - 2.2. Ciclo continuo, que requiere la intervención del operador sólo para el inicio del primer ciclo.
 - 2.3. Ciclo de vaciado, para cuando se necesite vaciar de piezas la máquina o instalación.

1.7.6.7. Diseñar y gestionar los defectos previstos y las seguridades necesarias para un correcto funcionamiento de la instalación

En general es necesario prever el tratamiento de:

- a) Parada de emergencia: Provoca una parada total instantánea de la máquina.
- b) Fallos de alimentación: El tratamiento de este defecto varía según el tipo de instalación. Es necesario tener en cuenta tanto el fallo de la tensión de alimentación del autómatas como la alimentación del circuito de potencia que puede ser de diversos tipos (eléctrica, aire comprimido, etc.).
- c) Ciclo fuera de tiempo. Sea a causa del fallo de un accionador o de un captador.

Para cada uno de los actuadores, se pueden prever tres tipos de defectos:

1. Defecto de posición: Cuando se detecta un error en el posicionamiento del actuador. Por ejemplo, cuando los detectores de final de avance y final de retroceso de un cilindro, dan señal simultáneamente.
2. Defecto de accionamiento: Por ejemplo, cuando un interruptor magnetotérmico se abre por una sobrecarga en el accionador que protege.

3. Defecto de tiempo del ciclo de funcionamiento del actuador: Por ejemplo, cuando el desplazamiento de un cilindro sobrepasa el tiempo estándar de realización de su ciclo.

Para gestionar los defectos definidos en la instalación es necesario clasificarlos según la actuación que provocan en el proceso:

- a) Defectos que provocan una parada total
- b) Defectos que provocan la parada a final de ciclo (en ciclos automáticos)
- c) Defectos solamente informativos, ya que no provocan ninguna situación de peligro ni emergencia. Por ejemplo, la falta de piezas para continuar un proceso de montaje.

De todas maneras, será necesario adecuar a cada instalación un tratamiento específico de estos defectos.

1.7.6.8. Implementar el programa con el software adecuado para mejorar el mantenimiento y control de productividad de la instalación (programa SCADA)

Si bien no es necesario para el funcionamiento de la instalación, por criterios de competitividad, de mejora de la productividad y de mejora de la calidad del producto, es conveniente en instalaciones de cierta envergadura, controlar el proceso de producción con la ayuda de programas desarrollados específicamente para: obtener datos de productividad, gestionar adecuadamente los defectos que se producen en las instalaciones, visualizar y controlar diversas etapas del proceso productivo y establecer y mejorar programas de mantenimiento preventivo, en función de los datos recogidos.

Estos programas habitualmente se instalan en un ordenador tipo PC conectado en red con el autómatas o autómatas que gobiernan la instalación. Algunos fabricantes ofrecen equipos con aplicaciones similares pero que no son verdaderos ordenadores y, por tanto, habitualmente tienen un precio menor; en cambio,

requieren un ordenador (que puede ser el mismo que se usa para programar el autómata) para su configuración.

1.8 Accionamientos eléctricos de velocidad variable

Desde que se iniciaron los estudios para el control de máquinas de corriente directa (c.d), los accionamientos eléctricos de velocidad variable han evolucionado favorablemente, de tal manera que son empleado en un sin número de aplicaciones industriales de velocidad variable y fija. Dentro de esta evolución han aparecido los accionamientos eléctricos empleando máquinas de corriente alterna (c.a.) que permiten obtener un mejor desempeño, simplicidad y confiabilidad en cada una de las aplicaciones industriales.

Tomando en cuenta el punto de vista de diseño la máquina c.d. presenta muchas desventajas cuando se la compara con otras máquinas eléctricas, especialmente con las máquinas de c.a., los motores inducción jaula de ardilla de c.a. tienen varias ventajas significativas en la robustez de su diseño: tienen un reducido tamaño, prácticamente libres de mantenimiento, pueden ser instalados en casi cualquier tipo de medio ambiente y los costos son mucho menores que lo de los motores de c.d. No obstante los motores de c.a. presentan una desventaja muy importante: la ecuación del par electromagnético se encuentra acoplada, por lo que el control de estas máquinas es más complicado.

El desarrollo en varios aspectos (la electrónica de potencia, control digital y la teoría del control) han permitido contrarrestar esta desventaja, logrando así que sea más común encontrar este tipo de motores en las industrias cumpliendo con las exigencias de los procesos industriales.

Para clasificar los accionamientos eléctricos se toma en cuenta la evolución de las máquinas, en la industria se emplea las siguientes técnicas de control en accionamiento eléctrico:

- Control escalar o voltaje-frecuencia

- Control vectorial.
- Control directo del par.

Es importante tener en cuenta lo que nos permiten realizar cada uno de estos métodos o estrategias de control y clasificarlas.

1.8.1 El control escalar o control voltaje-frecuencia (v/f)

Permite mediante la variación del voltaje y la frecuencia en las señales de alimentación del motor, controlar la velocidad y el par de la máquina. La velocidad de sincronía del motor se puede controlar mediante las variaciones en la frecuencia del voltaje estator, mientras que el par electromagnético puede ser controlado al regular la magnitud del voltaje y la frecuencia en las terminales del estator.

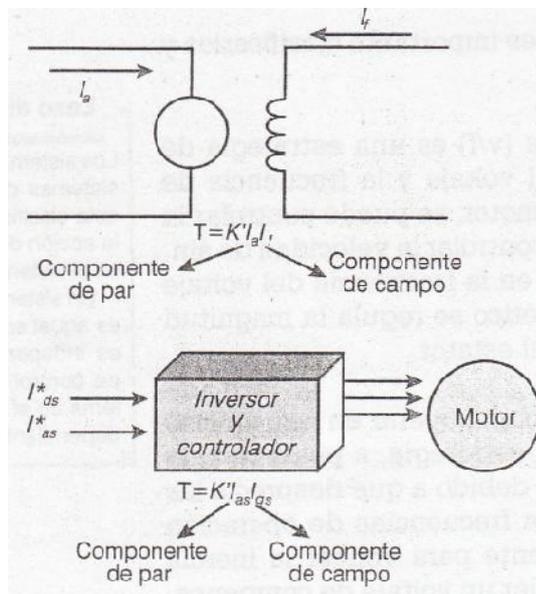
Este método presenta la ventaja de poder operar en lazo abierto sin un sensor de velocidad.

A pesar de ser sencillo presenta desventajas debido a la caída de tensión en la máquina debido a las bajas frecuencias de operación (bajas velocidades), por lo cual el par no es el suficiente para vencer la inercia (depende de la carga), haciéndose necesario el cálculo de un voltaje de compensación pero aun así es incapaz de cumplir con altos desempeños, su uso es ideal en aplicaciones sin exigencias de par y de velocidad, su control se lo realiza en estado permanente de la máquina.

1.8.2 El control vectorial

Es una de las nuevas técnicas de control propuestas por F. Blashke y K. Hass, esta permite la operación del motor de inducción en todo el rango de velocidad con la posibilidad de poder eliminar a los accionamientos de motores de corriente continua por el control de los motores de inducción, teniendo una dinámica similar.

Este método está basado en la orientación del campo magnético de una máquina en ejes de referencia rotatorios, esto permite desacoplar el flujo magnético del rotor del par electromagnético logrando un comportamiento con dinámica semejante al de la máquina de corriente directa.



En la figura 1.51 Analogía entre control vectorial y el control de una máquina de corriente directa.

1.8.2.1 El control vectorial tiene dos métodos:

1. Métodos de orientación directa del campo, en los cuales se emplean sensores de flujo o modelos, estos son utilizados para calcular la magnitud y posición del vector de flujo del rotor, permitiendo definir así su orientación en un sistema de coordenadas ortogonales.

2. Métodos indirectos, empleando la velocidad de deslizamiento para obtener la posición del flujo del rotor y realizar su orientación.

Para ambos métodos, es necesario realizar correctamente la orientación del vector de flujo del rotor, de lo contrario existe una degradación en el control vectorial de la velocidad del motor.

1.8.3 El control directo del par

Utilizado en el control de motores de accionamientos de c.a., permite controlar con precisión la velocidad y el par del motor sin emplear técnica de modulación alguna, empleando únicamente una tabla de selección.

Para el DTC se utilizan como variables controladas el flujo del estator y el par electromagnético, en el DTC es común el empleo de procesadores de señales digitales de alta velocidad (DSP) que permitan actualizar los cálculos del estado del motor.

Consecuentemente el control vectorial logra el desacople del motor a través del empleo de un modelo rotatorio de la máquina, mientras que el DTC consigue el desacople empleando los voltajes que alimentan al motor los cuales son generados en el inversor.

1.9 Variador de velocidad

Este instrumento nos permite realizar un control directo del par (DTC) obteniendo un comportamiento dinámico excelente, ya que se logra una variación en el campo electromagnético de una forma directa y sencilla. Si lo comparamos con el control vectorial el algoritmo del DTC es menos complejo y tiene menor dependencia a la variación de parámetros del motor.

La utilización de variadores de frecuencia controlando directamente el par es cada vez más frecuente para accionamientos eléctricos en motores de corriente alterna como un control de altos desempeños en velocidad variable.

A continuación se listan las principales ventajas del DTC:

- No es necesaria la transformación de coordenadas.
- No se requiere un bloque de modulación de voltaje.
- No requiere circuitos de desacoplamiento de voltaje.
- Ausencia de controladores.

- La respuesta del par es muy rápida en comparación con otros métodos.
- Menos sensible a variaciones de parámetros.
- Su esquema es más sencillo que el de otros métodos.

Las desventajas del DTC son:

- Algunos problemas en el arranque y operación a bajas velocidades.
- Requiere estimadores de flujo y par (aunque otros controladores también tienen esta desventaja).
- Frecuencia de conmutación variable.
- Valores altos de rizado en el par.

El motor de c.d. de excitación separada permite manejar una amplia gama de velocidad, siendo el control de velocidad más simple y menos costosa en comparación con los accionamientos de c.a. La electrónica empleada en los accionamientos de corriente continua es muy simple, lo cual representa una gran ventaja, sin embargo el costo inicial y de mantenimiento de los motores de c.d. es alto.

El motor jaula de ardilla de c.a. no tiene conmutador por lo que puede operar en ambientes industriales a alta potencia con velocidad variable sin requerir mantenimiento periódico, es menos voluminoso, más eficiente y de menor costo.

1.9.1 Razones para emplear variadores de velocidad

Existen dos razones principales para el empleo de variadores de velocidad:

- El control de procesos y,
- El ahorro de la energía.

1.9.1.1 El control de procesos

1.9.1.1.1 El ajuste de la velocidad como una forma de controlar un proceso

A continuación se listan las diversas ventajas proporcionadas por el empleo de variadores de velocidad en el control del proceso:

- Operación más suave.
- Control de la aceleración.
- Distinta velocidad de operación para cada fase del proceso.
- Compensación de variables de proceso cambiantes.
- Operación lenta para fines de ajuste o prueba.
- Ajuste de la tasa de producción.
- Posicionamiento de alta precisión.
- Control del par (torque) o de la tensión mecánica.

1.9.1.2 El ahorro de la energía

Un equipo accionado mediante un variador de velocidad generalmente emplea menos energía que si dicho equipo fuera activado a velocidad constante. Los ventiladores y bombas representan las aplicaciones más importantes en las cuales los variadores de velocidad permiten ahorrar energía. Por ejemplo, cuando un ventilador es impulsado por un motor que opera a velocidad fija, el flujo de aire producido puede ser mayor que el necesario. En este caso el flujo podría regularse mediante una válvula de control, sin embargo resulta mucho más eficiente regular dicho flujo controlando la velocidad del motor en lugar de restringirlo por medio de la válvula.

Los variadores de velocidad están directamente ligados a la mejora en el control de procesos, y la necesidad de implementar mejores variadores se puede ver reflejada en los costos de producción y calidad de los productos generados.

Debido a esto se ha buscado inicialmente la creación de mejores variadores de velocidad, y entre los más novedosos se encuentra:

- El control vectorial y,
- El control directo del par.

Hoy en día el ahorro energético es de suma importancia dentro de la industria y, con la ayuda del variador se puede también controlar la cantidad de energía consumida durante un proceso.

Nuestro caso constituye un ejemplo muy interesante al tratarse del empleo de un variador de velocidad para el control de una bomba.

Cuando se tiene un motor directamente conectado a una bomba el consumo de energía del motor es siempre constante y el flujo del caudal de la bomba se puede regular mediante una válvula la cual es la responsable de dicho caudal, pero a pesar de tener el control del caudal, el consumo de la energía del motor sigue constante.

La solución más apropiada para el ahorro energético es el empleo de un variador de velocidad, el cual permite tener una regulación de la velocidad del motor cambiando el consumo de energía de éste dependiendo de la velocidad desarrollada.

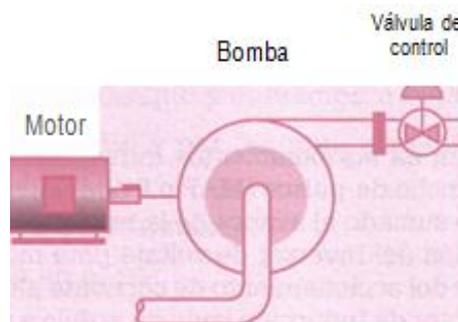


Figura 1.52: Esquema de un montaje motor-bomba.

1.9.2 Tipos de variadores de velocidad

En términos generales puede decirse que existen tres tipos básicos de variadores de velocidad:

- Mecánicos,

- Hidráulicos y
- Eléctrico-Electrónicos.

A su vez cada uno de estos tipos incluye varios subtipos, los cuales se describen a continuación.

Recordemos que los variadores más antiguos fueron los mecánicos, que se emplearon originalmente para controlar la velocidad de las ruedas hidráulicas de molinos, así como la velocidad de las máquinas de vapor.

1.9.2.1 Variadores mecánicos

a) Variadores de paso ajustable: estos dispositivos emplean poleas y bandas cuyo diámetro puede ser modificado.

b) Variadores de tracción: transmiten potencia a través de rodillos metálicos. La relación de velocidades de entrada/salida se ajusta moviendo los rodillos para cambiar las áreas de contacto entre ellos.

1.9.2.2 Variadores hidráulicos

a) Variador hidrostático: consta de una bomba y un motor hidráulicos (ambos de desplazamiento positivo). Una revolución de la bomba o el motor corresponde a una cantidad exactamente definida de volumen del fluido manejado. La velocidad puede ser controlada mediante la regulación de una válvula de control, así como cambiando el desplazamiento de la bomba o el motor.

b) Variador hidrodinámico: emplea aceite hidráulico para transmitir par mecánico entre un impulsor de entrada (sobre un eje de velocidad constante) y un rotor de salida (sobre un eje de velocidad ajustable). También es llamado acoplador hidráulico de llenado variable.

c) Variador hidrovicoso: consta de uno o más discos conectados con un eje de entrada, los cuales estarán en contacto físico (pero no conectados mecánicamente) con uno o más discos conectados al eje de salida. El par mecánico (torque) es transmitido desde el eje de entrada al de salida a través de la película de aceite entre los discos. Así, el par transmitido es proporcional a la presión ejercida por el cilindro hidráulico que presiona los discos.

A los variadores de velocidad mecánicos e hidráulicos generalmente se los conoce como transmisiones cuando se emplean en vehículos, equipo agroindustrial o algunos otro tipo de maquinaria.

1.9.2.3 Variadores eléctrico-electrónicos

Tenemos cuatro categorías de variadores de velocidad eléctrico-electrónicos:

- Variadores para motores de c.d.,
- Variadores de velocidad por corrientes de Eddy,
- Variadores de deslizamiento,
- Variadores para motores de c.a., mejor conocidos como variadores de frecuencia.

Este tipo de variadores eléctrico-electrónicos incluyen tanto el controlador como el motor eléctrico, sin embargo es práctica común emplear el término variador únicamente para el controlador.

a) Variadores para motores de c.d.: estos variadores permiten controlar la velocidad de motores de c.d. serie, derivación, compuesto y de imanes permanentes. Para cualquiera de las máquinas anteriores se cumple la siguiente expresión:

(Ec.

1.18)

Donde V es el voltaje terminal (V), K es la constante de la máquina, Φ es el flujo magnético producido por el campo (Wb) y ω es la velocidad mecánica (rpm).

Despejando de Ec. 1.10 la velocidad mecánica, se tiene que:

$$= \omega / (K \phi) \quad (\text{Ec. 1.19})$$

Con la ayuda de esta ecuación puede observarse que la velocidad mecánica de un motor de c.d. es directamente proporcional al voltaje terminal (V) e inversamente proporcional al flujo magnético (ϕ), el cual a su vez depende de la corriente de campo (I_f). De esta forma este tipo de variadores puede controlar la velocidad de un motor de c.d.: controlando su voltaje terminal o bien manipulando el valor de la corriente de campo.

b) Variadores por corrientes de Eddy: un variador de velocidad por corrientes de Eddy consta de un motor de velocidad fija y un embrague de corrientes de Eddy. El embrague contiene un rotor de velocidad fija (acoplado al motor) y un rotor de velocidad variable, separados por un pequeño entrehierro. Cuenta también, con una bobina de campo cuya corriente puede ser regulada, la misma que produce un campo magnético que determinará el par mecánico transmitido del rotor de entrada al rotor de salida. De esta forma, a mayor intensidad de campo magnético mayor par y velocidad transmitidos, y a menor campo magnético menores serán el par y la velocidad en el rotor de salida. El control de la velocidad de salida de este tipo de variadores generalmente se realiza por medio de lazo cerrado, utilizando como elemento de retroalimentación un tacómetro de c.a.

c) Variadores de deslizamiento: este tipo de variadores se aplica únicamente para los motores de inducción de rotor devanado. En cualquier motor de inducción, la velocidad mecánica (ω_m) puede determinarse mediante la siguiente expresión:

$$\omega_m = (1 - s) \omega_s \quad (\text{Ec. 1.20})$$

Donde s es el deslizamiento del motor, cuyo valor oscila entre 0 y 1. De esta forma, a mayor deslizamiento menor velocidad mecánica del motor. Se puede incrementar el deslizamiento al aumentar la resistencia del devanado del rotor, o al reducir el voltaje en el devanado del mismo. De esta forma se puede conseguir el control de la velocidad en los motores de inducción de rotor devanado. Sin embargo, este tipo de variadores es de menor eficiencia que otros, por esta razón tiene muy poca aplicación en la actualidad.

d) Variadores para motores de CA (variadores de frecuencia): los variadores de frecuencia (en inglés, AFD = Adjustable Frequency Drive, VFD = Variable Frequency Drive) permiten controlar la velocidad tanto de motores de inducción (jaula de ardilla y rotor devanado) como de los motores síncronos mediante el ajuste de la frecuencia de alimentación al motor.

Para el caso de un motor síncrono, la velocidad se determina mediante la siguiente expresión:

$$(Ec. 1.21)$$

y cuando se trata de motores de inducción (de jaula de ardilla o de rotor devanado) se tiene

$$(Ec. 1.22)$$

Donde n_s es la velocidad síncrona (rpm), n_m es la velocidad mecánica (rpm), f es la frecuencia de alimentación (Hz), s es el deslizamiento (adimensional) y p es el número de polos.

Como se habrá podido notar en las expresiones anteriores, la frecuencia y la velocidad son directamente proporcionales, de tal manera que al aumentar la frecuencia de alimentación al motor se incrementará la velocidad de la flecha, y al reducir el valor de la frecuencia disminuirá la velocidad del eje. Al manipular la frecuencia de alimentación al motor, estos variadores tienen como objetivo controlar la velocidad de la máquina.

Este tipo de variadores mantienen la razón voltaje/frecuencia (V/Hz) constante entre los valores mínimo y máximo de la frecuencia de operación, esto con la finalidad de evitar la saturación magnética del núcleo del motor y además porque el hecho de operar el motor a un voltaje constante por encima de una frecuencia dada (reduciendo la relación V/Hz) disminuye el par del motor y la capacidad del mismo para proporcionar potencia constante de salida.

1.10 Características mecánicas de las cargas

Estas características son determinadas a partir de la relación de dependencia que existe entre la velocidad de rotación y el par desarrollado por el mecanismo, son importantes en la industria tanto para la clasificación de tipos de cargas así también para la clasificación de máquinas eléctricas, esto permite tener conocimiento de los puntos de operación de cada uno de los sistemas diseñados.

Utilizando una expresión empírica que permite trazar una trayectoria de dicha relación, se puede realizar una clasificación de los tipos de cargas; la expresión está definida como:

$$T = T_f + T_v \left(\frac{v}{v_n} \right)^m, \quad (\text{Ec. 1.23})$$

Donde:

T es el par del mecanismo de producción.

T_f es el par de fricción.

T_v es el par a velocidad nominal.

v_n es la velocidad nominal.

v es la velocidad.

m es el factor que caracteriza el cambio del par resistente al variar la velocidad.

Aplicando esta expresión se pueden determinar cuatro características básicas, que dependen del valor término m , como se explica a continuación:

1. No dependiente de la velocidad, cuando $m = 0$: el par desarrollado no depende de la velocidad, esta característica se encuentra en sistemas como grúas y bombas de émbolo entre otros.

2. Lineal, cuando $m = 1$: existe una relación lineal entre la velocidad y el par desarrollado, la expresión se puede simplificar cuando el par de rozamiento es igual a cero. El caso es típico en un generador con excitación independiente.

3. Parabólica, cuando $m = 2$: dependencia cuadrática del par desarrollado y la velocidad. Se la conoce como tipo ventilador, aparece también en cargas como bombas centrífugas y hélices.

4. Decreciente no-lineal, cuando $m = -1$: se da una variación que es inversamente proporcional entre el par desarrollado y la velocidad. Presente en fresadoras, tornos, bobinadoras entre otras.

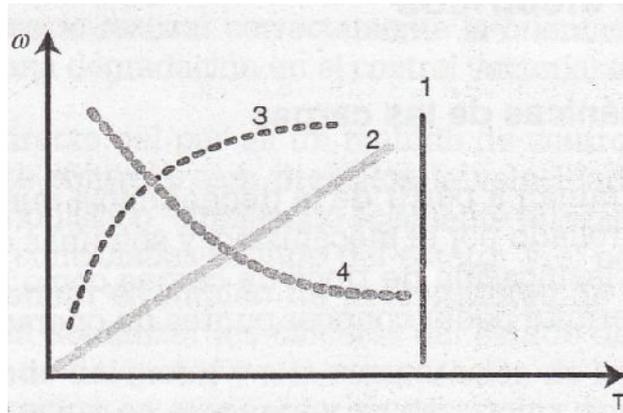


Figura 1.53: Comportamiento del par y de la velocidad.

1.11 Características mecánicas de máquinas eléctricas

Cuando se toma en cuenta el desempeño de una máquina eléctrica rotatoria se puede definir las características mecánicas, estas pueden ser clasificadas de acuerdo con los siguientes comportamientos.

1. Característica rígida: se tiene cuando el par no afecta a la velocidad, está presente en los motores síncronos.

2. Característica semi-rígida: existe cuando la variación del par genera una variación de la velocidad; esto sucede en los motores asíncronos.

3. Característica suave: aparece al cambiar el par resulta un cambio drástico de la velocidad; presente en los motores de excitación serie.

En la figura 1.54 se muestra el comportamiento de cada una de las características.

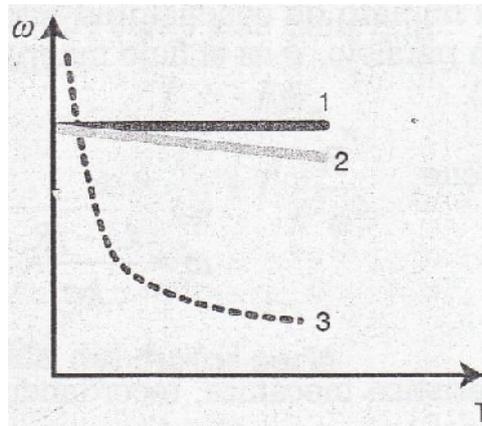


Figura 1.54: Comportamiento de las características mecánicas

1.12 Interfaz Hombre-Máquina (HMI)

Permite la interacción del hombre con las máquinas a través de medios computacionales, esta interfaz es la que permite que el usuario u operador de un sistema de control o supervisión, interactúe con los procesos.

Un sistema HMI no es más que una ventana del proceso. El HMI puede ser visualizado en dispositivos especiales como paneles de operador o en una computadora. A los sistemas HMI visualizados en computadoras se los conoce también como software HMI o de monitoreo y control de supervisión.

Por medio de dispositivos como tarjetas de entrada/salida en la computadora, PLC's (Controladores Lógicos Programables), RTU's (Unidades Remotas de I/O) o DRIVES's (Variadores de velocidad de motores), las señales de los procesos son conducidas al HMI mediante una comunicación que éste sea capaz de entender.

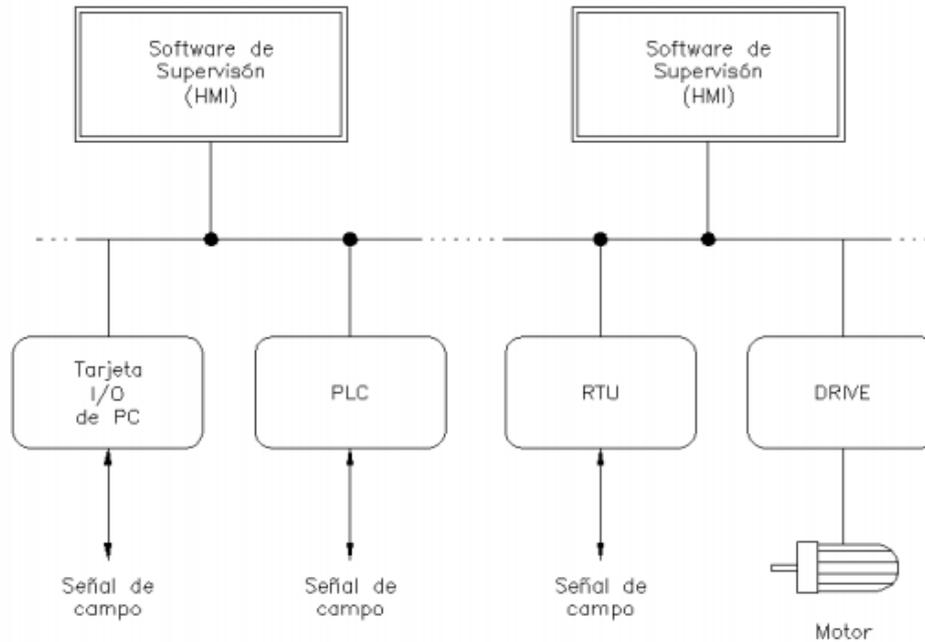


Figura 1.55: Elementos principales de un HMI

Un sistema HMI es parte integral de un sistema SCADA ya que está encargado de supervisar controlar y adquirir datos por medio de computadores que permiten realizar dichas funciones a distancia dentro de cualquier tipo de instalación.

1.12.1 Funciones de un software HMI.

Dentro de las principales funciones que puede realizar un software HMI tenemos las siguientes:

- Monitoreo
- Supervisión
- Alarmas
- Control
- Históricos

1.12.1.1 Monitoreo

Es el arte de obtener, almacenar y mostrar datos de la planta en tiempo real, de forma continua y confiable. Los datos pueden ser mostrados como números, texto o gráficos que permitan una lectura más rápida y de fácil interpretación.

1.12.1.2 Supervisión

Permite juntamente con el monitoreo la posibilidad de ajustar las condiciones de trabajo del proceso directamente desde la computadora.

1.12.1.3 Alarmas

Es la posibilidad de reconocer eventos que no se consideran normales dentro del proceso y reportarlos. No se los considera normales a los eventos sucedidos fuera de los límites de control preestablecidos.

Estos eventos se pueden almacenar en el sistema para su posterior análisis

1.12.1.4 Control

Es la facultad de aplicar algoritmos que ajusten los valores del proceso con el fin de mantener los mismos dentro de límites establecidos. Ejecutando así acciones como: abrir o cerrar válvulas, arrancar o parar bombas, etc.

El control va más allá de la supervisión desechando la necesidad de la interacción humana. Al correr esta función desde un software en una PC puede quedar limitada por la confiabilidad que quiera obtenerse del sistema.

1.12.1.5 Históricos

Es la capacidad de realizar muestreo y almacenamiento en archivos, de los datos del proceso a una determinada frecuencia. Es de gran importancia el almacenamiento de datos ya que con un posterior análisis es una poderosa herramienta para la optimización y corrección de procesos.

La información es procesada por medios como: reportes, gráficos de tendencia, historia de variables, cálculos, predicciones, detección de fugas, etc.

1.12.2 Tareas del software HMI

Entre las principales tareas tenemos las siguientes:

- Permitir una comunicación con dispositivos de campo.
- Actualizar una base de datos “dinámica” con las variables del proceso.
- Visualizar las variables mediante pantallas con objetos animados.
- Permitir que el operador pueda enviar señales al proceso, mediante botones, controles ON/OFF o ajustes continuos con el mouse o teclado.

- Supervisar niveles de alarma y alertar/actuar en caso de que las variables excedan los límites normales.
- Almacenar los valores de las variables para análisis estadístico y/o control.
- Controlar en forma limitada ciertas variables del proceso.

1.12.3 Tipos de software HMI para PC

Principalmente existen dos tipos principales de software que son:

- INTOUCH
- TWIDO SOFD

1.12.3.1 Lenguaje de programación visual

Este tipo se utiliza para desarrollar software HMI de acuerdo a los requerimientos del usuario. Cuando el software ha sido generado el usuario ya no podrá reprogramarlo. VISUAL BASIC constituye un ejemplo de este tipo de lenguaje.

1.12.3.2 Paquetes de desarrollo orientados a tareas HMI

Son utilizados para desarrollar un HMI a medida del usuario y/o ejecutar un HMI desarrollado para el usuario. La diferencia de este con el anterior radica en que el usuario tiene la posibilidad de poder reprogramarlo. Un ejemplo de estos paquetes es WONDERWARE.

1.13 Descripción del prototipo a construir

El módulo didáctico para medir y controlar caudal y nivel tiene la finalidad fundamental de proveer al laboratorio de mecánica de un prototipo de automatización para el aprendizaje de los estudiantes que realizan prácticas en este laboratorio.

El módulo consta de dos tanques: uno para reserva del líquido que tiene una capacidad de 50 litros y el otro que es el tanque principal en el cual se realiza la medición y control de nivel de agua, con una capacidad de 20 litros, los dos son contruidos en acrílico.

También posee una bomba de $\frac{1}{2}$ HP de potencia con su respectiva protección, switch de presión (presostato), la cual se encarga de impulsar el agua desde el tanque de reserva.

Existe un PLC que se encarga de realizar las diferentes técnicas de control ayudado con la información brindada por un transmisor de presión hidrostática, un transmisor de caudal tipo turbina y las electroválvulas.

Además posee un variador de frecuencia el cual conjuntamente con las electroválvulas se encargaran de controlar a la bomba aumentando o disminuyendo el caudal generado por la bomba al variar su velocidad.

La medición del nivel se hace con el sensor de presión hidrostática conectado al PLC mientras que la medición de caudal se hace por medio de un transmisor de caudal tipo turbina también conectado al PLC para controlar todo el proceso.

El PLC necesita un módulo de entradas analógicas, tanto el PLC como el módulo analógico funcionan a 24 voltios por lo que también es necesario el empleo un transformador (POWER 24VDC/2.5A).

El monitoreo y control se lo realizará de forma remota a través de una PC por medio de un HMI desarrollado en intouch.

CAPITULO II

DISEÑO Y CONTRUCCION DEL MODULO

2.1 Estructura del módulo

El módulo ha sido diseñado y construido siguiendo la metodología de trabajo expuesta anteriormente, se tratará cada uno de los elementos a utilizar.

Se describe toda la parte operativa del proceso desde el diseño del soporte que se lo realizó pensando en la óptima ubicación de los elementos que constituyen el módulo, de tal manera que sean de fácil acceso y manipulación.

El soporte está construido como se puede observar en la figura 2.1 (a) de tubo rectangular de: (40 x 20 x 2.5) mm, a los cuales se encuentran ancladas planchas de MDF de 10 [mm] de espesor. En conjunto forman una estructura suficiente para soportar a cada uno de los elementos del módulo, todo el panel está pintado de color blanco esmaltado.

De este modo han quedado visibles y accesibles tanto los elementos de control como también los elementos de mando, así como también de los tanques de acrílico para reserva y para el de medición.

El hecho de haber implementado una computadora al prototipo da la gran ventaja de ser totalmente autónomo dentro del laboratorio, esto implica tener su propio software y hardware con los cuales funcionará, razón por la cual también se ha dispuesto de puertas de acrílico con sus respectivas seguridades para cada uno de los tres compartimentos donde estará ubicados los elementos de control eléctrico, el CPU y el monitor respectivamente ver figura 2.1 (a).

También se detallan rápidamente los instrumentos utilizados para el control dentro del tablero además de los elementos mecánicos que conforman el prototipo como son los sensores, electroválvulas, etc. mostrados en el esquema de la figura 2.1 (b) en sus respectivas posiciones.



Figura 2.1(a): Módulo de pruebas (Real)

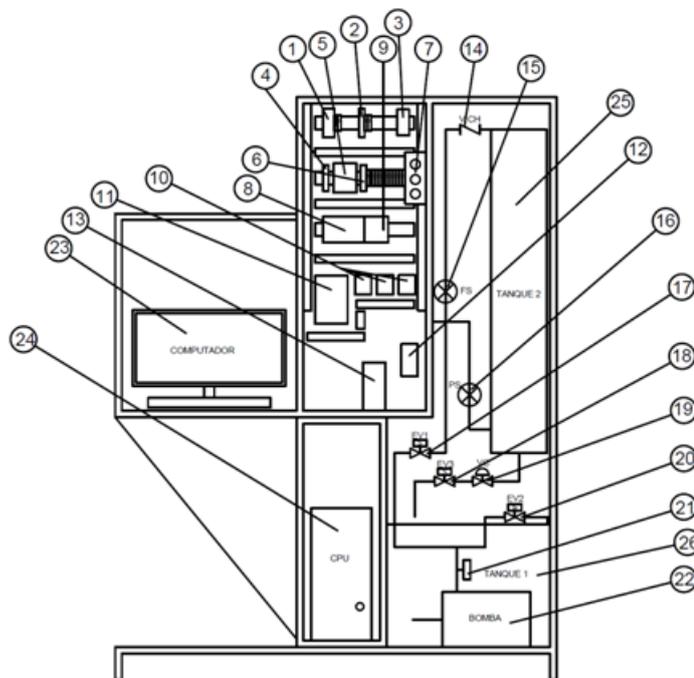


Figura 2.1 (b): Módulo de pruebas (Esquema)

1. Breaker bifásico de 5 A Siemens.
2. Breaker monofásico 5 A Siemens.

3. Adaptador de voltaje. Entrada 110VAC. Salida 15 VDC.
4. Fusible de protección para la fuente 1A.
5. Fuente para 24V Siemens Logo Power. Entrada AC100-240 V. Salida 24VDC; 2.5 Amperios.
6. Fusible de protección para el PLC 1 A.
7. Panel de luces de 24V (Amarilla, Verde y Roja).
8. PLC Siemens S7200 CPU 224 DC/DC/DC. Con cable de conexión PPI/USB.
9. Módulo analógico Siemens EM 235.
10. Relés de estado sólido. Entrada 4-30 VDC. Salida 110-220 VAC.
11. Variador de frecuencia Sinamics G110 3/4 HP con Panel de Control BOP.
12. Tomacorriente para 110V.
13. Regulador de voltaje NICOMAR 110VAC.
14. Válvula check.
15. Transmisor de flujo marca Kobold, modelo DRS-0350..K0000. Rango de medición de 2 a 40 litros por minuto. Rango de salida pulsos NPN de 0-320 Hz.
16. Transmisor de presión marca Endress+Hauser; modelo P MC131-A32F1D10. Rango de medición de 0 a 100 mbar. Rango de salida 4-20mA.
17. Electroválvula 1.
18. Electroválvula 3.
19. Válvula de compuerta.
20. Electroválvula 2.
21. Presóstato Centripro ITT.
22. Bomba centrífuga de 1/2HP THEBE TH16AL Trifásica 220V.
23. Monitor LG Flatron de 19 pulgadas.
24. CPU Intel Core i3 540 a 3.07 Ghz. 3.17 GB RAM.
25. Tanque 2 para ensayo o medición. Diámetro interno 161 mm, altura de 1100 mm, capacidad de 20 litros.
26. Tanque 1 reservorio. Capacidad 50 litros.

2.2 Selección de la tubería

Para el transporte del flujo se ha utilizado tubería circular debido a que tiene mayor área con el menor perímetro y por lo tanto requiere menos material para su construcción.

Tomando en cuenta la investigación previa realizada sobre la capacidad de los dispositivos a utilizar de acuerdo al presupuesto obtenido, en este caso no se determino en primer lugar la demanda para el sistema. 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 que la aplicación es de carácter didáctico y tomando como referencia el flujo manejado en módulos didácticos construidos por casas comerciales, se ha decidido trabajar con un flujo máximo de 10 gl/min.

Del mismo modo se considera que para evitar ruidos molestos en la tubería se recomienda trabajar con una velocidad no mayor a 2 m/s ó 2.5 m/s.

Considerando la ecuación de la continuidad tenemos:

(Ec. 2.1)

De donde:

(Ec. 2.2)

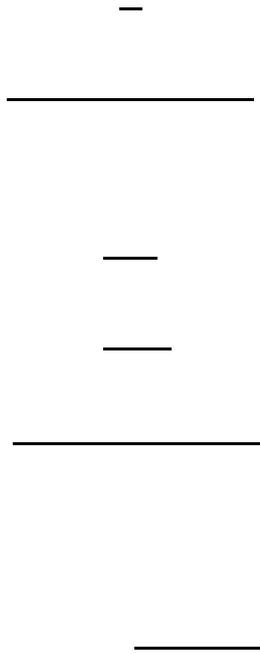
donde:

- = caudal o flujo.
- = sección transversal del tubo.
- = velocidad del fluido.

De acuerdo con esta ecuación (2.2) tenemos entonces que:

- = 10 gl/min (0.63ltr/s), ($6.3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$).
- = 2.5 m/s.

Determinamos la sección del tubo lo cual nos lleva a determinar el diámetro necesario del mismo:



Si consideramos una velocidad de obtendremos un diámetro mayor de

Considerando que para los cálculos realizados se han tomado los máximos valores tanto de flujo como de velocidad y que se ha obtenido un diámetro de entonces se ha decidido utilizar una tubería de $\frac{3}{4}$ plg. para la sección en la cual se encuentra ubicado el sensor de caudal, se toma este diámetro con el fin de obtener una mayor precisión en la medición, mientras que a la entrada de la bomba se ha colocado tubos de $\frac{1}{2}$ y a la salida tubos de 1 , esto con el afán de no forzar al motor de la bomba ya que esta viene diseñada con esas medidas de entrada y salida respectivamente, la reducción se realizó antes del ingreso a las electroválvulas, tanto en el circuito de ingreso hacia el tanque de medición que será de $\frac{3}{4}$, así como en el circuito de la electroválvula que permitirá la recirculación desde el tanque de reserva hacia el mismo que por cierto tendrá un diámetro de $\frac{1}{2}$

Tomando en cuenta además que con la utilización del variador de frecuencia tanto la velocidad como el flujo serán controladas eficientemente y sus valores no

sobrepasarán los valores máximos, con lo cual queda asegurada la durabilidad del sistema de circulación del agua.

2.3 Selección de los actuadores requeridos

Se necesita seleccionar una bomba la cual cumplirá la función de darle el impulso necesario al líquido para que fluya. De la misma manera se necesitará adquirir tres electroválvulas, las cuales se encargarán de bloquear o permitir la entrada o salida del líquido respectivamente.

2.3.1 Bomba

Cuando se desea transportar un fluido desde un punto hacia otro es necesaria la ayuda de una bomba, la cual puede actuar sola o con un actuador. Se hará referencia a los criterios de selección más apropiados para elegir un tipo de bomba adecuado para el prototipo.

2.3.1.1 Criterios de selección

Antes de elegir uno de los varios tipos de bombas disponibles en el mercado se debe tener en cuenta los siguientes criterios de selección:

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

Con respecto al caudal requerido, como se dijo anteriormente considerando que es un módulo de pruebas para laboratorio se considera que el caudal máximo de

trabajo será de 10[GPM], lo cual conlleva a pensar en primera instancia en una bomba pequeña considerando que en las pruebas no se llegará a dicho caudal.

En cuanto a las características del sistema se ha considerado las pérdidas en los componentes de la tubería dejando de lado la longitud de la misma al ser pequeña, el fluido a bombear será agua a la temperatura ambiente de Quito (25°C).

Para calcular la potencia de la bomba se requiere conocer el número de accesorios a utilizar, desde el punto de vista de succión hasta el punto más elevado o de impulsión (corresponde a la cota del punto más alto en la tubería), así como el diámetro de las mismas y posteriormente sumar la longitud equivalente de los accesorios más la altura de elevación. Al conocer la altura, el caudal y la eficiencia se obtiene la potencia.

Para el cálculo de la potencia de la bomba se deberá tomar en cuenta todas las pérdidas que puedan existir en el sistema tomando como referencia la siguiente fórmula de cálculo:

(Ec. 2.3)

donde:

- = Potencia de la bomba en [Watts]
- = Densidad del líquido (agua)
- = Aceleración de la gravedad
- = Caudal o gasto
- = Altura o carga a vencer también llamadas pérdidas

Para el cálculo de las pérdidas, que no es más que la suma de todos los obstáculos que tendrá que vencer el líquido impulsado por la bomba (expresado en metros de columna del mismo), para lo cual se emplea la siguiente fórmula:

(Ec. 2.4)

Donde:

- = Diferencia de altura entre el nivel de entrada a la bomba y nivel de descarga.

m = La altura geométrica entre el nivel inferior y el nivel superior del líquido (altura de succión), d (altura de descarga). Se las conoce como pérdidas menores.

= Sumatoria de todas las pérdidas que el fluido sufre entre el nivel de succión y el nivel de descarga. También conocidas como pérdidas mayores.

Por lo tanto:

(Ec. 2.5)

— — (Ec. 26)

donde:

— = Energía cinética o presión dinámica.

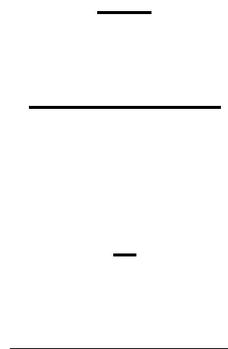
= pérdidas menores en la sección de succión.

= pérdidas menores en la succión de descarga.

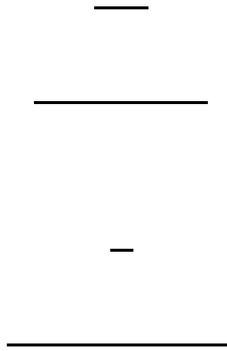
Para el cálculo de se debe considerar cada tramo de tubería que se instalará, se tiene previsto instalar un tramo de 1m de tubería de 1plg y un tramo de 2 m de 3/4 plg.

Tomando estos dos diámetros se calculan respectivamente las velocidades posibles mediante la ecuación 2.2.

Para 1plg = 0.0254 m:

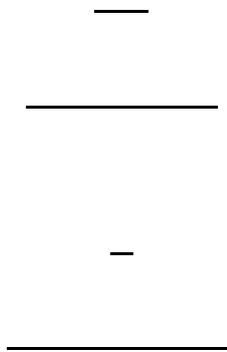


Para 3/4 plg = 0.019 m:



Teniendo en cuenta que se instalará un ciacuito de tubería para recirculación y, considerando que en determinado momento podrían estar abiertas las dos vías, se reducirá la vía de recirculación con el objetivo de que la mayor cantidad de líquido posible circule por el transmisor de caudal se deberá calcular una velocidad para este diámetro:

Para $1/2$ plg = 0.0127 m:



Cálculo de las pérdidas menores:

Succión: entrada a tubería

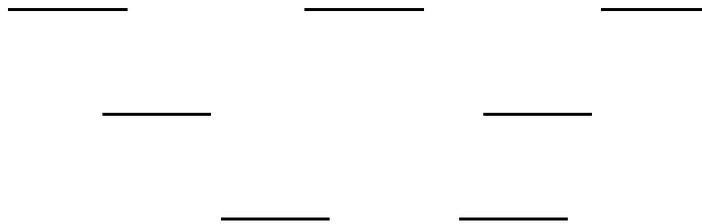
—

(Ec. 2.7)

Donde:

= coeficiente de resistencia a la circulación.

Descarga: 2(Tee estandar de 1plg) + 4(codo estandar de 90° de 1plg) + 3(codo estandar de 90° de ¾ plg) + (codo estandar de 90° de ½ plg) + (electroválvula de ¾ plg) + (electroválvula de ½ plg) + (salida al t nque).



para el cálculo del coeficiente de resistencia para las electroválvulas se utilizó la siguiente formula:

$$(Ec. 2. 8)$$

donde:

= Longitud equivalente.

= Factor de fricción.

Cálculo de pérdidas mayores:

Tubería de 1 plg:

Cálculo del número de Reynolds mediante la ecuación 1.7:

Para ésta sección de tubería se utilizara el diagrama de Moody para determinar el valor del factor de fricción f , para lo cual necesitamos determinar la rugosidad relativa con ayuda de la siguiente expresión:

(Ec. 2.9)

Donde:

= Diámetro de la tubería (m).

= Rugosidad (m)

— —
—

Con estos dos valores determinamos el factor de fricción según el diagrama de Moody .

— —

(Ec. 2.10)

Donde:

= longitud de la tubería.

= diámetro de la tubería.

Tubería de 3/4 plg:

— —————
—

Según diagrama de Moody

————— —————

Sumando tenemos:

Calculamos H con la ecuación 2.6:

Por medio de la ecuación 2.5 determinamos la potencia:

————— ————— —————

De acuerdo al resultado obtenido y tomando muy en cuenta que para la aplicación obligatoriamente se necesita una bomba trifásica se elige una de ½ HP (figura 2.2), teniendo en cuenta que ésta es la de menor potencia existente en el mercado en tipo trifásica.

Es así que se adquiere una bomba marca THEBE, serie TH16; con las siguientes características:

- Voltaje de línea: 220/380/440 [VAC].
- Frecuencia: 60 [Hz].
- Corriente: 1.80/1,04/0.90 [A].
- Revoluciones: 3480 [RPM].
- Potencia: 1/2 [HP].
- Flujo: 0.6 – 3 [m³/h].



Figura 2.2: Bomba Centrífuga.

2.3.1.2 Utilidad para la aplicación

Se ha seleccionado esta bomba ya que al ser trifásica nos permite interactuar con el variador de frecuencia, con lo cual se podrá variar la velocidad del rotor de acuerdo al requerimiento de caudal, tratando de mantener constante el nivel dentro del tanque de medición cuando se produzca una perturbación, esto hará que aumente o disminuya el requerimiento de caudal que la bomba se encargara de abastecer de manera controlada y manteniéndose en un funcionamiento continuo.

2.3.2 Electroválvulas

Tanto para el control de nivel como de flujo se puede interactuar también con la ayuda de dos de las tres electroválvulas instaladas en el prototipo respectivamente. Se han instalado una electroválvula de $\frac{1}{2}$ pulgada, las cual solo cumple con la función de retorno hacia el tanque de reserva, mientras que una segunda electroválvula de $\frac{3}{4}$ pulgada se encargara de dar paso desde la bomba hacia el tanque de medición a través del sensor de flujo. Finalmente la tercera electroválvula de 1 pulgada permitirá la evacuación del agua desde el tanque de medición y a la vez cumplirá con la tarea de perturbación para el control. En la figura 2.4 se puede observar el tipo de electroválvulas instaladas en el prototipo.



Figura 2.3: Electroválvulas.

2.3.2.1 Criterios de selección

Teniendo en cuenta el diámetro de la tubería calculado anteriormente se ha decidido utilizar electroválvulas de distintos diámetros considerando que cumplirán con distintas funciones, la electroválvula de ½ plg. ayudará únicamente a que cuando la velocidad de la bomba y por ende aumente su caudal, a parte de la salida para el tanque de medición tenga otro lugar u otro canal por donde circular el agua, evitando así también forzar al sensor de caudal.

La electroválvula de ¾ plg como se dijo permitirá la circulación del agua hacia el tanque de medición pasando a la vez por el sensor de flujo.

Por último la electroválvula de 1 plg fue utilizada con el fin de tener una mayor perturbación al momento de variar el nivel en el tanque de medición al permitir que el agua sea evacuada por la tubería del mismo diámetro.

Apoyadas por relés de estado sólido cada una puede conectarse al PLC para lograr un control adecuado en el momento que sea necesario.

Las dos electroválvulas modelo US-NPT una de 1/2 (EV 2) y otra de 3/4 (EV 3) cuentan con las siguientes características:

- Tipo de conexión: 220V
- Ciclos: 50/60Hz
- Presión de operación: mín:0.5 kg/cm² máx:15 kg/cm²

Mientras que la otra electroválvula de marca Danfoss modelo EV250B de 1 posee las siguientes características:

- Tipo de conexión: 220V
- Ciclos: 50/60Hz
- Presión de operación: mín:0 bares máx:20 bares

2.3.2.2 Utilidad para la aplicación

Dentro del módulo las electroválvulas permiten interactuar de diferentes maneras, las electroválvulas situadas luego de la salida de la bomba, tendrían dos aportes importantes. Primero al cerrar la electroválvula número 2 quedaría abierta la electroválvula número 3, con lo cual el agua circularía hacia el tanque de medición atravesando por el medidor tipo turbina permitiendo censar el valor del caudal, y mientras se llena el tanque la electroválvula número 1 actúa como un medio de perturbación provocando de esta manera que varíe el nivel en el tanque, y finalmente la electroválvula número 2 cumple con la función de recirculación desde el tanque de reserva hacia el mismo es decir nos servirá únicamente para interactuar con la bomba a mayores velocidades tomando en cuenta que el agua solamente atravesará por la bomba siempre y cuando la electroválvula número 3 se encuentre cerrada.

2.4 Definición de sensores y captadores

Teniendo en cuenta que se ha contemplado controlar nivel y caudal se hace necesario la utilización de dos sensores, a la vez que se trabajará con tres electroválvulas se necesitará tres relés de estado sólido que funcionarán como captadores de señal entre las mismas y el PLC.

2.4.1 Sensor de Presión

La selección de uno o los sensores a utilizarse para la medición en un control de nivel de líquidos se debe ser cuidadosa con el objetivo de tener una medida adecuada del nivel para que las acciones de control sean óptimas.

2.4.1.1 Criterios de selección

Utilizando la técnica de medición de presión se pudo controlar el nivel, para lo cual se hizo necesaria la utilización de un sensor de presión hidrostática. La medida de la presión se la realiza en este caso considerando la altura del líquido tomando en cuenta su fórmula de cálculo que es la siguiente:

(Ec. 2.11)

Donde:

: La presión ejercida por el líquido (presión hidrostática)

: La densidad del líquido

: La aceleración de la gravedad

: La altura del líquido

Teniendo en cuenta que la medición se la realizará en un tanque abierto a la atmósfera.

Para la selección correcta de un sensor se debe tomar muy en cuenta la utilización que se le va a dar, tanto en capacidad como también con qué tipo de materiales vamos a trabajar, en nuestro caso trabajaremos con agua a temperatura ambiente en un tanque con 1 m de altura, entonces conocemos los siguientes datos:

= 997 (tabla A3- pág 888- termodinámica de Cengel 5ta ed)

= 1

=

Considerando que $1\text{Bar} = 100\text{KPa}$ y que $1\text{psi} = 0.069$ bares entonces tenemos:

Entonces tenemos que la presión relativa máxima que debe soportar el sensor es de _____ o _____

Al obtener este valor de presión se escogió el sensor de Endress +Hauser modelo Cerabar T PMC131-A32F1D10, que se observa en la figura 2.4 y que tiene las siguientes características:

- Rango de presión: de 0 a 100mbar (0 a 10KPa).
- Rango de voltaje para comunicación (salida): de 4 a 20mA.
- Precisión: 0.5% fondo escala.
- Tiempo de respuesta: 20ms



Figura 2.4: Sensor de presión Hidrostática.

Considerando también que el costo es conveniente con otros de características semejantes y mucho más diferenciada si lo comparamos con un sensor de presión diferencial.

Como consecuencia podemos ver que la altura es razonable para la construcción del prototipo.

Y tomando en cuenta que la precisión de este equipo es del 0.5% fondo escala, podemos realizar una regla de tres para conocer cuál será la desviación en la medida, sabiendo que 1.022 m representa el 100% de la escala:

El valor de la desviación es pequeño lo cual no causa inconveniente alguno, ya que al momento de programar se podrá compensar esta desviación para tener un valor mucho más cercano a cero.

2.4.2 Sensor de Caudal

Para la medición del caudal en el módulo didáctico se ha instalado un sensor de paletas o también conocido como sensor de turbina, dicho sensor es de la marca Kobold de procedencia Alemana mostrado en la figura 2.5. Este transductor utiliza el principio tipo turbina para generar una salida de frecuencia proporcional al flujo de líquido a través del mismo.



Figura 2.5: Sensor de caudal tipo Turbina.

2.4.2.1 Criterios de selección

Este sensor se puede utilizar para rangos de caudal desde 0.5 hasta 10.5 GPM, considerando entonces que para un módulo didáctico es suficiente trabajar con caudales bajos hasta un máximo de 10 GPM que se encuentran dentro del rango de medición de este sensor, entonces se procedió a utilizarlo además tomando muy en cuenta el costo que es considerablemente bajo comparado con otros sensores utilizados para el mismo propósito.

El sensor posee las siguientes características:

- Rango de medición: de 2 a 40 ltr/min (0.5 a 10.5 gl/min).
- Rango de voltaje para comunicación (salida): de 4 a 20mA. (frecuencia de pulsos rectangular).
- Precisión: +/- 5% full escala.
- Presión máxima: 200 bares.
- Temperatura máxima: 80°C.
- Rango de viscosidad: Baja.

La justificación de mayor peso para la utilización de este sensor indudablemente fue el costo, ya que un sensor de presión diferencial nos facilitaría la medición directa a un costo alto, mientras que con el sensor tipo turbina el costo es bajo con la principal diferencia técnica que la medición se la realiza indirectamente es decir con una salida de frecuencia de pulsos rectangulares a los cuales abra que adecuarlos para que puedan ser reconocidos por el PLC y así este logre comandarlo.

2.4.2.2 Utilidad para la aplicación

Dentro del módulo este sensor tipo turbina nos ayuda a la medición y monitoreo del líquido ya que la salida de pulsos rectangulares generada es proporcional a la cantidad de flujo que atraviesa por el mismo en ese instante.

El movimiento de la turbina es censado sin contacto por magnetos que se encuentran acoplados en la turbina y convertido a una señal de frecuencia, la cual es proporcional a la velocidad del caudal.

2.4.3 Presostato (switch de presión)

Al presostato se lo conoce también como interruptor de presión, es un aparato que se encarga de abrir o cerrar un circuito eléctrico dependiendo de la lectura de presión de un fluido.

Es necesario utilizar un presostato ya que la función de este es de proteger a la bomba de sobrepresiones que puedan dañar a la misma. El presostato instalado en el módulo es un Centripro ITT y consta de dos tornillos que permiten ajustar la presión de encendido (presión mínima) y la presión de apagado (presión máxima), a este tipo de presostato se lo denomina de alta y baja, o bien de diferencial.

Cuando el presostato actúe, este enviará una señal a una entrada digital del PLC, y este se encargará de realizar la acción de control pertinente. La siguiente figura muestra el presostato.



Figura 2.6: Presostato.

2.4.4 Variador de Frecuencia

Un variador de frecuencia no es más que un convertidor de frecuencia que sirve para regular la velocidad de motores trifásicos, de acuerdo al tipo o modelo de variador, estos cubren un margen de potencia de 0.12 KW a 3 KW en redes monofásicas. Estos se encuentran controlados por microprocesador y utilizan

tecnología IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) de última generación. Esto los hace fiables y versátiles.

El variador de frecuencia no es más que un tipo de actuador que controlado por el PLC gobernará el funcionamiento de la bomba.

2.4.4.1 Criterios de selección

Como se dijo el variador de frecuencia es un actuador, considerando que se necesita controlar a la bomba con cierta sutileza se decidió utilizar un método especial de modulación por ancho de impulsos con frecuencia de pulsación seleccionable que permite un funcionamiento silencioso del motor. Esto conlleva a la idea de un accionamiento de velocidad variable, lo cual a su vez deriva en la utilización de un convertidor de frecuencia comúnmente conocido como variador de frecuencia. Considerando que la cantidad de líquido a ser impulsado por la bomba es pequeño y no se requiere de gran potencia se decidió utilizar el variador de frecuencia SINAMICS G110 el cual se indica en la figura 2.7.



Figura 2.7: Variador de Frecuencia

Además considerando que se deben realizar varias pruebas con diferentes valores necesitamos que los parámetros puedan ser modificados, en este variador podemos lograrlo mediante dos variantes que son:

- Variante USS
- Variante analógica

De igual manera se consideró que la conexión con el PLC será de carácter analógica, es decir se utilizará la variante analógica que consiste en la utilización de un panel BOP (Basic Operator Panel) mostrado en la figura 2.8.



Figura 2.8: BOP (Basic Operator Panel)

La razón final por la cual se eligió este variador se debe a que inicia con un rango de potencia bajo lo cual a la par con la potencia de la bomba elegida que es de 1/2 [HP-cv], ya que de acuerdo a la naturaleza de la carga y su curva torque vs velocidad.

2.4.4.2 Utilidad para la aplicación

La utilidad que nos brinda es de gran importancia ya que nos ayuda a controlar eficientemente el desempeño de la bomba y además al consumo mínimo de energía ya que al no estar parando y arrancando constantemente se está evitando que se incremente la corriente lo cual deriva en un mayor consumo de energía.

En conjunto son un excelente equipo variador y BOP, este último posee la característica de facilitar la puesta en marcha del variador al fijar directamente los parámetros para el funcionamiento correcto del variador, además que permite visualizar tanto los valores fijados como también cuando está en funcionamiento conjuntamente con el PLC los valores de la velocidad en un determinado instante.

2.4.5 Fuente de alimentación para 24 V

El panel de instrumentos trabaja con 220[VAC]. Esta tensión alimenta directamente al variador de velocidad y a los relés de estado sólido, pero el PLC no tiene la capacidad de operar con esta medida de tensión por lo cual se hace indispensable el uso de una fuente de alimentación para 24[VDC], es decir un transformador de voltaje.

2.4.5.1 Criterios de selección

Una vez seleccionados los elementos que formarán parte del módulo para realizar el control, se debe determinar el tipo de conexiones que se deberán realizar para relacionar cada uno de los elementos de la manera correcta.

Este tipo de fuente fue seleccionada tomando en cuenta la corriente con la cual van a funcionar el PLC y el módulo analógico ya que estos funcionan solamente con 24 voltios.

Se eligió la Fuente LOGO! Power de SIEMENS que se muestra en la figura 2.9, esta tiene la capacidad de recibir la corriente a 220[VAC] y entregar corriente a 24[VDC] con 2.5 [A].



Figura 2.9: Fuente LOGO! Power.

2.4.5.2 Utilidad para la aplicación

En este módulo como se dijo anteriormente la fuente de alimentación permite transformar 220[VAC] en 24[VDC], esta fuente recibe tensión a 220[VAC], para realizar la respectiva transformación para obtener una salida de tensión correspondiente a 24[VDC] y con una intensidad de corriente de 2.5 [A].

La transformación nos ayuda al momento de trabajar con el PLC ya que este trabaja únicamente a 24[VDC], razón por la cual para realizar el control con las electroválvulas se tuvo que utilizar relés de estado sólido los cuales reciben la señal de las electroválvulas a 220[VAC] y la emiten hacia el PLC con una tensión de 24[VDC].

De esta manera podemos operar el módulo con diferentes tensiones sin poner en riesgo a los equipos a que tengan que soportar tensiones que se encuentren fuera de su rango de diseño y que obviamente reducirían rápidamente la vida útil de los mismos.

2.4.6 Relés de estado sólido

En vista que el PLC solo trabaja con transistores que no son capaces de soportar tensión a 220[V] se hace necesaria la utilización de relés, en este caso de estado sólido, los cuales tienen entradas a 24[V] y sus salidas a 220[V].

De esta manera estos se encargaran de comandar a las electroválvulas como un apoyo del PLC, ya que este se encargara de darle la orden para una acción adecuada dentro del proceso de control.

Tomando en cuenta estas observaciones se seleccionaron tres relés des estado sólido (figuras 2.10) uno para cada electroválvula, con las siguientes características:

- Corriente de salida de 5 a 90 A
- Tensiones de salida de 24 a 480 Vc.a./5 a 200 Vc.c.
- Varistor integrado
- Indicador de operación (LED rojo)
- Tapa protectora para una mayor seguridad



Figura 2.10: Relé de estado sólido

2.5 Función realizada por cada actuador.

En los diagramas de las figuras 2.11 y 2.12 se puede observar cómo trabajan cada uno de los actuadores a su debido tiempo.

Este diagrama de funcionamiento describe el proceso tanto para control de nivel y caudal, ON representa la puesta en marcha de todo el sistema, solo cuando este se encuentre activo en ese momento estarán también activos los elementos que componen el prototipo.

Cuando la salida del PLC (Q1.0) da la señal para el encendido de la bomba (B), esta se tardará 10 segundos en encenderse completamente y 5 segundos para apagarse por completo tal como se indica con las rampas (T1 y T2) en la figura. Mientras que la electroválvula uno (EV1) estará activa todo el tiempo, así como la electroválvula dos (EV2) pasará desactivada todo el tiempo debido a que esta solo se la utilizará para recirculación.

La electroválvula tres (EV3) se activará al mismo tiempo que se active la bomba y se desactivará un tiempo después de que la bomba se desactive con el fin de evitar golpes en la tubería por el paro brusco.

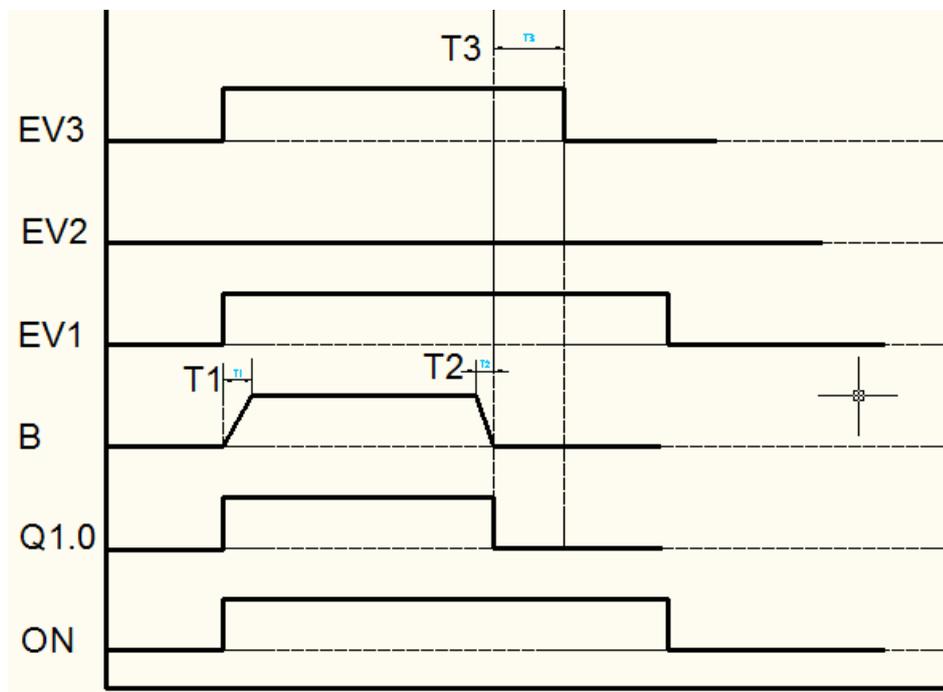


Figura 2.11: Diagrama de función para control de nivel y caudal.

Anteriormente se describió el diagrama de funcionamiento de los actuadores cuando se realiza el control de nivel y caudal, ahora se describirá el funcionamiento cuando se trata del proceso de recirculación del líquido, como se puede ver en la figura 2.12 la única variación que sufre el sistema se da en las electroválvulas dos y tres, cuando se trata de recirculación EV3 permanece desactivada todo el tiempo, mientras que EV2 ahora cumple con el comportamiento que tenía EV3 en el control anterior.

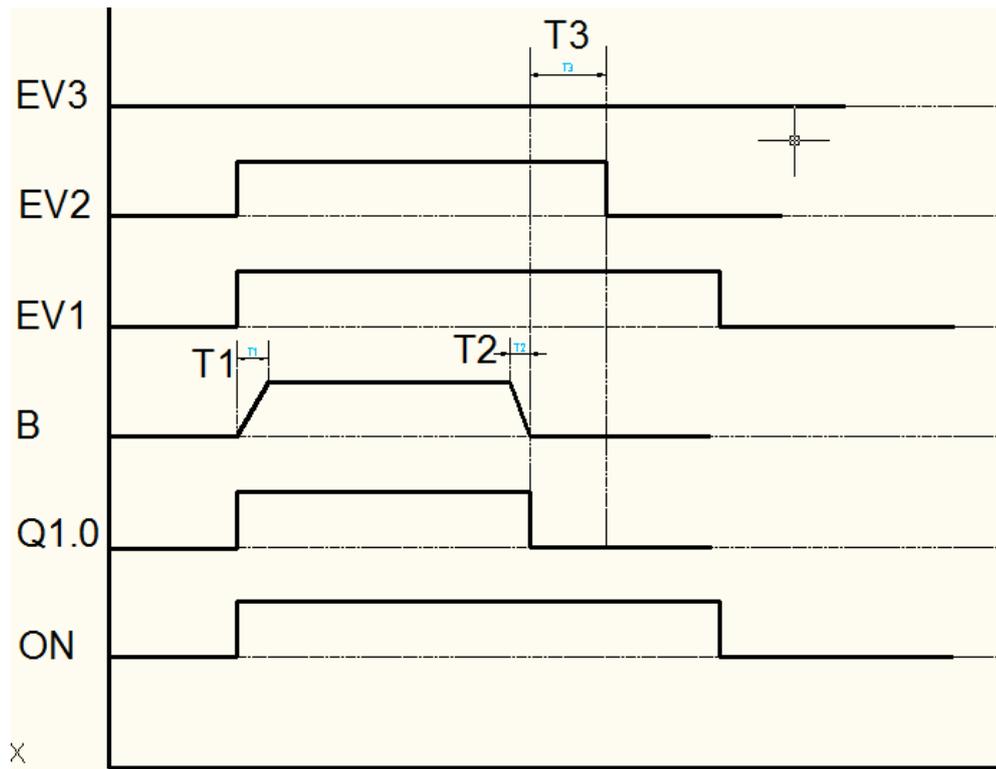


Figura 2.12: Diagrama de función para recirculación del líquido.

2.6 Medidas de seguridad para operar el prototipo.

Al momento de poner en operación el prototipo el estudiante debe tener cuidado tanto personal como también para el equipo, al conectar los brackers, de revisar que no exista algún cable fuera de su lugar al igual que los fusibles respectivos. Tomar en cuenta que no se deben mezclar los cables de control con los cables de fuerza ya que la señal podría sufrir interferencia, esto en cuanto a lo eléctrico, mientras que a lo hidráulico debe tener cuidado al momento de llenar el tanque de reserva y, cuando esté operando el sistema si el variador envía demasiada

frecuencia al motor de la bomba podría provocar un derrame del líquido desde el tanque de medición.

2.7 Posibles averías y tratamiento

Iniciando por el panel donde se encuentran ubicados todos los dispositivos de control tenemos:

- Falta de corriente a la entrada principal, para lo cual con la ayuda de un multímetro se debe chequear la existencia de corriente.
- Desconexión de uno de los terminales de los equipos instalados, se debe revisar físicamente la correcta conexión.
- Calentamiento excesivo del variador de frecuencia, en este caso se debe revisar como está conectado, dotarlo de un aislamiento si fuese necesario y chequear su configuración.
- Posibles problemas de configuración o compatibilidad de los programas para la comunicación por medio de la PC, revisar cada programa como está configurado y las versiones de compatibilidad.

En la parte exterior podrían presentarse las posibles averías:

- Pérdida de la medición exacta de nivel por un cambio de posición del transmisor de presión, para evitarlo se debe anclar al transmisor para evitar cambios en su posicionamiento.
- Atascamiento de la turbina del transmisor de caudal, si sucediese se debería desarmar el transmisor y retirar cualquier elemento extraño que produzca la interrupción.
- Mal funcionamiento de la bomba por mal conexión de fases, se hace necesaria su comprobación.
- Falta de apertura o cierre de las electroválvulas, verificar el voltaje de funcionamiento así como también los rangos de presión a la cual funciona correctamente.

- Fugas en las tuberías o conexiones, visualmente se podrá verificar y corregir el problema que puede ser cambiar parte de la tubería o realizar el ajuste necesario.
- Derrame del líquido en el tanque de medición de nivel por causa de un exceso de velocidad, para evitar esto se debe configurar al variador de velocidad, limitando de esta manera su velocidad mediante el número de Hertzios (Hz) para su funcionamiento.

2.8 Formas de comunicación con el operador.

El operador podrá comunicarse o recibir información acerca del proceso por medio de un Interfaz Humano Máquina (HMI), que se lo detallará detenidamente en el siguiente capítulo.

En este caso el único equipo que cuenta con un display es el variador de velocidad, por medio del cual se hace más fácil su programación ya que se puede visualizar las opciones de configuración que nos brinda.

2.8.1 Computador

Es de gran ayuda al momento de manejar información con distintos programas correlacionados o a su vez buscando los métodos más apropiados para lograr establecer el enlace necesario con el único fin de recabar la información sobre el comportamiento del prototipo en diferentes instantes logrando llevar un registro exacto de los eventos sucedidos. Dentro de la industria esto es de vital importancia ya que ante cualquier fallo se sabría donde y que acción se debe tomar para corregir el problema.

2.8.1.1 Criterios de selección

Para elegir un tipo de computador adecuado para el proyecto se debe tomar en cuenta la capacidad de respuesta que este tenga frente a la comunicación con el PLC, capacidad que puede determinarse mediante su cantidad de memoria RAM. En vista que el computador va a ser de uso exclusivo del prototipo y no se requiere manejar una cantidad de información grande no se ha tomado en cuenta la capacidad de almacenamiento de su disco duro.

Con respecto al sistema operativo se podría trabajar sin problema con un sistema anterior como el Windows XP, pero en vista que se adquirió la última versión del STEP 7 MicroWIN compatible con Windows 7, se decidió trabajar con este último.

2.8.1.2 Utilidad para la aplicación

Al hablar de automatización se hace referencia a un funcionamiento independiente de un determinado equipo o maquinaria, tomando como referencia una programación previa para su correcto funcionamiento, pero durante el proceso se hacen necesarios los ajustes de ciertos valores con el fin de optimizar tiempo y recursos.

Por esta razón es indispensable la utilización de un HMI, este puede ser independiente para cada equipo, es decir instalando un panel de control específico lo cual resultaría mucho más caro.

La utilización de un computador no solo nos ayuda a cargar el programa al PLC (Figura 2.13) para su correcto funcionamiento comandando al prototipo sino que también nos permite mediante un paquete de software diseñar nuestro propio HMI de acuerdo a nuestros requerimientos y al mismo tiempo que se realizan los cambios necesarios también se almacenan todos u cada uno de los eventos sucedidos cuando se realiza una determinada acción, dando la oportunidad de llevar un registro exacto el cual permite a la vez realizar un análisis estadístico que a su vez permitirá determinar las mejoras necesarias si estas fueran necesarias.

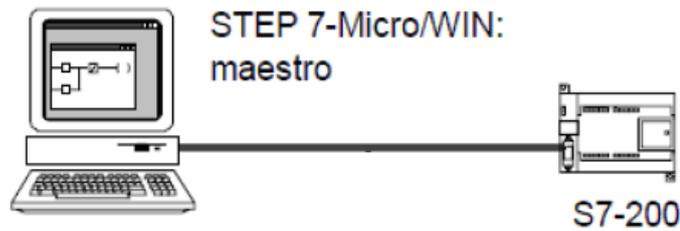


Figura 2.13: Conexión del computador con el PLC para operaciones de mando.

2.9 Mantenimiento del prototipo

Al ser un autómatas el que comanda todo el proceso no requiere de mayor mantenimiento, se haría mayor énfasis en lo que sería limpieza tanto de los equipos así como de los tanques debido a las impurezas del líquido y el polvo del ambiente ya que esto podría afectar a la efectividad de los transmisores especialmente al de caudal por ser de tipo turbina.

El mantenimiento en general del prototipo es uno de tipo preventivo, sobre todo en los contactos eléctricos de los equipos que podrían sufrir desgaste, al igual que la PC debido a que podría sufrir des configuración del software, lo cual causaría problemas al momento de control mediante el HMI.

Para lo que es bomba, electroválvulas y tuberías se trataría más sobre un mantenimiento correctivo ya que con respecto a la bomba y las electroválvulas son equipos que están completamente sellados y los cuales únicamente cuando se produzca una falla se deberá desarmar, con algo de dificultad se cambiará la parte del equipo que se encuentre en mal funcionamiento, o de ser estrictamente necesario el cambio total del equipo.

Para cumplir con el mantenimiento adecuado del prototipo se adquirió una caja de herramientas la cuál contiene un juego de desarmadores específicamente para los equipos de control, un juego de llaves que en su momento ayudarán a corregir cualquier problema que pueda producirse con la bomba y las electroválvulas finalmente para lo correspondiente a la parte eléctrica que podría sufrir alguna desconexión tenemos un multímetro conjuntamente con un probador de fase.

2.10 Esquema eléctrico de potencia del sistema

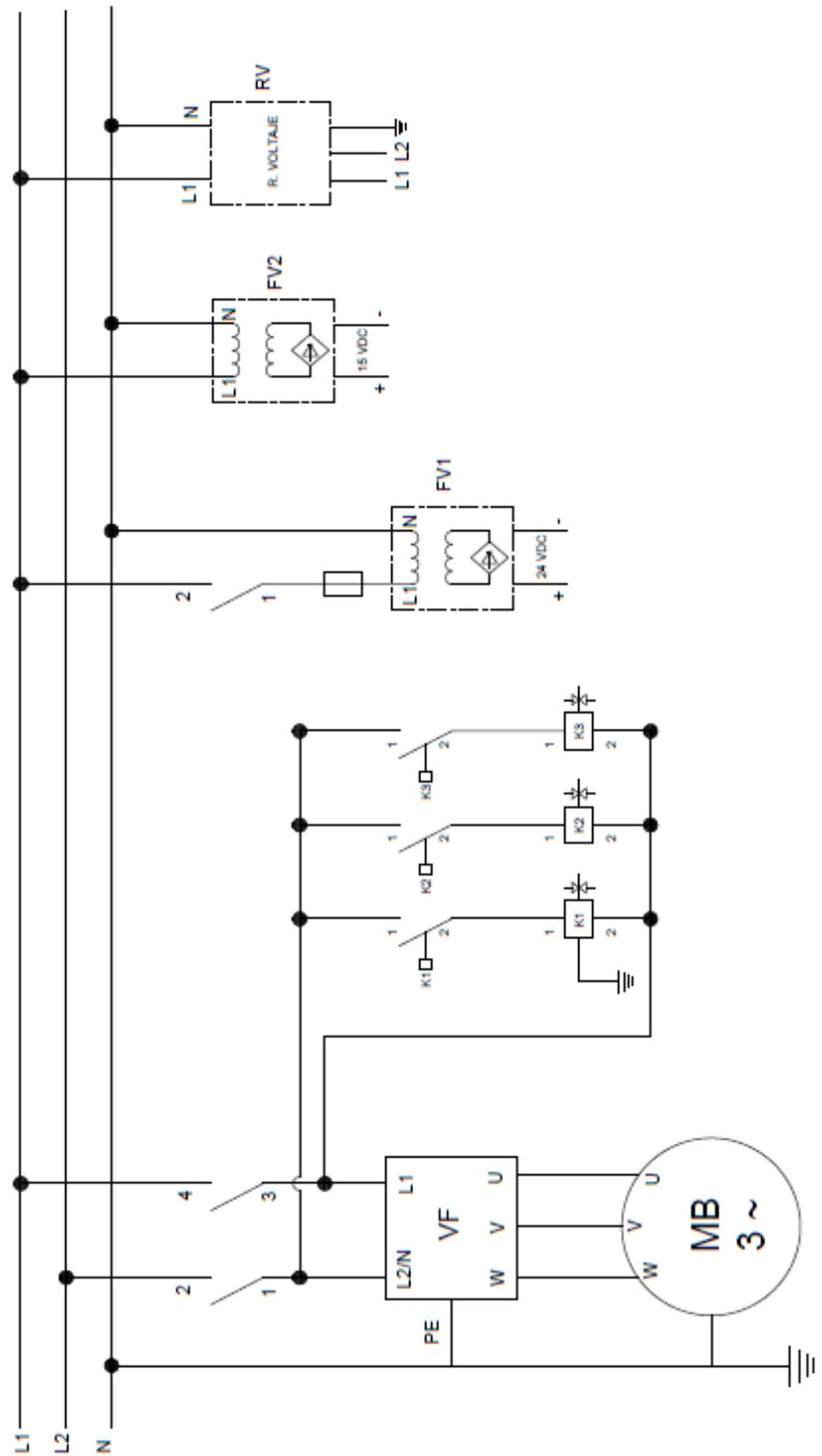


Figura 2.14: Diagrama Eléctrico de potencia del sistema.

2.11 Elección del autómata (PLC y Módulo analógico)

Un PLC o Controlador Lógico Programable de ahí sus siglas en Inglés, es un dispositivo electrónico de estado sólido que puede controlar un proceso o una máquina y posee además la capacidad de ser programado o reprogramado rápidamente de acuerdo a la demanda de la aplicación que se lleve a cabo.

Este consiste básicamente de una Unidad Central de Procesos (CPU), áreas de memoria y circuitos apropiados para gestionar los datos de entrada y salida.

2.11.1 Criterios de selección

Antes de elegir un autómata es importante también elegir un fabricante que nos brinde la información necesaria sin problema al igual que la asistencia técnica adecuada cuando sea necesaria, entre los fabricantes tenemos a LG, SIEMENS, TELEMECANIQUE, TWIDO.

Luego de haber seleccionado el fabricante que en este caso fue SIEMENS hubo que identificar plenamente entre el Logo, S7-300, S7-200 y S7-1200, autómatas que éste posee era el apropiado para nuestra aplicación, teniendo en cuenta el nivel de conocimiento que se poseía sobre PLC's, entendiéndose específicamente sobre tipo de programación a usar (lenguajes disponibles, soporte de software,...).

Los autómatas Logo y S7-300 quedaron descartados automáticamente, el primero porque no permite una comunicación con un HMI y el segundo por costo básicamente, mientras que el S7-200 y S7-1200 poseen características semejantes aunque el segundo tiene una diferenciada diferencia en cuanto al costo por permitir una comunicación ETHERNET, siendo esta una razón más por la cual se decidió utilizar un S7-200, además de tener una ventaja de poseer polaridad de sus cartas de entrada (PNP o NPN) si se usan detectores o captadores en corriente continúa, en este caso sistema utilizado por el sensor de caudal seleccionado.

De la misma manera, dentro de la clasificación existente dentro del autómata S7-200, se debió seleccionar uno, tomando en cuenta la tensión con la que se va a trabajar con el resto de elementos que irán conectados al autómata se eligió el SIMATIC S7-200 de SIEMENS que posee un CPU 224 DC/DC/DC con comunicación mediante un puerto RS-485, con 14/10 entradas/salidas digitales, con posibilidad de expansión hasta un máximo de 7 módulos, por cuestiones

necesarias se decidió utilizar un módulo analógico EM 235 con 4/1entradas/salida analógicas , en la figura 2.15 se muestran el PLC y en la figura 2.16 el módulo analógico.

Considerando que en este caso las variables a controlar son el caudal y el nivel, tomando en cuenta además los instrumentos con los cuales nos vamos a ayudar para realizar el control, llegamos a determinar el número de entradas análogas y digitales que se requieren, así como las salidas que vamos a tener, de esta manera se determina la cantidad de módulos analógicos necesarios para un proyecto específico que fue de uno solo.

Además esta autómatas tiene la facilidad de comunicación, es decir es capaz de trabajar con un módulo de ingreso de la variable de consigna (modo local), así como comunicación con una PC (modo remoto).

Por cuestiones netamente económicas se ha decidido utilizar únicamente el modo remoto para la comunicación el cual consiste en la utilización de un cable USB/PPI Multi-Master SIEMENS para facilitar la conexión y conexión con la PC.



Figura 2.15: PLC SIMATIC S7-200



Figura 2.16: Módulo Analógico EM 235.

2.11.2 Utilidad para la aplicación

Los dos instrumentos son de vital importancia para el proyecto ya que el PLC es el que gobierna y comanda todas las acciones que el prototipo pueda realizar, ya que es este quien recibe las señales emitidas por los sensores las procesa según el programa cargado y se encarga de realizar la acción pertinente.

El PLC lee sus entradas registra, procesa y almacena la información, realiza su propio diagnóstico y de acuerdo a la tarea requerida en la comunicación activa sus salidas mandando la información necesaria hacia los actuadores en este caso al variador de frecuencia el cual comanda al motor de la bomba y, de esta manera cumplir con los requerimientos de caudal y nivel establecidos en el programa previamente cargado en el PLC, lo cual se transforma en un ciclo de lectura y escritura de información como podemos ver en la figura 2.17.

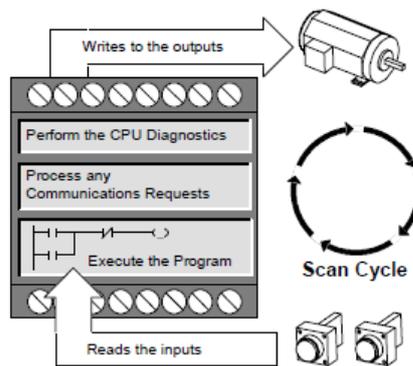


Figura 2.17: Ciclo de trabajo del PLC.

La conexión con la PC nos brinda la ventaja de interactuar con el prototipo, en primera instancia para cargar en el PLC la programación realizada en el paquete STEP 7-Micro/WIN y, en segunda instancia para mediante el HMI realizado en el paquete WONDERWERE- INTOUCH controlar el proceso aumentando o disminuyendo los valores de las variables, estableciendo diferentes cantidades en diferentes tiempos con el fin de recabar la información necesaria para realizar un análisis sobre el comportamiento del prototipo, lo cual nos servirá para llegar a determinar cuál es *la mejor técnica de control* para el prototipo.

2.12 Asignación de las entradas y salidas de información y control

Las entradas digitales del PLC se encuentran distribuidas de la siguiente forma: el transmisor de caudal por tener una salida de conmutación NPN estará conectado a las entradas 1M y 0.0 las cuales permiten la bipolaridad que en este caso es necesaria. En tanto que la entrada 1.0 ha sido designada para el presóstat, mientras que en la 1.1 estará conectada a la salida negativa del variador.

De las cuatro entradas analógicas solo una ha sido utilizada para conectar el transmisor de presión.

Las salidas digitales han sido utilizadas casi en su totalidad, 0.1, 0.2 y 0.3 se encuentran conectadas a K1, K2 y K3 respectivamente que corresponden a las tres electroválvulas, otras 0.5, 0.6 y 0.7 se encuentran conectadas a G1, G2 y G3 respectivamente, las cuales corresponden a las luces indicadoras y dos específicamente la 1.0 y 1.1 se ocuparon con las entradas analógicas del variador.

Mientras que la única salida analógica fue ocupada para conectar la variante analógica del variador.

2.13 Esquema de mando del sistema

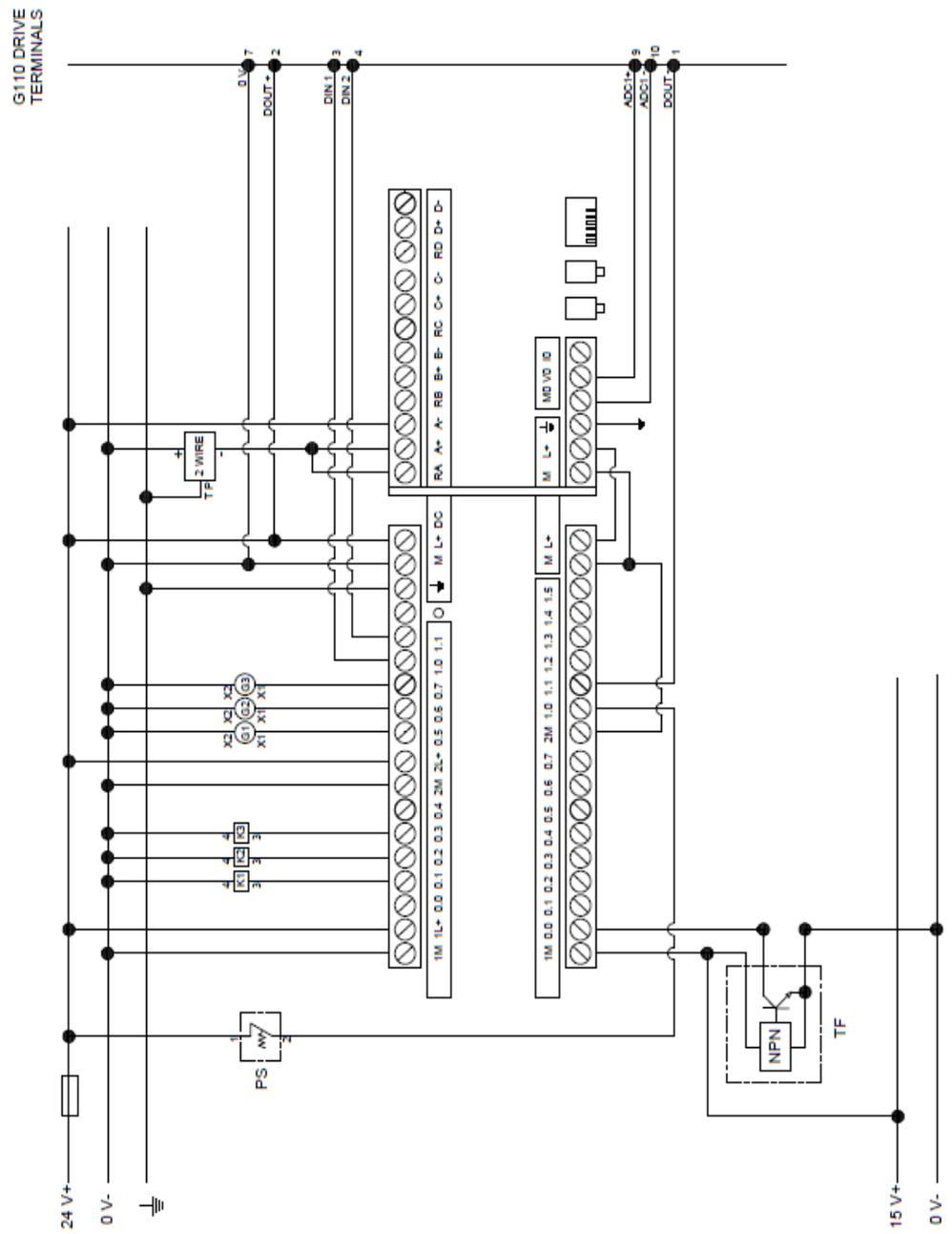


Figura 2.18: Diagrama Eléctrico de control del sistema.

CAPITULO III

DESARROLLO DEL SOFTWARE HMI

3.1 Ciclos de funcionamiento previstos

El funcionamiento del prototipo será netamente automático, es decir el usuario en este caso el estudiante solamente intervendrá para dar inicio al ciclo del proceso.

Al fijar los parámetros de configuración y encender la bomba el estudiante podrá dar inicio al proceso de medición ya sea de caudal o nivel.

Antes de iniciar con el ciclo automático, se debe crear un ciclo manual el cual nos brinde la oportunidad de probar el correcto funcionamiento de de cada uno de los instrumentos que intervendrán en el proceso, este ciclo estará bajo el control del usuario y se puede ejecutar etapa por etapa.

El control automático será de ciclo continuo, que es precisamente como se lo describió anteriormente en donde el usuario interviene únicamente para dar inicio al primer ciclo.

3.2 Programas utilizados para el adecuado control del prototipo

Para el funcionamiento del prototipo construido es necesaria la elaboración de un software HMI de control por medio de computadora, con el cual los estudiantes en este caso podrán interactuar de forma directa con el prototipo, para cumplir con este fin se emplearon los siguientes programas en conjunto cada uno con sus funciones específicas:

- **WONDERWARE INTOUCH:** Creación del Interfaz Hombre-Máquina (HMI).
- **KEP SERVER EX5:** Comunicación entre PLC e INTOUCH
- **S7-200_PC_ACCESS_V10_EVALUATION:** Comunicación entre la PC y el PLC.
- **MICROWIN STEP 7 V4.0:** Programación del PLC.

3.2.1 Utilidades de los programas utilizados

Se describirán las bondades de los programas utilizados para la realización del control completo del prototipo.

3.2.1.1 Software de visualización Intouch.

El programa InTouch de Wonderware es una de las plataformas de desarrollo de interfaz humano-maquina más importante a nivel mundial. Permite la visualización integrada de todos sus recursos de control e información.

Básicamente se encuentra conformado por dos elementos: WINDOWMAKER y WINDOWVIEWER.

WINDOWMAKER es el sistema de desarrollo. Posee 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.

En la Figura 3.1 se puede observar una de las ventanas de control que 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.

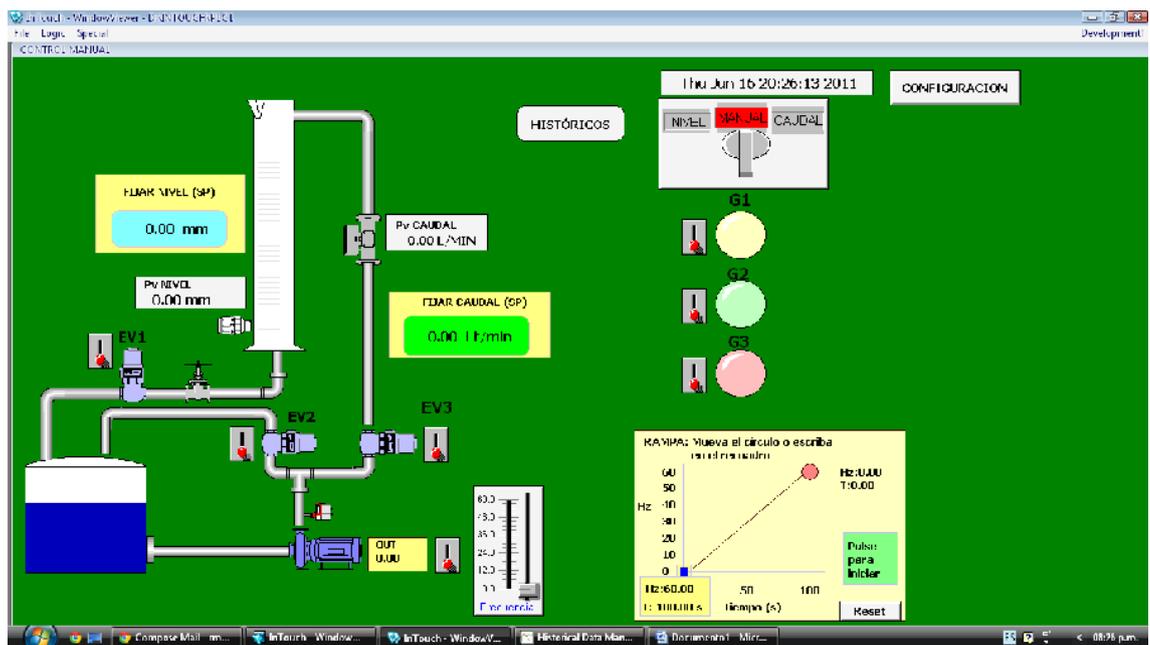


Figura 3.1: Prototipo de control

Los menús más utilizados son los siguientes:

- **File:** Manejo de ficheros y de ventanas.
- **Edit:** Contiene una serie de comandos para editar los objetos de la ventana. Con estas funciones se pueden editar los objetos que se encuentren seleccionados.
- **View:** Con el menú VIEW se definen que utilidades o elementos de WINDOWMAKER se quieren tener visibles mientras se programan.

3.2.1.1.1 Tipos de ventanas

Antes de empezar a dibujar, es necesario definir la ventana sobre la que se va a trabajar. INTOUCH trabaja con ventanas o pantallas, estas pueden ser de tres tipos:

- **Replace:** Cierra cualquier otra ventana que corte cuando aparece en pantalla.
- **Overlay:** Aparece sobre la ventana que está siendo desplegada.
- **Popup:** Esta ventana siempre queda por encima de las demás.

3.2.1.1.2 Elaboración de variables.

Para la elaboración o creación de las variables y sus nombres se utilizan el *diccionario de variables*. Para ello se ingresa en el menú *Especial/Tágame Diccionario*, entonces se despliega la ventana en la cual se tienen varias opciones las que permiten crear diferentes tipos de variables, ya sean locales o relacionadas con una fuente de datos externa como un PLC.

3.2.1.1.3 Scripts.

Herramientas de programación de INTOUCH que permiten ejecutar comandos y operaciones lógicas cuando se cumplen condiciones iniciales especificadas para realizar una acción. Se tienen básicamente tres tipos de scripts:

- **Windows Scripts:** Funcionan dentro de una ventana específica.
- **Condición Scripts:** Se relacionan con una variable discreta o con una expresión que cumpla la condición verdadera o falsa.
- **Data Change Scripts:** Relacionadas solamente con una variable. Son ejecutados una vez que la variable cambia por un valor mayor que el valor de banda muerta definido en el diccionario de variables.
-

3.2.1.1.4 Animación Links.

Estos enlaces de animación permiten a un objeto o símbolo cambiar para reflejar alteraciones de una variable o expresión a la cual están relacionados o se podría también usar este símbolo para modificar el valor o estado de esta variable.

3.2.1.1.5 Direccionamiento de I/O en Intouch

Un conjunto de datos es identificado por Intouch en un programa Servidor de I/O, usando una nomenclatura de tres partes en la que se incluye *aplicación name*, *topi name* e *ítem name*. Para obtener datos de otra aplicación, el programa cliente (INTOUCH) abre un canal al programa servidor especificando los tres ítems antes mencionados.

Para que INTOUCH pueda cumplir con este requerimiento, debe conocer el tipo de datos si son discretos, enteros, reales (punto flotante), o mensajes. Esta información determina el tipo de I/O para el **tag name** cuando este es definido en la base de datos de INTOUCH.

3.2.1.1.6 Creación de Access Names en Intouch

La información utilizada por Intouch para comunicarse con otras fuentes de datos, está contenida en un *Access Name*, en este se incluyen: *nodo name*, *aplicación name* y *topi name*.

Siguiendo los siguientes pasos se creará un *Access Name*:

- Expandir el ítem “Configurar” en el explorador de aplicación.
- Hacer clic derecho en *Access Names* y seleccionar **Open** (Figura 3.2).

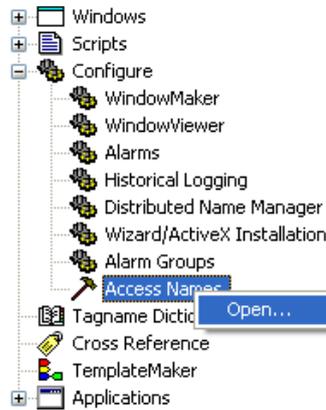


Figura 3.2: Creación de un Access Names

- En el cuadro de diálogo *Access Names* que aparece (Figura 3.3a), hacer clic en *add*. El cuadro de diálogo *add Access Name* que aparece (Figura 3.3b) se llena de la siguiente manera:



Figura 3.3: Cuadro de diálogo Access Name, a); Cuadro de diálogo add Access Names, b).

3.2.1.1.6.1 Herramientas de un Access Name

- **Access Name:** Se ingresa un nombre cualquiera, por simplicidad, se recomienda usar el mismo nombre que se usará para *topic name*.

- **Nod Name:** Se usa cuando el dato proviene de un servidor remoto de I/O que se encuentre en la red.
- **Aplicación Name:** Se ingresa el nombre del programa servidor de I/O del cual se van a adquirir los datos.
- **Topic Name:** El *topic name* sirve para especificar el subgrupo de elementos de datos al que se desea acceder.
- **Ficha *protocol to use*:** Seleccione DDE para comunicaciones internas o Suite Link para redes.
- **When to advise server:**
Aquí se tienen dos opciones que son:
 - **Advise all ítems:** Seleccionarlo si se desea analizar todos los ítems estén o no en ventanas visibles, alarmados, almacenados o usados en alguna parte del HMI. No se recomienda usar esta opción.
 - **Advise only active ítems:** Se debe seleccionar cuando se desea analizar ítems que se encuentren en ventanas visibles, alarmados, almacenados o usados en alguna parte del HMI.
- Finalmente se hace clic en OK y luego en CLOSE para terminar la creación del *Access Name*.

3.2.1.2 KEPServer EX5

El KEPServerEX-Configuration sirve como enlace de comunicación entre el INTOUCH y el PLC mediante este canal todos los tags names pueden ser visualizados e incluso permite cambiar sus propiedades de acuerdo al tipo de variable que se encuentran identificadas.

Mediante un protocolo de comunicación *Dymanic Data Exchange* (DDE) (intercambio dinámico de datos) que permite el intercambio de información de entre las aplicaciones que se encuentran corriendo y las ventanas de aplicación o simulación de un proceso. DDE provee un camino para compartir información entre ventanas de aplicación con máquinas existentes a una larga distancia en este caso desde la PC con un cable PPI.

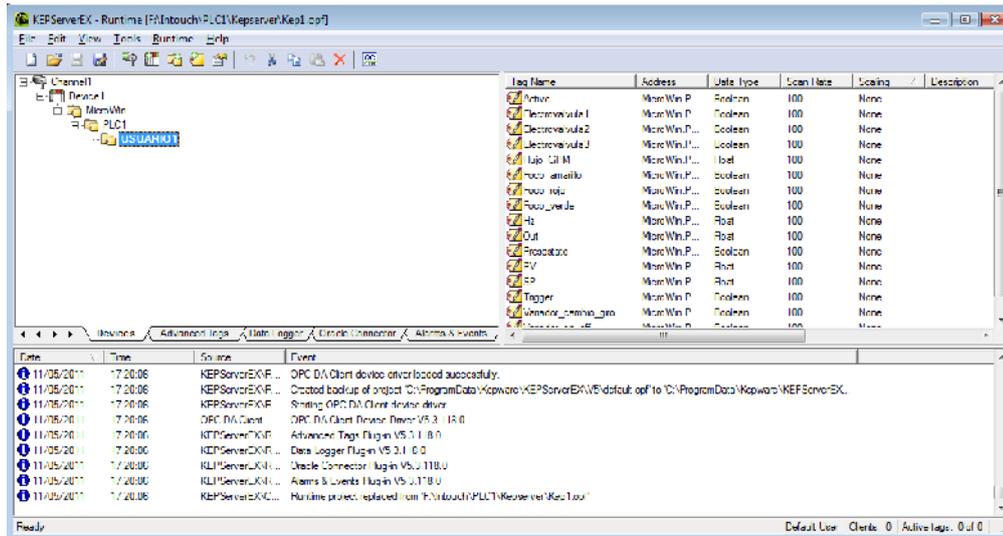


Figura 3.4: Pantalla principal de KEPServer.

3.2.1.3 S7-200_PC_ACCESS

El PC Access permite la comunicación entre la PC y el PLC, además permite simular el estado en el que se encuentra mediante el cliente de prueba, de igual manera que en el KEPServer se desplegará un alista de todos los elementos existentes en la programa de control (ver figura 3.5), dándonos la oportunidad de realizar determinadas variaciones en el tipo de las variables con el afán tener una comunicación correcta y rápida, luego de la configuración de cada uno de los programas entrelazándolos entre sí.

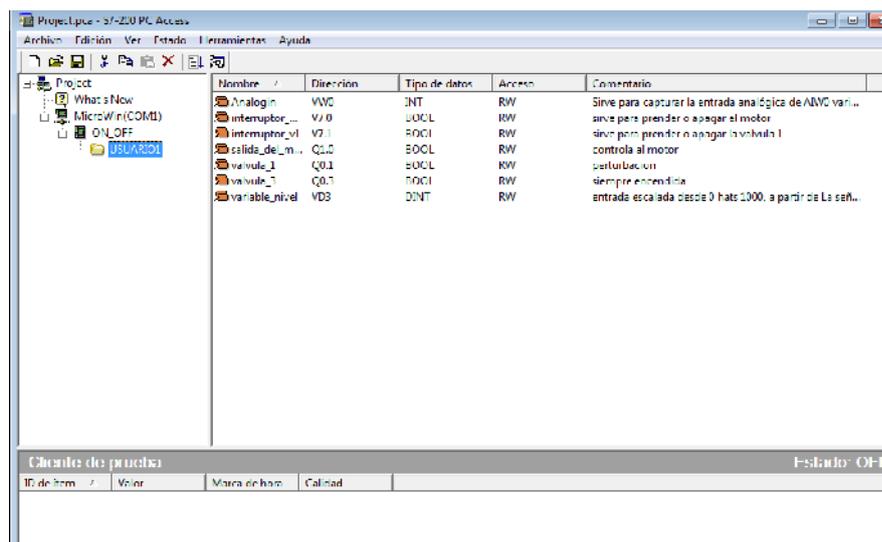


Figura 3.5: Pantalla principal de PC Access.

3.2.1.4 MICROWIN STEP 7 V4.0

Este paquete a la vez que permite realizar la programación adecuada para el funcionamiento correcto del PLC y también permite visualizar el comportamiento de las variables de proceso cuando existen perturbaciones como se muestra en la figura 3.6, para lo cual es indispensable la utilización de un correcto bloque de programación incluyendo formulas si estas fueran necesarias para realizaer las conversiones correspondientes con el fin de obtener valores exactos.

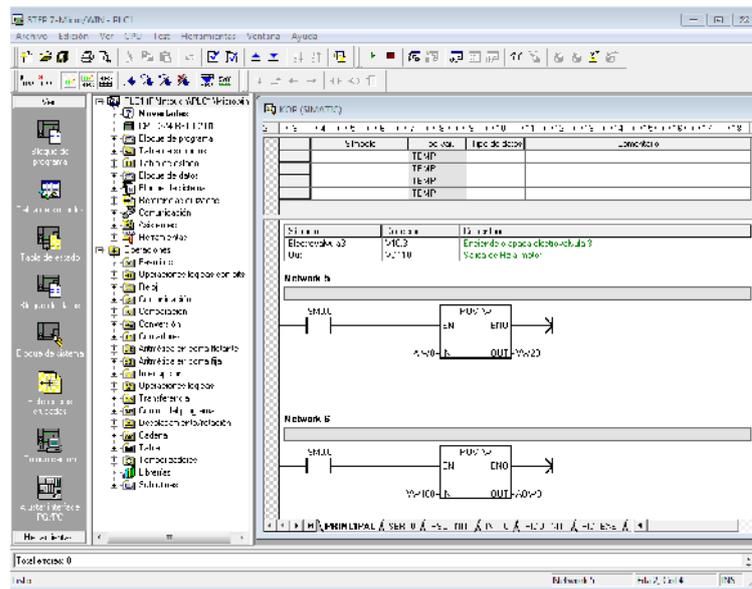


Figura 3.6: Pantalla de programación de STEP7 Microwin.

Para la correcta comunicación se debe configurar el puerto o interface PG/PC, en este caso la comunicación será mediante un cable PPI, entonces fijamos en la opción PC/PPI cable (PPI) como podmos observar en la figura Figura 3.7.

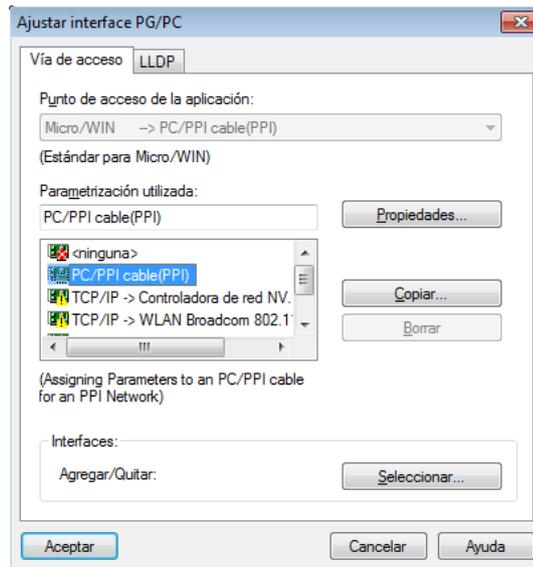


Figura 3.7: Ventana para ajustar interface.

Una vez concluida la programación es indispensable cargar al PLC el programa para arrancar con el control del proceso, pero antes se debe configurar el puerto de comunicación como podemos ver en la figura 3.8, con lo cual fijaremos el puerto en donde se deberá poner siempre el cable de comunicación PPI desde la opción comunicación.

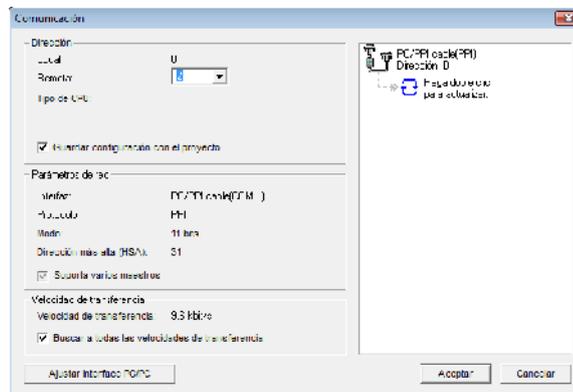


Figura 3.8: Pantalla de configuración de comunicación.

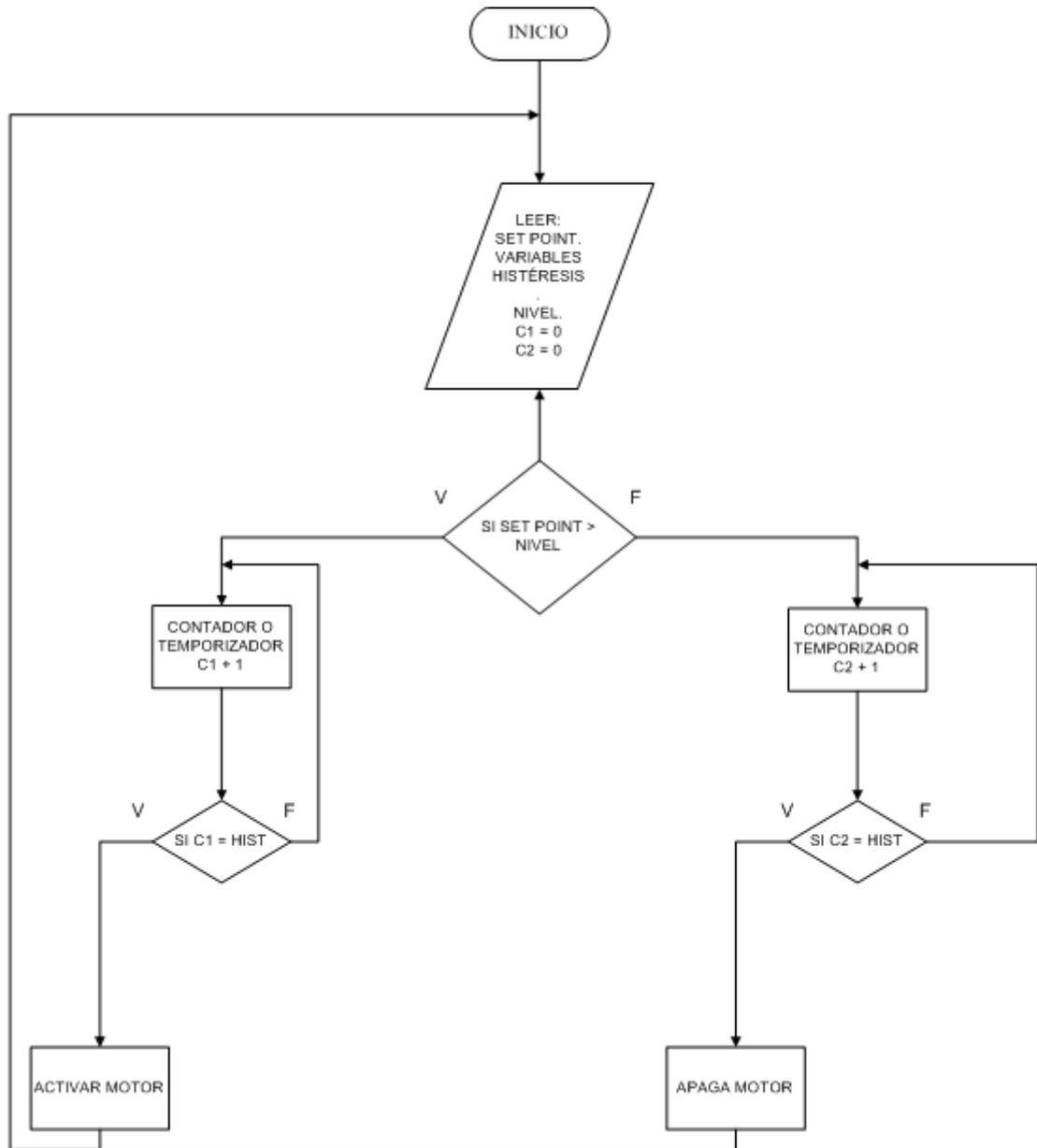
3.3 Programación realizada en MICROWIN STEP 7 V4.0

A continuación se explicarán los bloques de programa realizados para los distintos tipos de controles que se ha realizado como son: control del nivel de tres

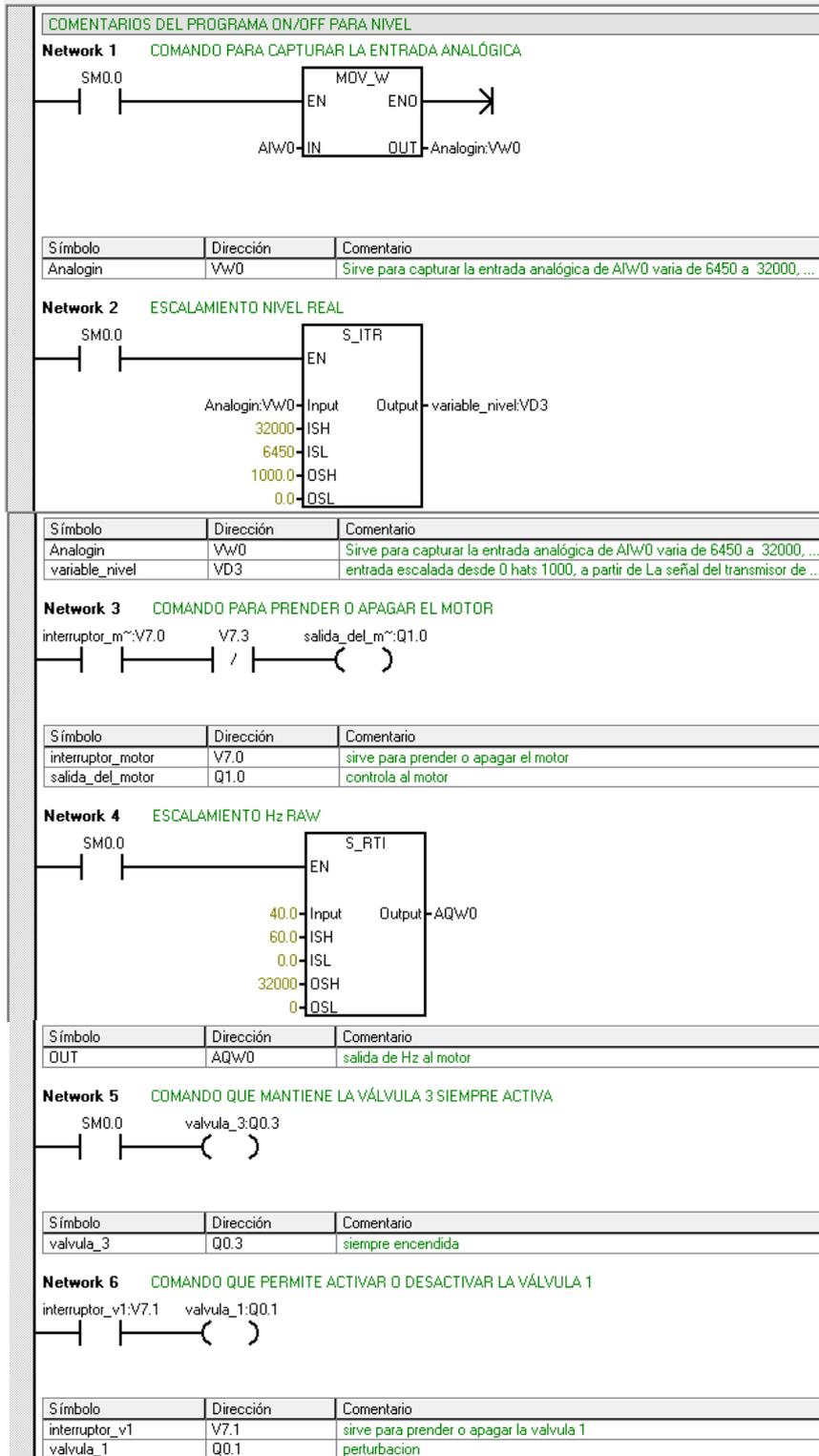
formas, control ON/OFF, proporcional y PID. Control de caudal, esto en dos formas, proporcional y PID.

En primer lugar se describe a través de diagramas de flujo el orden de las funciones que se desea cada programa a diseñar cumpla para luego dar paso a la programación en sí.

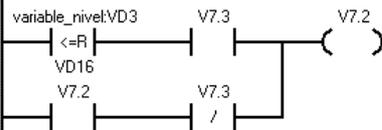
CONTROL ON/OFF (NIVEL)



CONTROL ON/OFF BLOQUE DE PROGRAMACIÓN

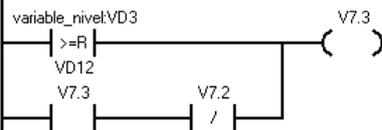


Network 7 COMANDO QUE CONTROLA EL DESCENSO DE NIVEL



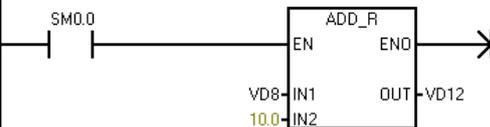
Símbolo	Dirección	Comentario
nivel_inferior	VD16	medida del nivel en el punto más bajo
variable_nivel	VD3	entrada escalada desde 0 hats 1000, a partir de La señal del transmisor de ...

Network 8 COMANDO QUE CONTROLA EL ASCENSO DE NIVEL



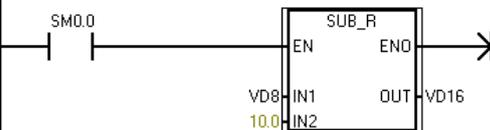
Símbolo	Dirección	Comentario
variable_nivel	VD3	entrada escalada desde 0 hats 1000, a partir de La señal del transmisor de ...

Network 9 OPERACIÓN PARA DAR UN RANGO A LA MEDIDA SUPERIOR DE NIVEL



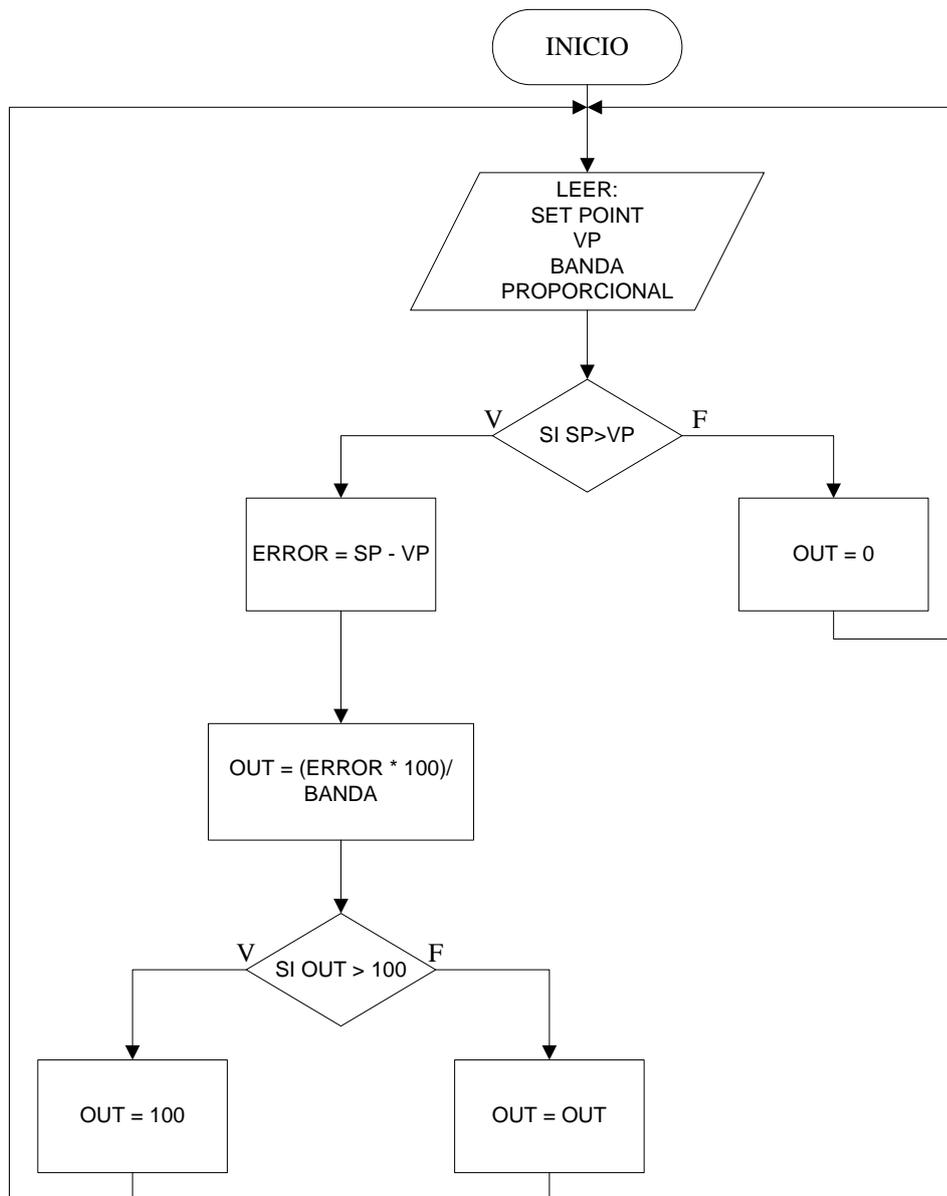
Símbolo	Dirección	Comentario
nivel_superior	VD12	medida del nivel en el punto más alto
SP	VD8	set point

Network 10 OPERACION PARA DAR UN RANGO A LA MEDIDA INFERIOR DE NIVEL



Símbolo	Dirección	Comentario
nivel_inferior	VD16	medida del nivel en el punto más bajo
SP	VD8	set point

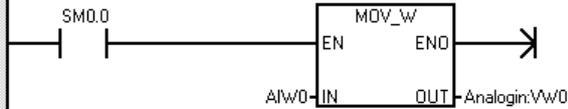
CONTROL PROPORCIONAL (NIVEL Y CAUDAL)



CONTROL PROPORCIONAL BLOQUE DE PROGRAMACIÓN (NIVEL)

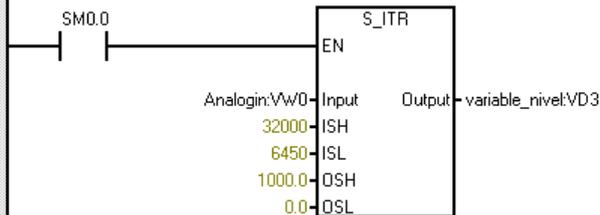
COMENTARIOS DEL PROGRAMA PROPORCIONAL PARA NIVEL

Network 1 COMANDO PARA CAPTURAR LA ENTRADA ANALÓGICA



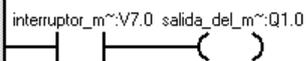
Símbolo	Dirección	Comentario
Analogin	VW0	Sirve para capturar la entrada analógica de AIW0 varia de 6450 a 32000, ...

Network 2 ESCALAMIENTO DE LA VARIABLE NIVEL A REAL



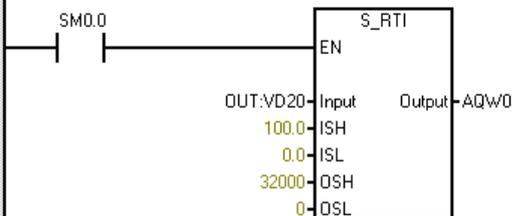
Símbolo	Dirección	Comentario
Analogin	VW0	Sirve para capturar la entrada analógica de AIW0 varia de 6450 a 32000, ...
variable_nivel	VD3	entrada escalada desde 0 hats 1000, a partir de La señal del transmisor de ...

Network 3 COMANDO PARA EL CONTROL DE ENCENDIDO O APAGADO DEL MOTOR



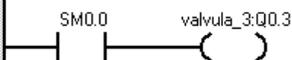
Símbolo	Dirección	Comentario
interruptor_motor	V7.0	sirve para prender o apagar el motor
salida_del_motor	Q1.0	controla al motor

Network 4 ESCALAMIENTO NIVEL REAL



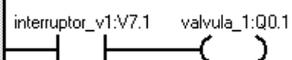
Símbolo	Dirección	Comentario
OUT	VD20	salida

Network 5 COMANDO PARA MANTENER SIEMPRE ENCENDIDA.

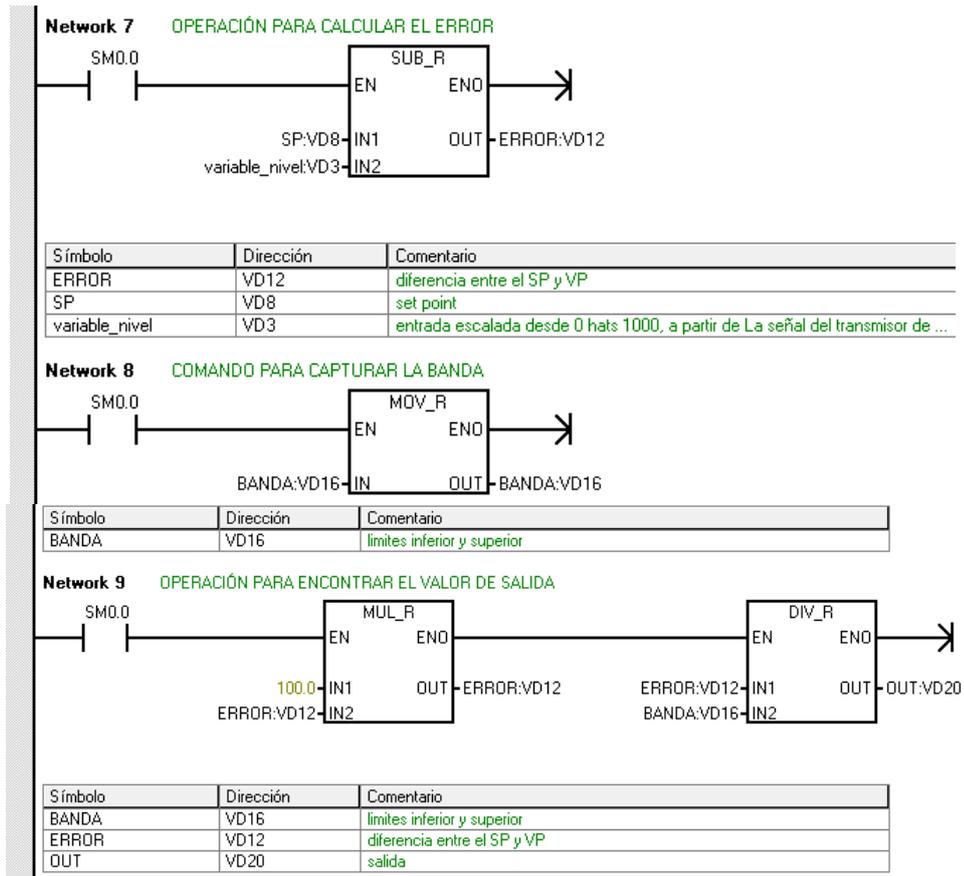


Símbolo	Dirección	Comentario
valvula_3	Q0.3	siempre encendida

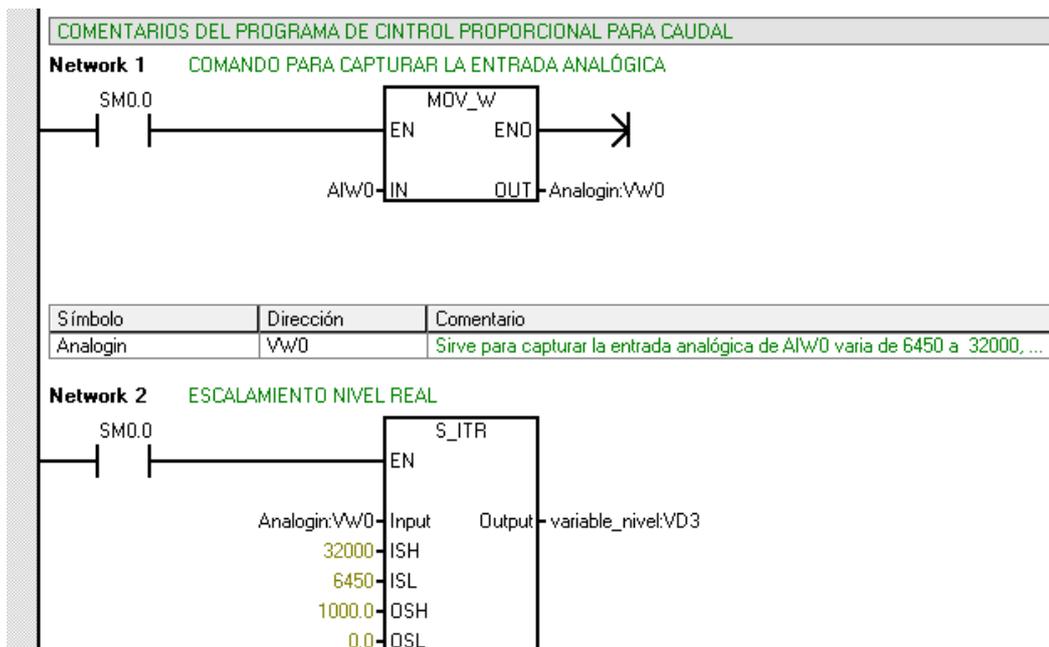
Network 6 COMANDO PARA CONTROLAR LA VÁLVULA DE PERTURBACIÓN.



Símbolo	Dirección	Comentario
interruptor_v1	V7.1	sirve para prender o apagar la valvula 1
valvula_1	Q0.1	perturbacion

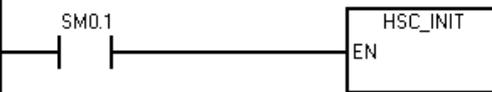


CONTROL PROPORCIONAL BLOQUE DE PROGRAMACIÓN (CAUDAL)

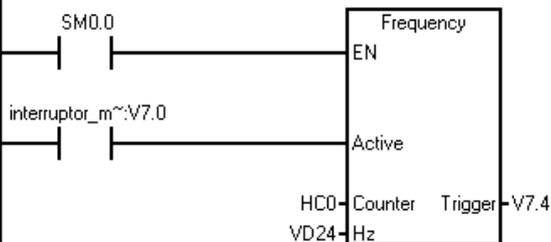


Símbolo	Dirección	Comentario
Analogin	VW0	Sirve para capturar la entrada analógica de AIW0 varia de 6450 a 32000, ...
variable_nivel	VD3	entrada escalada desde 0 hats 1000, a partir de La señal del transmisor de ...

Network 3 COMANDO PARA SUBROUTINA DE CONTADOR RÁPIDO

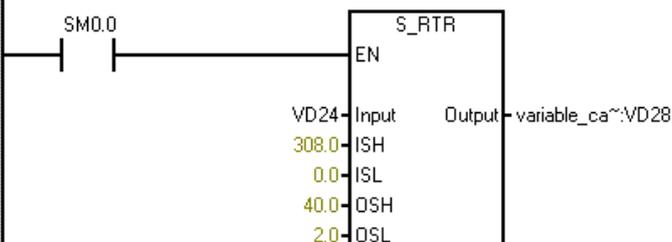


Network 4 COMANDO PARA SUBROUTINA DE FRECUENCIA



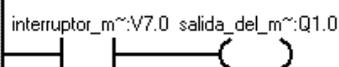
Símbolo	Dirección	Comentario
contador_rapido	HCO	inicio de contador rápido
disparador_on	V7.4	sirve para activar la frecuencia
Hz	VD24	entrada de Hz
interruptor_motor	V7.0	sirve para prender o apagar el motor

Network 5 ESCALAMIENTO DE REAL A REAL DE LA MEDICIÓN DEL CAUDAL



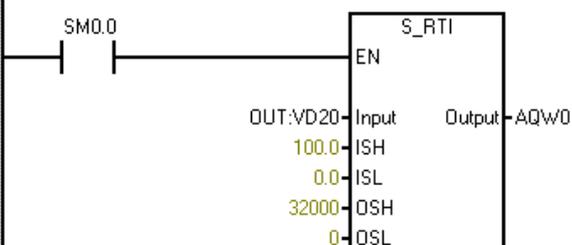
Símbolo	Dirección	Comentario
Hz	VD24	entrada de Hz
variable_caudal	VD28	medición de caudal

Network 6 COMANDO PARA CONTROLAR AL MOTOR



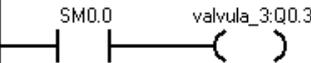
Símbolo	Dirección	Comentario
interruptor_motor	V7.0	sirve para prender o apagar el motor
salida_del_motor	Q1.0	controla al motor

Network 7 ESCALAMIENTO DE LA SALIDA A FORMATO RAW



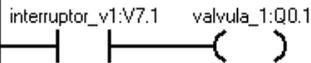
Símbolo	Dirección	Comentario
OUT	VD20	salida

Network 8



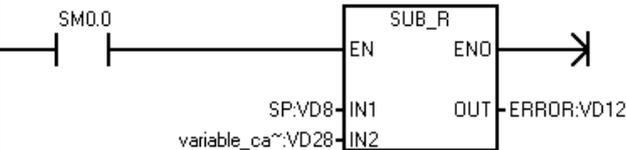
Símbolo	Dirección	Comentario
valvula_3	Q0.3	siempre encendida

Network 9



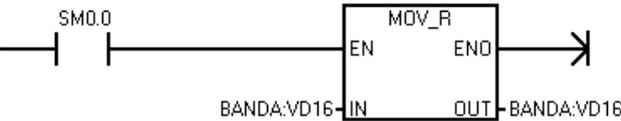
Símbolo	Dirección	Comentario
interruptor_v1	V7.1	sirve para prender o apagar la valvula 1
valvula_1	Q0.1	perturbacion

Network 10



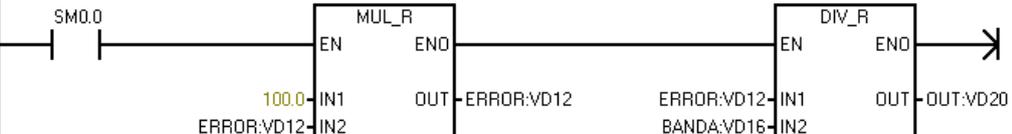
Símbolo	Dirección	Comentario
ERROR	VD12	diferencia entre el SP y VP
SP	VD8	set point
variable_caudal	VD28	medición de caudal

Network 11



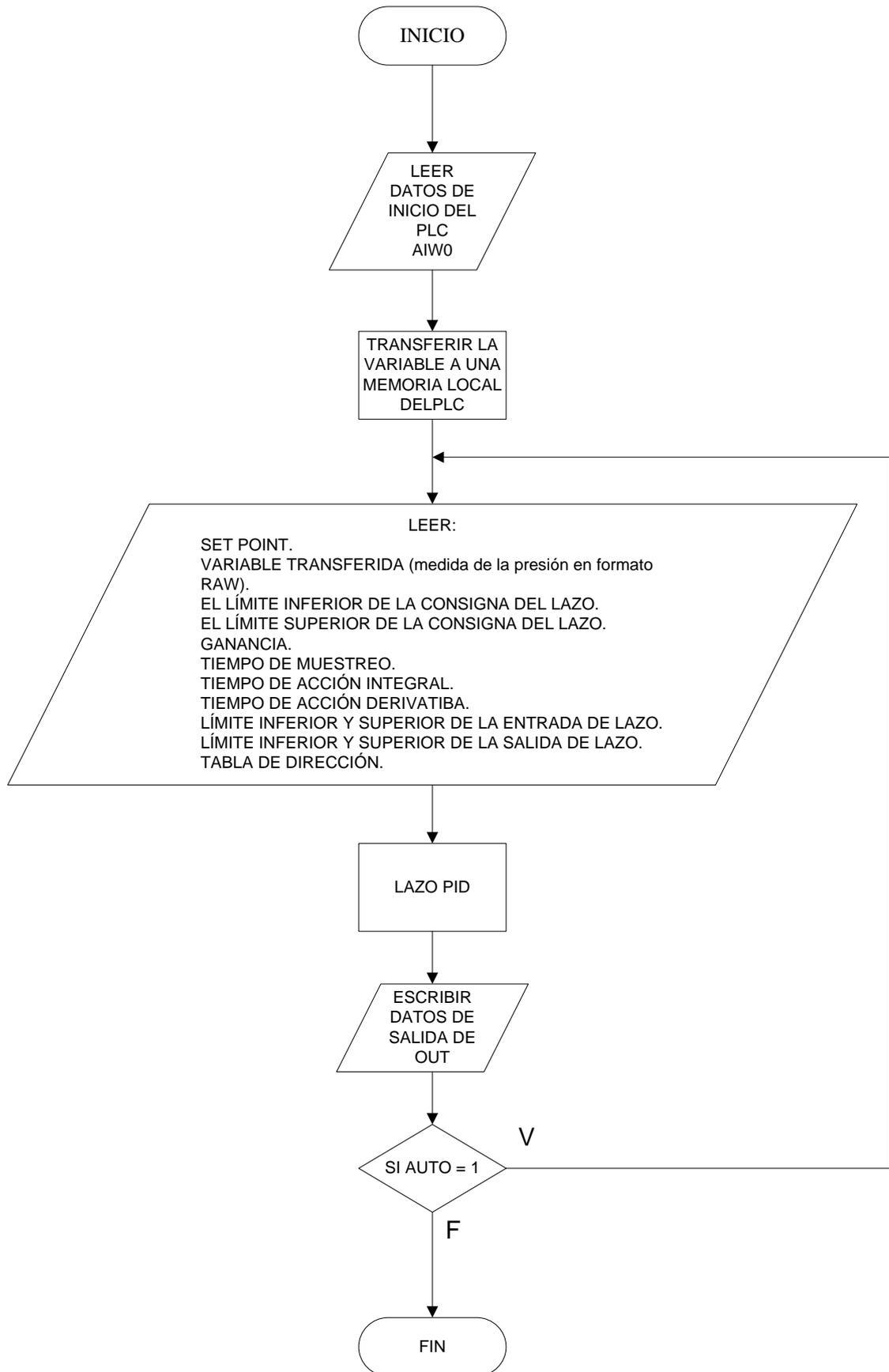
Símbolo	Dirección	Comentario
BANDA	VD16	limites inferior y superior

Network 12

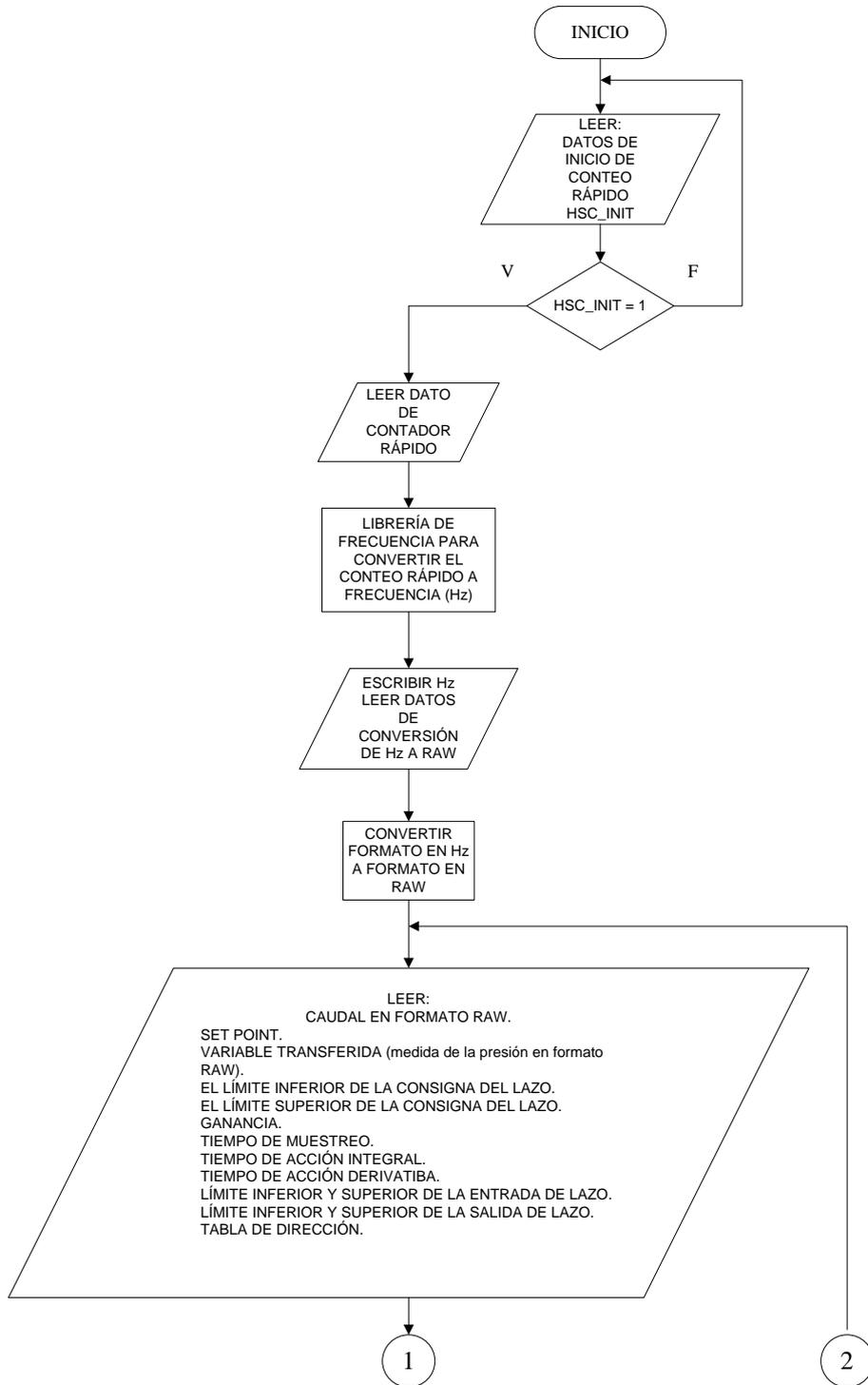


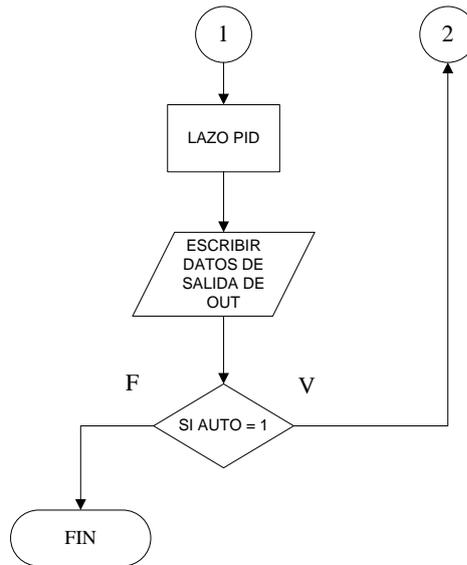
Símbolo	Dirección	Comentario
BANDA	VD16	limites inferior y superior
ERROR	VD12	diferencia entre el SP y VP
OUT	VD20	salida

CONTROL PID (NIVEL)

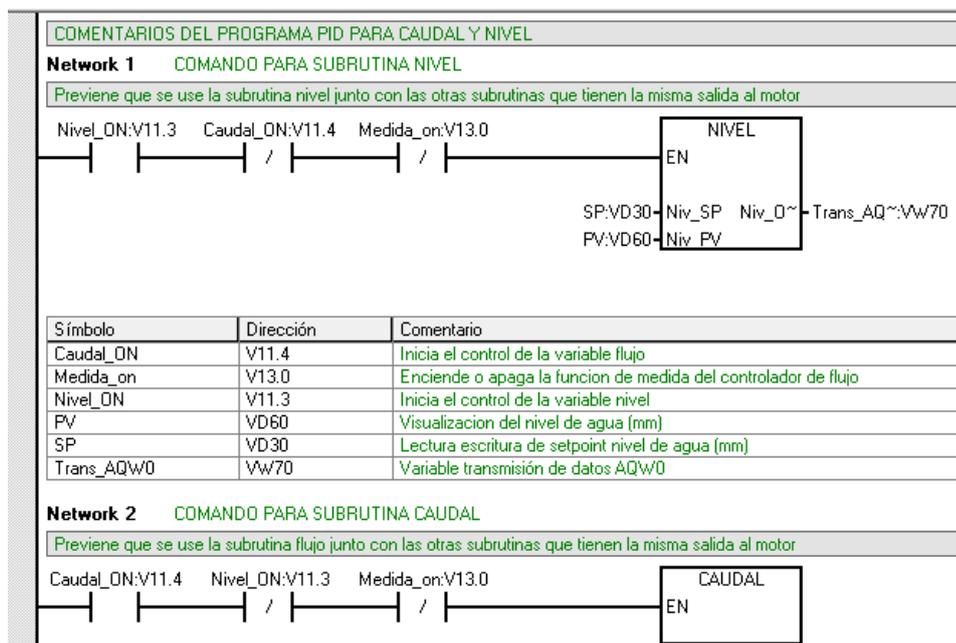


CONTROL PID (CAUDAL)



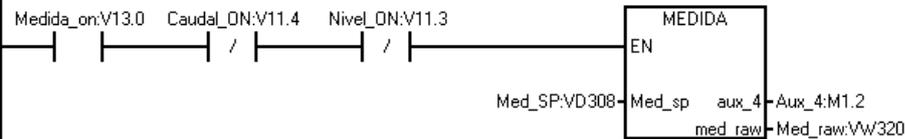


CONTROL PID NIVEL Y CAUDAL BLOQUE DE PROGRAMACIÓN



Símbolo	Dirección	Comentario
Caudal_ON	V11.4	Inicia el control de la variable flujo
Medida_on	V13.0	Enciende o apaga la función de medida del controlador de flujo
Nivel_ON	V11.3	Inicia el control de la variable nivel

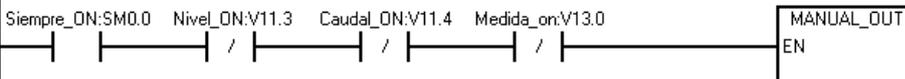
Network 3 SEGMENTO PARA DOSIFICACION DE LIQUIDOS



Símbolo	Dirección	Comentario
Aux_4	M1.2	Auxiliar de la subrutina medida
Caudal_ON	V11.4	Inicia el control de la variable flujo
Med_raw	VW320	Medida de volumen raw
Med_SP	VD308	Sp de medida de volumen con respecto a caudal Litros
Medida_on	V13.0	Enciende o apaga la función de medida del controlador de flujo
Nivel_ON	V11.3	Inicia el control de la variable nivel

Network 4 COMANDO PARA SUBROUTINA MANUAL_OUT

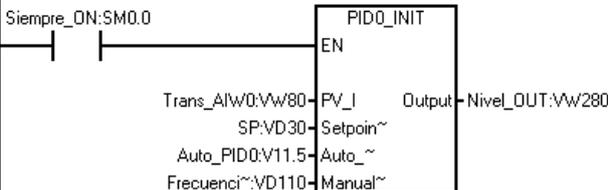
Previene que se use la subrutina manual_out junto con las otras subrutinas que tienen la misma salida al motor



Símbolo	Dirección	Comentario
Caudal_ON	V11.4	Inicia el control de la variable flujo
Medida_on	V13.0	Enciende o apaga la función de medida del controlador de flujo
Nivel_ON	V11.3	Inicia el control de la variable nivel
Siempre_ON	SM0.0	Siempre ON

Network 5 PID PARA LA VARIABLE DE NIVEL

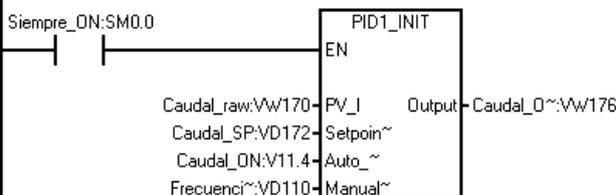
Uso del PID en la variable de nivel



Símbolo	Dirección	Comentario
Auto_PID0	V11.5	Inicia el control manual del PID 0
Frecuencia_manual	VD110	Introducción manual de la frecuencia
Nivel_OUT	VW280	Valor de salida OUT raw para nivel
Siempre_ON	SM0.0	Siempre ON
SP	VD30	Lectura escritura de setpoint nivel de agua (mm)
Trans_AIW0	VW80	Variable transmisión de datos AIW0

Network 6 Rutina PID para control de flujo

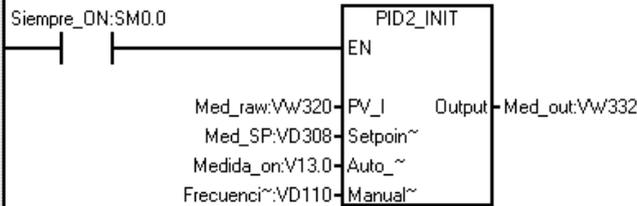
Uso del PID en la variable de nivel



Símbolo	Dirección	Comentario
Caudal_ON	V11.4	Inicia el control de la variable flujo
Caudal_OUT	Vw176	Valor OUT del PID para flujo
Caudal_raw	Vw170	Valor del medidor de flujo 0-32000
Caudal_SP	VD172	SetPoint del PID para flujo
Frecuencia_manual	VD110	Introducción manual de la frecuencia
Siempre_ON	SM0.0	Siempre ON

Network 7 Rutina PID para control de volumen

Uso del PID en la variable volumen

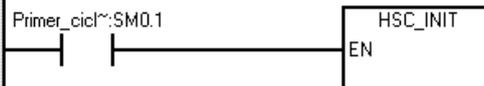


Símbolo	Dirección	Comentario
Frecuencia_manual	VD110	Introducción manual de la frecuencia
Med_out	Vw332	Salida del PID de medición de volumen
Med_raw	Vw320	Medida de volumen raw
Med_SP	VD308	Sp de medida de volumen con respecto a caudal Litros
Medida_on	V13.0	Enciende o apaga la función de medida del controlador de flujo
Siempre_ON	SM0.0	Siempre ON

Network 8 DISPARO PARA EL CONTADOR RÁPIDO

Subrutina contador rápido

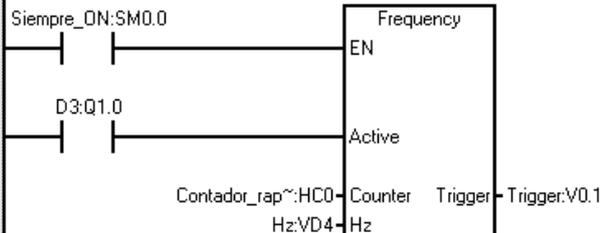
Se dispara por medio de SM0.1 para iniciar el contador rápido cuando se enciende el PLC



Símbolo	Dirección	Comentario
Primer_ciclo_ON	SM0.1	ON sólo en el primer ciclo

Network 9 Librería de Frecuencia

Esta librería de frecuencia realizada por SIEMENS provee un conteo rápido de pulsos y su transformación a una medida analógica de caudal. Por defecto cuenta los pulsos en 1 segundo.



Símbolo	Dirección	Comentario
Contador_rapido	HC0	Contador rápido HC0 recibe la señal de pulsos NPN desde el transmisor de ...
D3	Q1.0	Entrada número 3 del variador, prende o apaga la bomba centrífuga
Hz	VD4	Señal IN-OUT de la subrutina "Frequency"
Siempre_ON	SM0.0	Siempre ON
Trigger	V0.1	Cambio de estado de la subrutina "Frequency" para almacenamiento de dat...

Network 10 FILTRO ANALÓGICO PARA CAUDAL

SIMILAR AL FILTRO DE LAS ENTRADAS ANALÓGICAS PERO FUNCIONA PARA VARIABLES DE MEMORIA DEL PLC SE USA PARA HACER MÁS ESTABLE LA SEÑAL ANALÓGICA DEL CAUDAL CON BUENOS RESULTADOS

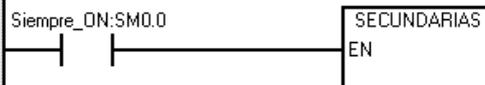
Cargar la marca especial SM0.0 para procesar este segmento en cada ciclo.
Llamar a la subrutina para calcular el valor promedio de N muestreos de la entrada analógica.



Símbolo	Dirección	Comentario
Siempre_ON	SM0.0	Siempre ON

Network 11 FUNCIONES SECUNDARIAS

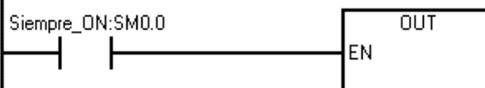
LAS FUNCIONES SON NECESARIAS PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA ESTAN AGRUPADAS PARA DISMINUIR EL USO DEL PROGRAMA PRINCIPAL Y FACILITAR SU ENTENDIMIENTO



Símbolo	Dirección	Comentario
Siempre_ON	SM0.0	Siempre ON

Network 12 AGRUPACIÓN DEL TRATAMIENTO DE LA SALIDA

LA SALIDA SE ENCUENTRA TRATADA PARA QUE TENGA UN COMPORTAMIENTO ADECUADO



Símbolo	Dirección	Comentario
Siempre_ON	SM0.0	Siempre ON

SUBROUTINA NIVEL

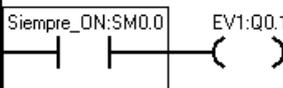
COMENTARIOS DE LA SUBROUTINA

Subrutina de Nivel

Contiene los datos necesarios para realizar el adecuado control del nivel de líquido por medio de un medidor de presión, y el control PID de este PLC

Network 1 Control EV1

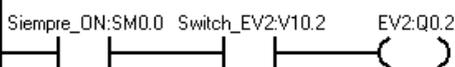
La electroválvula 1 está siempre encendida para mantener un flujo de agua constante en el tanque



Símbolo	Dirección	Comentario
EV1	Q0.1	Electrovalvula 1
Siempre_ON	SM0.0	Siempre ON

Network 2 Control EV2

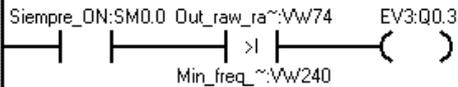
La electroválvula 2 se controla manualmente por medio del switch EV2



Símbolo	Dirección	Comentario
EV2	Q0.2	Electrovalvula2
Siempre_ON	SM0.0	Siempre ON
Switch_EV2	V10.2	Enciende o apaga electrovalvula 2

Network 3 Control para electrovalvula 3

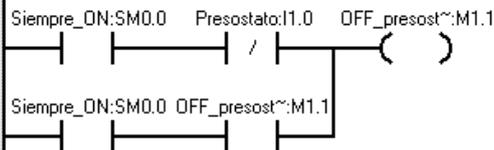
Se activa si el valor de salida RAW/ 0-32000 es mayor que el valor mínimo de frecuencia señalado desde el bloque de datos



Símbolo	Dirección	Comentario
EV3	Q0.3	Electrovalvula3
Min_freq_EV_3	VW240	Valor de frecuencia mínima para que se active la válvula EV3
Out_raw_ramp	VW74	Variable out con corrección de salida con RAMP
Siempre_ON	SM0.0	Siempre ON

Network 4 Control de presostato

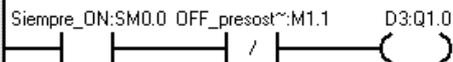
Apaga la bomba si el presostato detecta presión excesiva



Símbolo	Dirección	Comentario
OFF_presostato	M1.1	Auxiliar para el presostato
Presostato	I1.0	Entrada digital del presóstato normalmente cerrada
Siempre_ON	SM0.0	Siempre ON

Network 5 Control del variador

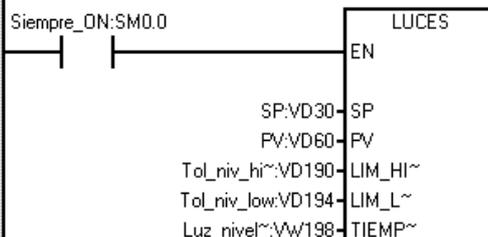
Controla la función remota de encendido y apagado de envío de corriente al motor



Símbolo	Dirección	Comentario
D3	Q1.0	Entrada número 3 del variador, prende o apaga la bomba centrífuga
OFF_presostato	M1.1	Auxiliar para el presostato
Siempre_ON	SM0.0	Siempre ON

Network 6 Control de luces

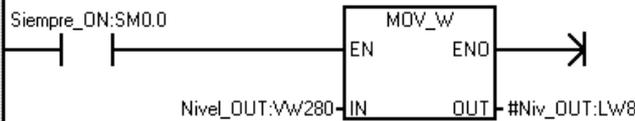
Controla las luces para que se prendan/apaguen dentro de intervalos definidos



Símbolo	Dirección	Comentario
Luz_nivel_retardo	VW198	Retardo al apagado de las luces de nivel
PV	VD60	Visualización del nivel de agua (mm)
Siempre_ON	SM0.0	Siempre ON
SP	VD30	Lectura escritura de setpoint nivel de agua (mm)
Tol_niv_high	VD190	Valor superior de banda de tolerancia para encendido de luz en nivel
Tol_niv_low	VD194	Valor inferior de banda de tolerancia para encendido de luz en nivel

Network 7 TRANSFERENCIA DEL OUT

Transfiere el valor OUT a una variable fuera de la subrutina



Símbolo	Dirección	Comentario
Nivel_OUT	VW280	Valor de salida OUT raw para nivel
Siempre_ON	SM0.0	Siempre ON

SUBROUTINA CAUDAL

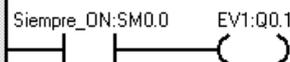
COMENTARIOS DE LA SUBROUTINA

Subrutina de Caudal

Contiene los datos necesarios para realizar el adecuado control del caudal de líquido por medio de un medidor de caudal, y el control PID de este PLC

Network 1 Control para EV1

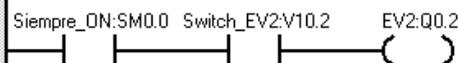
La electroválvula se activa siempre que esta subrutina esté encendida



Símbolo	Dirección	Comentario
EV1	Q0.1	Electrovalvula 1
Siempre_ON	SM0.0	Siempre ON

Network 2 Control EV2

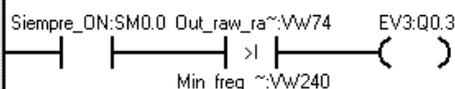
La electroválvula 2 se activa manualmente



Símbolo	Dirección	Comentario
EV2	Q0.2	Electrovalvula2
Siempre_ON	SM0.0	Siempre ON
Switch_EV2	V10.2	Enciende o apaga electrovalvula 2

Network 3 Control para electrovalvula 3

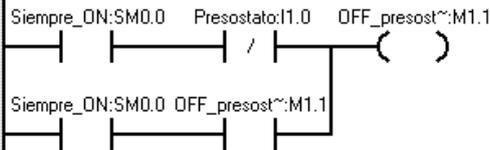
Se activa si el valor de salida RAW 0-32000 es mayor que el valor mínimo de frecuencia señalado desde el bloque de datos



Símbolo	Dirección	Comentario
EV3	Q0.3	Electrovalvula3
Min_freq_EV_3	VW240	Valor de frecuencia mínima para que se active la válvula EV3
Out_raw_ramp	VW74	Variable out con corrección de salida con RAMP
Siempre_ON	SM0.0	Siempre ON

Network 4 Control de presostato

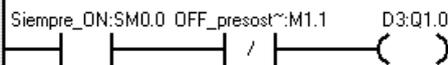
Apaga la bomba si el presostato detecta presión excesiva



Símbolo	Dirección	Comentario
OFF_presostato	M1.1	Auxiliar para el presostato
Presostato	I1.0	Entrada digital del presostato normalmente cerrada
Siempre_ON	SM0.0	Siempre ON

Network 5 Control del variador

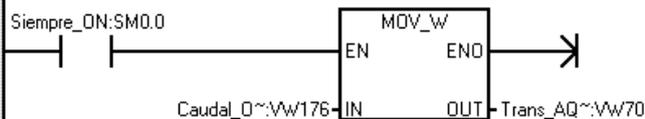
Controla la función remota de encendido y apagado de envío de corriente al motor



Símbolo	Dirección	Comentario
D3	Q1.0	Entrada número 3 del variador, prende o apaga la bomba centrífuga
OFF_presostato	M1.1	Auxiliar para el presostato
Siempre_ON	SM0.0	Siempre ON

Network 6 Transferencia de variable de caudal

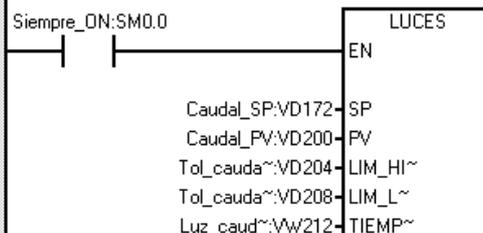
Se transfiere la variable analógica caudal para su tratamiento en la subrutina OUT



Símbolo	Dirección	Comentario
Caudal_OUT	Vw176	Valor OUT del PID para flujo
Siempre_ON	SM0.0	Siempre ON
Trans_AQw0	Vw70	Variable transmisión de datos AQw0

Network 7 Visualización de luces

Se obtiene la visualización de las luces por medio de la subrutina y los valores almacenados en el bloque de datos



Símbolo	Dirección	Comentario
Caudal_PV	VD200	Visualización del flujo de agua (litros/minuto)
Caudal_SP	VD172	SetPoint del PID para flujo
Luz_caudal_retardo	Vw212	Retardo al apagado de las luces de caudal
Siempre_ON	SM0.0	Siempre ON
Tol_caudal_high	VD204	Valor superior de banda de tolerancia para encendido de luz en caudal
Tol_caudal_low	VD208	Valor inferior de banda de tolerancia para encendido de luz en caudal

Como nos podemos dar cuenta cada uno de los bloques del programa cuenta con sus respectivos comentarios y simbología lo cual nos ayuda a comprender como está estructurado el programa y la función que cumple cada uno de una manera más rápida.

3.4 HMI desarrollada en Intouch.

El HMI está diseñado de tal manera que se hace fácil entender y utilizar por parte de los estudiantes para que cumpla con el objetivo de ser didáctico.

Para su fácil manejo el HMI consta básicamente de cinco ventanas las mismas que aparecen de acuerdo a los requerimientos del usuario, condiciones de programación y funcionamiento del prototipo. Así se tiene las siguientes:

- Ventana de carátula.
- Ventana de control.
- Ventana de configuración.
- Ventana de históricos.
- Ventana de alarmas.

3.4.1 Descripción general de cada una de las ventanas.

Para una mejor comprensión se detallara cada una de las ventanas creadas para la utilización adecuada del prototipo. El HMI iniciará como se indica a continuación. En primer lugar se debe habilitar el Runtime del Intouch la primera ventana en aparecer será la de **carátula**, en esta se describe la información básica del prototipo y contiene dos botones que permiten dos opciones, botón **INICIO** para entrar a la ventana de **control** e iniciar con el control en sí, y el botón **FINALIZAR** con el cual damos por terminada la práctica de control como se indica en la figura 3.9



Figura 3.9: Ventana de carátula y descripción del prototipo.

Si elegimos la opción **INICIAR** damos paso a la ventana **control** donde podemos observar el esquema del proceso y elegir el tipo de control deseado (ver figura 3.10), fijando los valores de *setpoint*, si elegimos dentro de esta ventana el botón **CONFIGURACIÓN**, luego de configurar el tipo de control podemos regresar a la ventana de control dando click en el botón **VENTANA DE CONTROL** (ver figura 3.11), dentro de la ventana de control tenemos la opción de regresar a la **caratula** para dar por terminado el control.

También nos permite visualizar los **trens históricos** al elegir el botón **HISTORICOS** (ver figura 3.12).

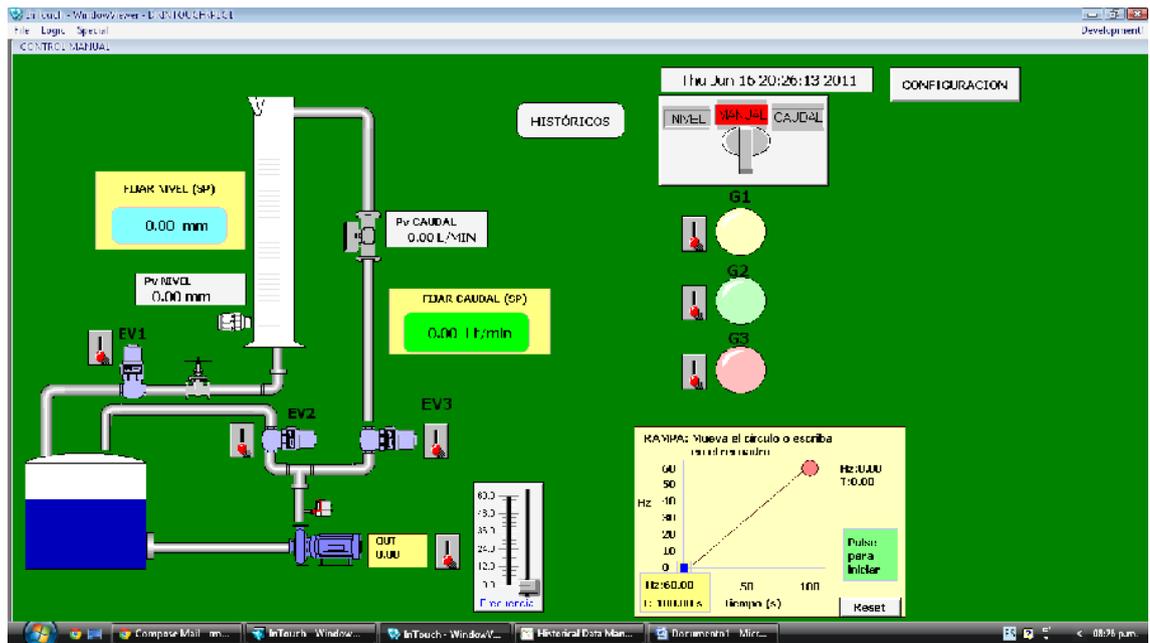


Figura 3.10: Ventana de control.

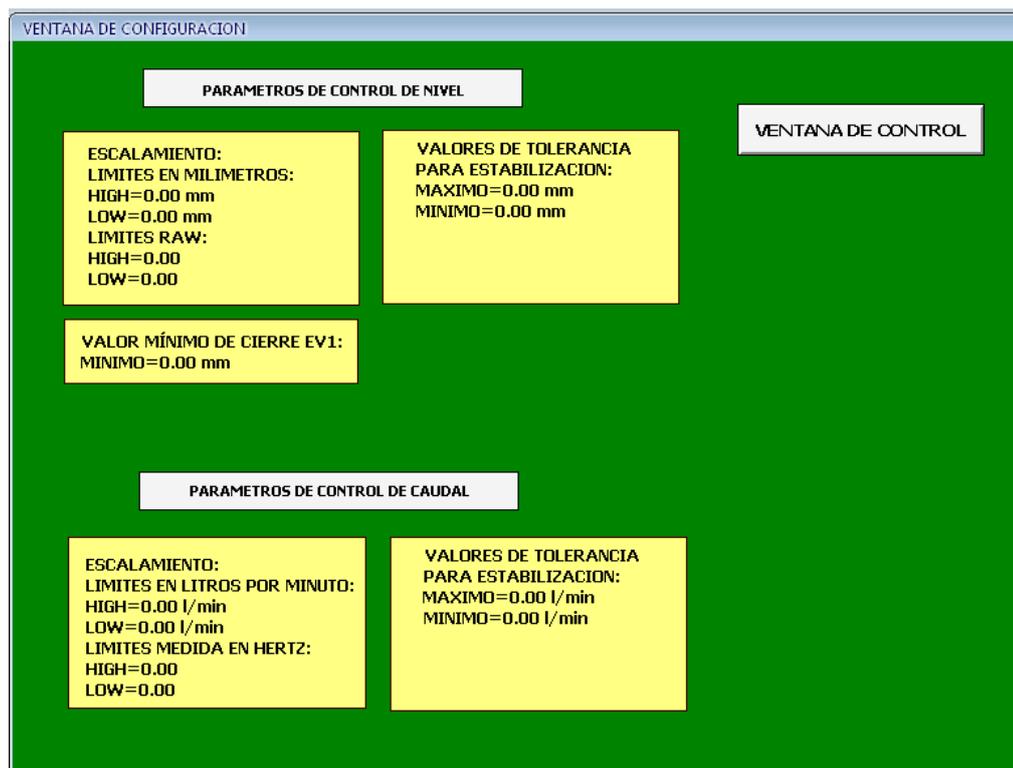


Figura 3.11: Ventana de configuración.

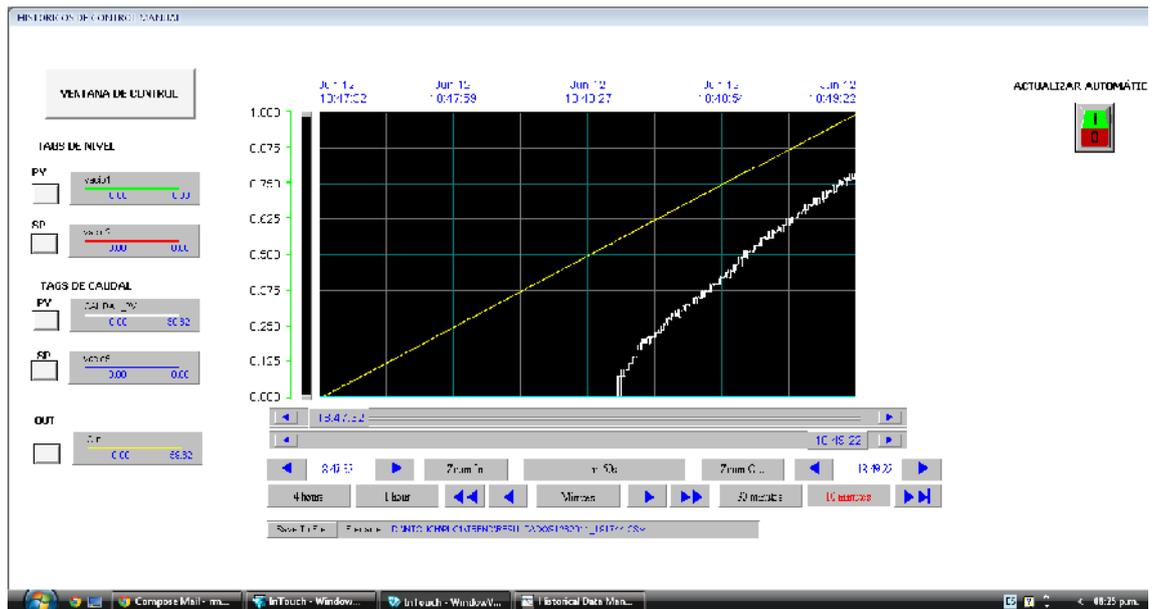


Figura 3.12: Ventana de históricos.

Algo de gran importancia sobre esta ventana es que con la ayuda de *HistData Wizard* (ver figura 3.13), ubicado en la parte baja de la ventana de la figura 3.12, contiene el botón *Save To File* permite guardar los datos del histórico cada vez que hagamos click sobre él, solo tenemos que configurar la dirección donde queremos que se guarden los datos.

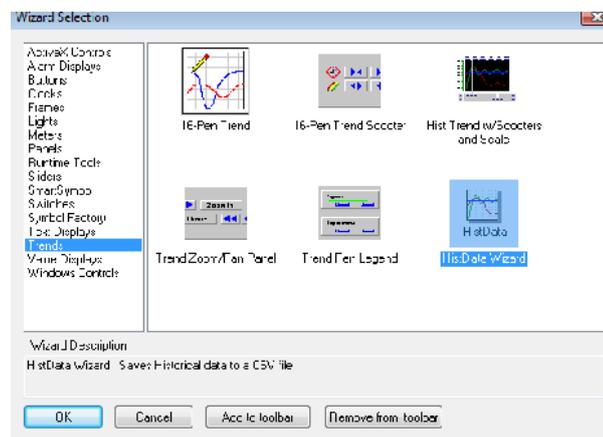


Figura 3.13: Selección de HistData Wizard para registrar los datos.

Finalmente tenemos una ventana de alarma la cual se activara automáticamente cuando el presostato detecte una sobrepresión, apagando inmediatamente el motor dándonos un aviso visual como se muestra en la figura 3.14.

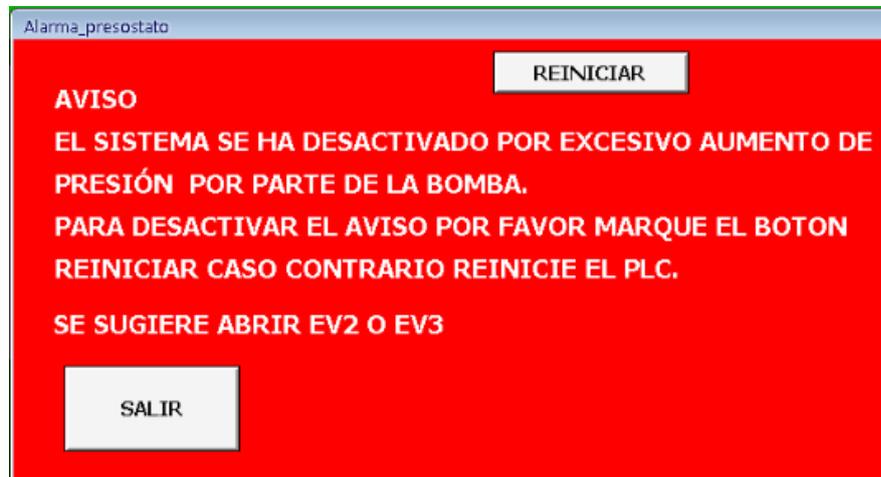


Figura 3.14: Alarma de sobrepresión.

3.4.2 Programación de las ventanas del HMI

La primera ventana o pantalla en ser creada será la que representa el proceso, para ello se ingresa desde *File/New Window* (icono situado en el extremo izquierdo de la barra de herramientas de *WindowMaker*).

En la ventana de propiedades (*Window Properties*) y se completará los campos necesarios de la ventana de dialogo (Ver Figura 3.15).

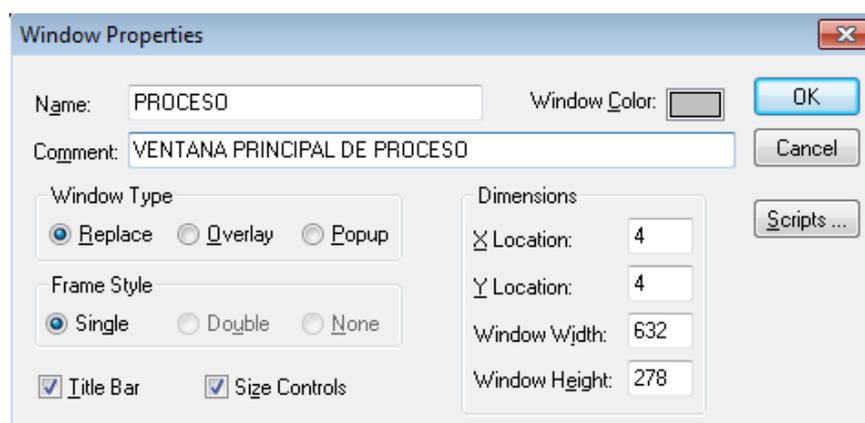


Figura 3.15: Ventana de propiedades (*Window Properties*).

Creada ya la pantalla de Proceso, se establecerá en el área de trabajo de *WindowMaker*, aquí se implementarán todos los gráficos y textos que dará como

resultado una pantalla amigable al operador (Humano), lo cual le permitirá familiarice con el proceso, similar a la que se muestra en la Figura. 3.10.

Con el mismo criterio se crearán el resto de ventanas que formarán parte del HMI para interactuar con el proceso de medición.

3.4.2.1 Curvas históricas.

Una ventana especial que ayudará a visualizar curvas del comportamiento del sistema es la de curvas históricas o trends, en las cuales se puede definir una serie de parámetros tales como tamaño de la muestra, colores de las líneas, tiempo de actualización de la curva, entre otros como se indica en la figura 3.16.

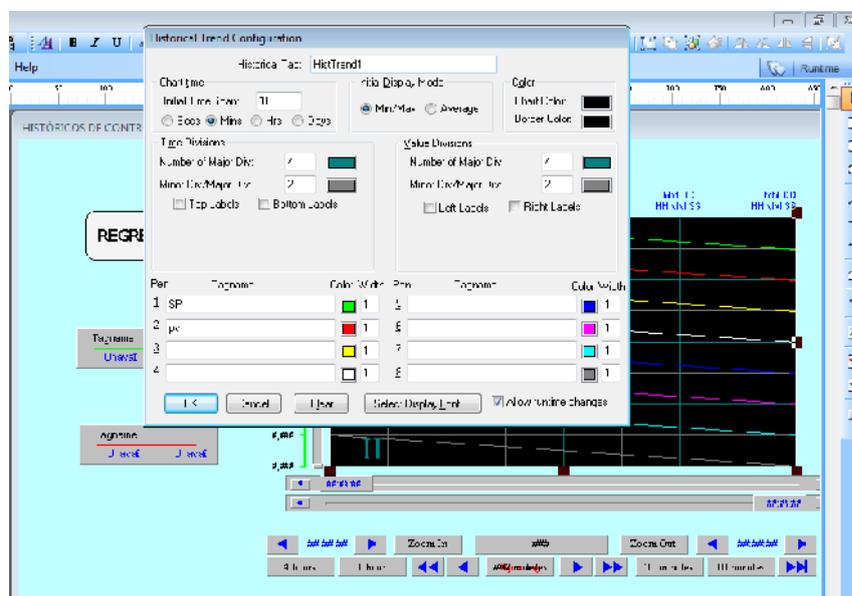


Figura 3.16: Ventana de configuración de históricos.

3.4.2.2 Definición de los *Tagnames*.

Como todo programa el Intouch tiene una parte fundamental lo que podría llamarse el corazón del programa, esto no es más que los *tagnames*. Este es un diccionario que contiene todos los valores de los elementos en la base de datos.

Para acceder a este diccionario se lo hace desde la barra de herramientas/*Special/TagNameDictionary*, desde aquí se definen los *tagnames* a utilizarse y las características que han de tener.

Como se indica en la figura 3.17 se debe configurar el *tagname* teniendo en cuenta la función que realiza en este caso particular se trata de la variable de proceso

(pv), esta será de tipo I/O Real, activamos log data y log *events* puesto que necesitamos graficarla en el histórico, fijamos los valores mínimos y máximos para ello y elegimos el *Access Name*, finalmente para guardar solo hacemos clic en *save*.

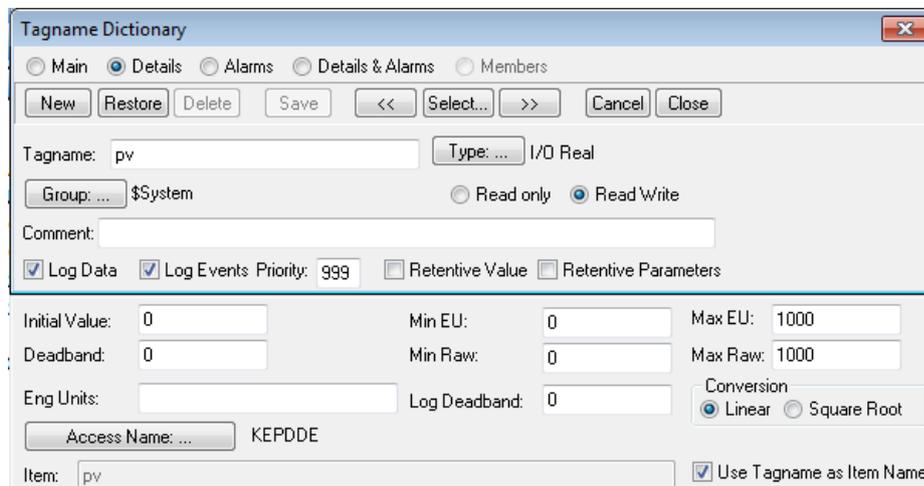


Figura 3.17: Pantalla para definición de *Tagnames*.

3.4.2.3 Scripts del HMI.

El Intouch actúa bajo la lógica *SCRIPT*, este constituye un programa que permitirá llevar a cabo determinadas acciones a través de una estructura *IF...THEN...ELSE* (Ver Figura 3.18). En esta se muestra además la restricción para ingresar con la contraseña a la ventana de control, y diferentes restricciones necesarias en cada una de las ventanas del HMI.

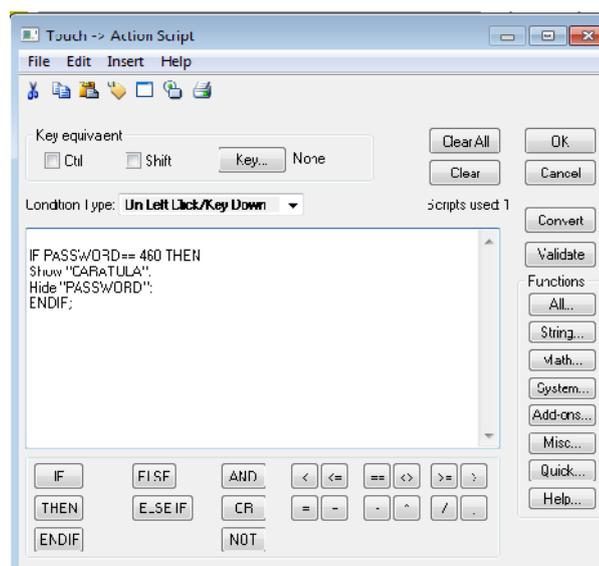


Figura 3.18: Pantalla para la programación de *Windows Script*.

3.5 Comunicación

Como se mencionó anteriormente la comunicación se la realiza mediante un protocolo DDE desarrollado por Microsoft para intercambio de datos entre aplicaciones Windows.

La comunicación se establece automáticamente entre programas que soportan la estructura DDE (cliente servidor).

Un servidor no es más que un programa capaz de enviar datos al bus DDE, mientras que el programa que puede recibir los datos DDE es conocido como cliente.

Esta es la estructura de los servidores de autómatas que dispone WONDERWARE, aquí se encuentran prácticamente la totalidad de los PLCs más utilizados en la industria con comunicación tanto punto a punto como en red.

La comunicación DDE está basada en el empleo de tres parámetros:

- Aplicación
- Tópico
- Elemento

Estos parámetros son fundamentales para establecer la comunicación vía DDE entre aplicaciones Windows e Intouch, para lo cual es necesario crear un *Access Name* como se indica en la figura 3.19, aquí se asocia una aplicación y un tópico con lo cual la comunicación es posible.

Para crearlo se debe acceder desde *SPECIAL/ACCESS NAME* o también a través de *TOOLS/CONFIGURE/ACCESS NAME* (ver figura 3.19)

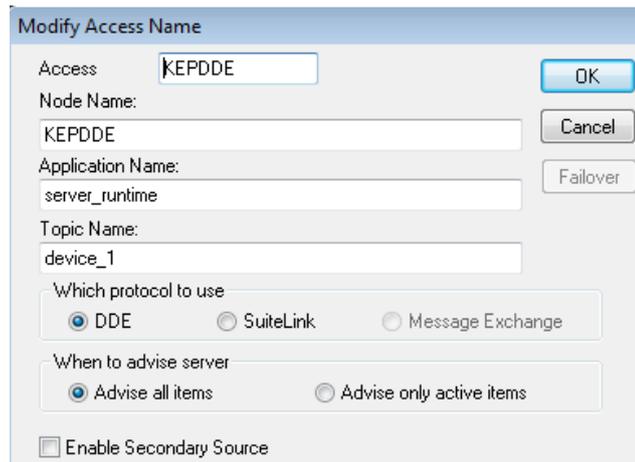


Figura 3.19: Pantalla para la creación de un *Access Name*.

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, de lo contrario se recomienda llenarlo también con el mismo nombre del *Access Name*.

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 “*When to Advise Server*” seleccionamos *Advise all items*.

3.5.1 Establecimiento de la comunicación.

El establecer una comunicación tiene como finalidad el tener el control del proceso desde una estación remota (PC), para lo cual se debe comunicar al PLC con la PC por medio de los siguientes pasos.

1. Abrir el software STEP 7 MicroWin el cual contiene el programa desarrollado para el PLC (Ver Figura 3.6). Se lo puede hacer desde el icono de acceso directo fácilmente.

- Una vez ya abierto el programa de control en STEP 7 MicroWin se debe configurar el tipo de comunicación que se desea (Ver Figura 3.8). Para este caso no se utilizará la típica comunicación RS232 Serial, sino una comunicación USB que es una comunicación actual y más rápida.
- Luego se procede a configurar la interfaz por medio del botón Ajustar Interface PG/PC (cable de comunicación) en este caso se usará un cable PC/PPI (Ver Figura.3.7).
- Después de haber seleccionado la interface que se utilizará, se debe pulsar en “propiedades” (Ver Figura.3.7) donde se escogerá la conexión con la cual se va a trabajar, esto en la opción conexión local. En esta aplicación, como se mencionó anteriormente, será USB (Ver Figura.3.20), mientras que la velocidad de transferencia será de 187.5 Kbit/s, seleccionada en la opción PPI, tal como se muestran en la Figura 3.21.

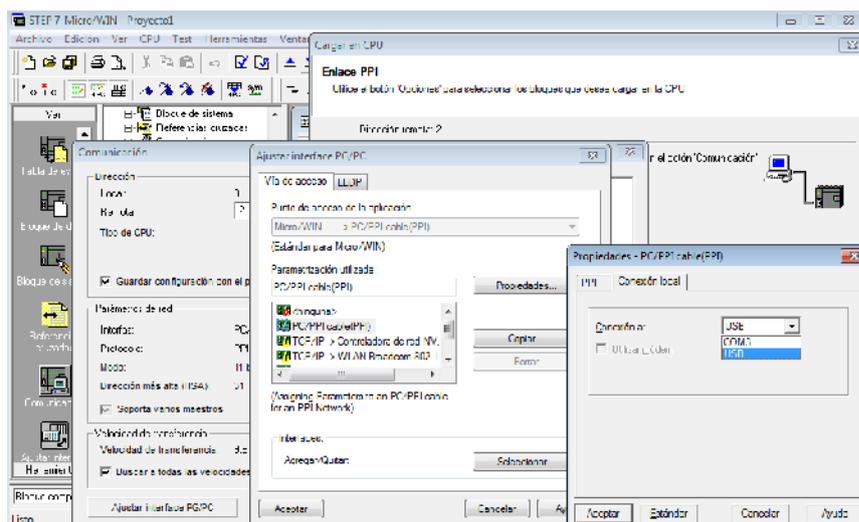


Figura 3.20: Ventana para configurar el tipo de comunicación USB.

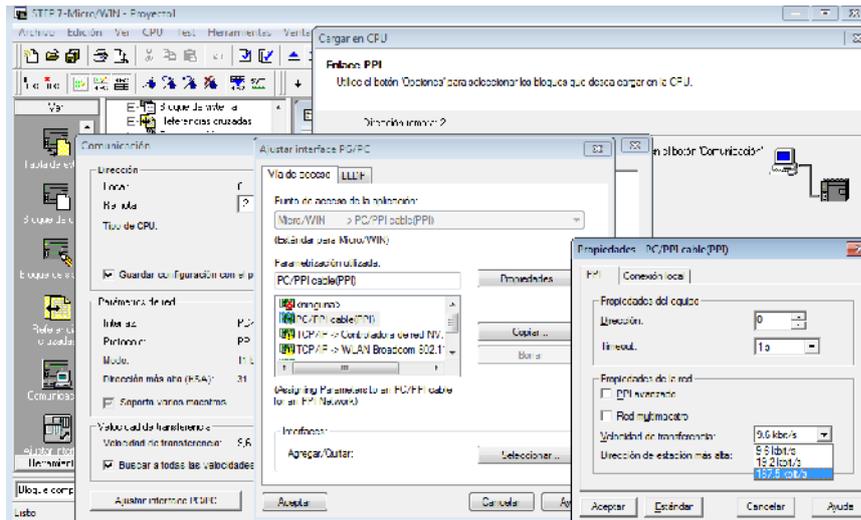


Figura 3.21: Ventana para configurar la velocidad (*Kbit*) de la comunicación.

3.5.2 Comunicación entre el PLC e Intouch

Para establecer la comunicación entre el PLC y el Intouch se debe tener previamente instalado un tipo de OPC adecuado en este caso se trabajará con el KEPServer EX5.

Con los siguientes pasos se establecerá la comunicación correcta:

1. Abrir el software KEPServer EX5 que será el que permita la comunicación, configurado ya previamente (Ver Figura 3.22).

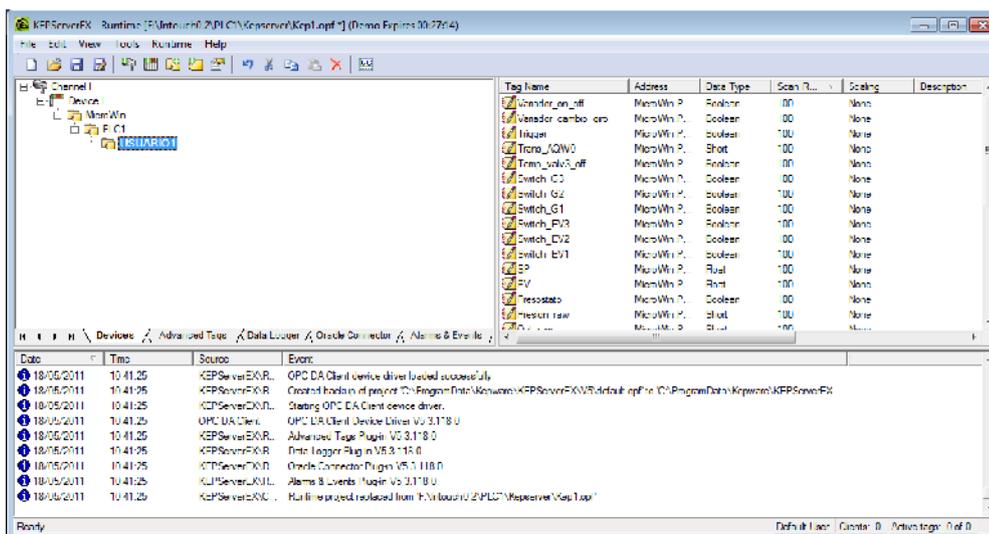


Figura 3.22: Pantalla de KEPServer EX5 inicializado.

Luego de haber inicializado el KEPServer EX5 se debe abrir el software Intouch, con la aplicación del proceso tal como se muestran en la figura 3.23. En esta ventana escogemos la aplicación que deseamos abrir y si no la tenemos aquí damos un clic derecho sobre el espacio en blanco de la pantalla y seleccionamos *Find Application* y buscamos nuestro proyecto (Ver Figura 3.24)

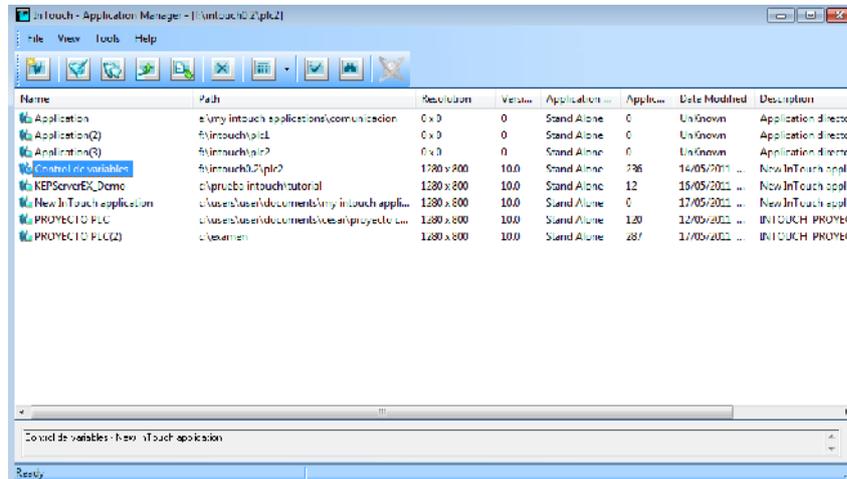


Figura 3.23: Ventana de aplicaciones de Intouch.

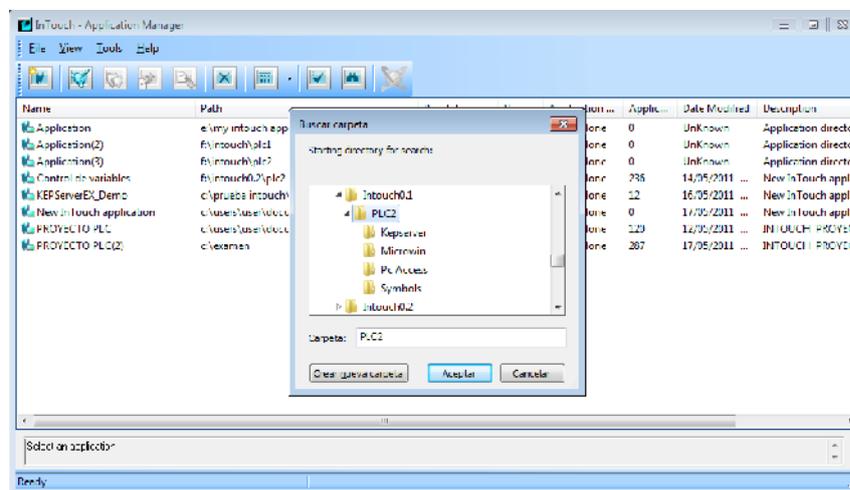


Figura 3.24: Ventana de búsqueda de aplicaciones.

Una vez que se ha abierto la aplicación y tenemos las ventanas abiertas en *WindowMarker* se debe ingresar a *WindowViewer* al hacer clic sobre el enlace ubicado en la parte superior derecha de la pantalla reconocido como *Runtime*, automáticamente se inicializará *WindowViewer* (Ver Figura 3.25)

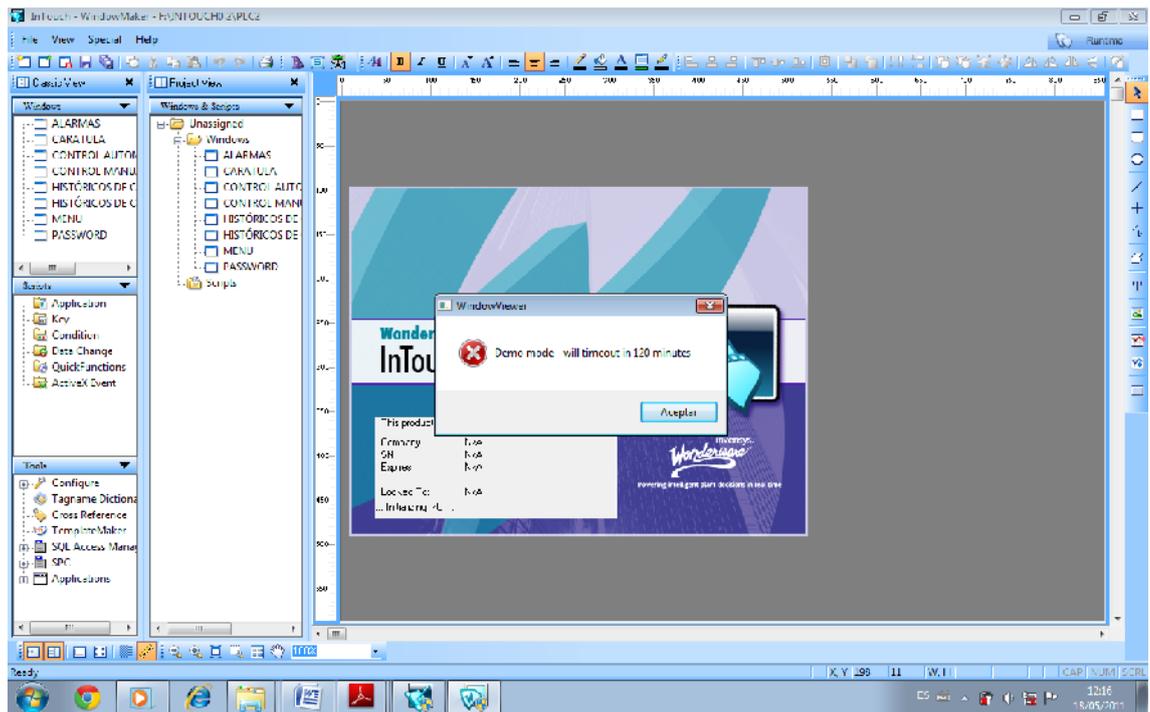


Figura 3.25: Inicialización de *WindowViewer*.

En la figura 3.26 se puede observar que se está utilizando una versión demo del software Intouch, lo cual da a conocer que tenemos una restricción en la duración de su utilización que solamente será de un tiempo de 120 minutos. Se da clic en aceptar y aparecerá la pantalla de inicio del proceso en *WINDOW VIEWER*.

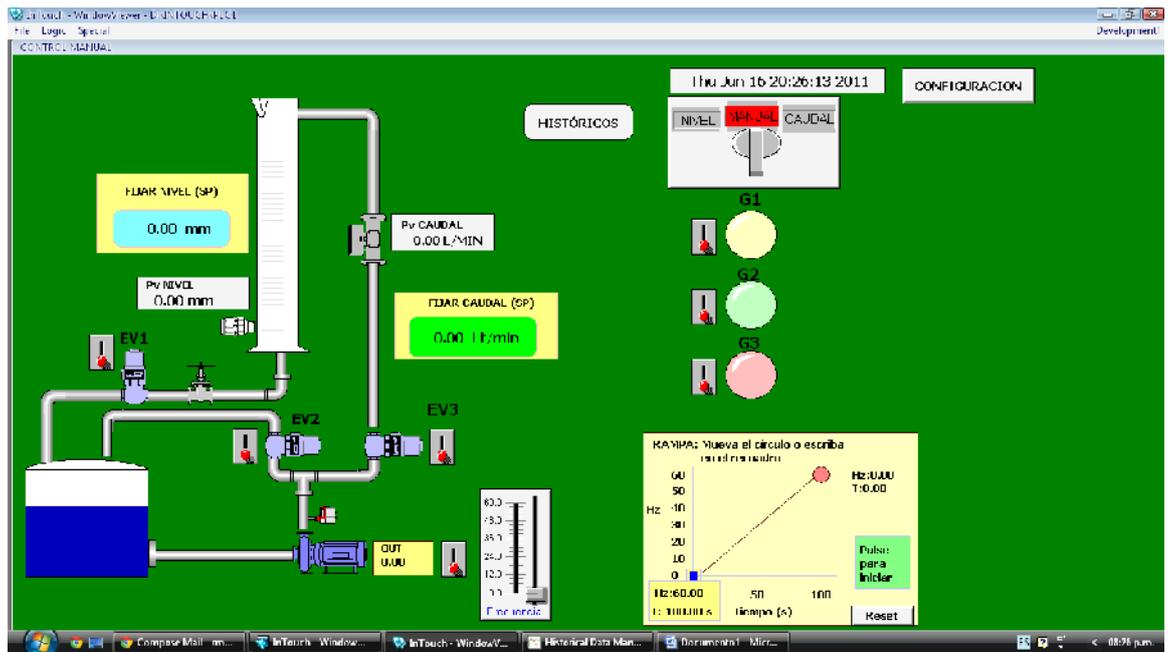


Figura 3.26: Ventana del Prototipo en operación.

Concluido con el diseño del HMI del sistema, se procederá a realizar las pruebas correspondientes y obtener resultados del prototipo para así comprobar cuál es el método óptimo control del proceso y si cumple con los objetivos planteados.

CAPITULO IV

PRUEBAS RESULTADOS CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Simulación de caudal en el sistema

Para encontrar una aproximación al caudal que se obtiene del sistema se utiliza el programa Hydroflo™ de Tahoe Design Software el cual utiliza los parámetros indicados en el Anexo¹⁹.

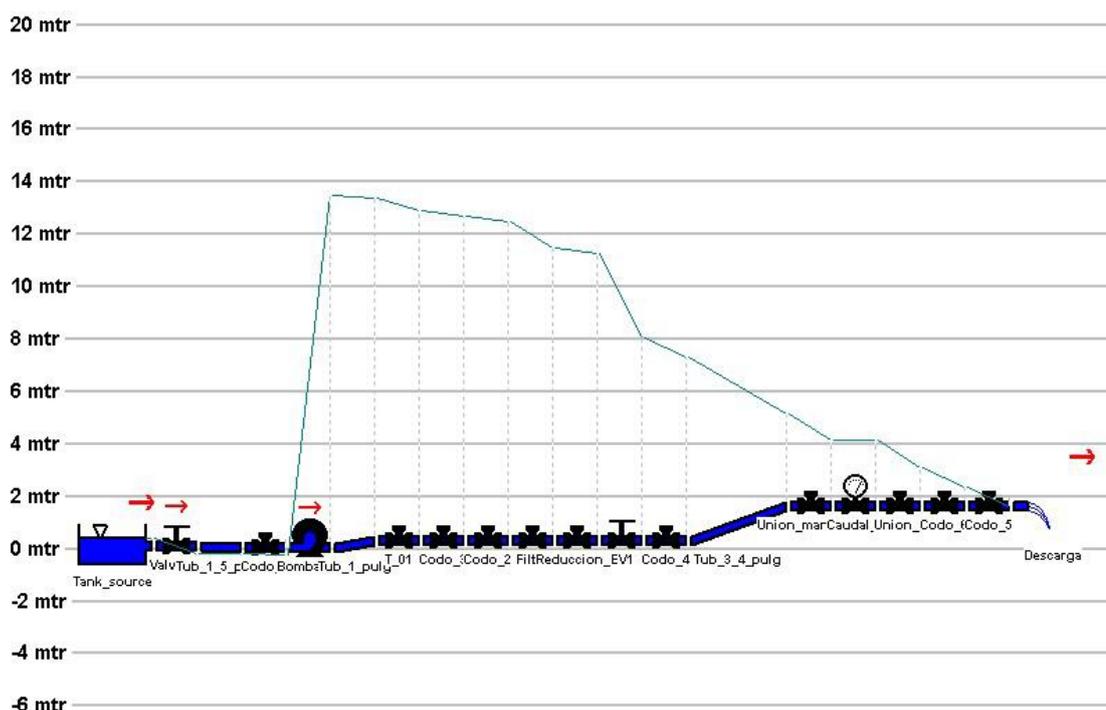


Figura 4.1 Simulación del sistema mediante Hydroflo™

En la figura 4.1 se muestra cómo desciende la presión en el sistema, principalmente a causa de la electroválvula presente en el sistema para el control de salida de caudal. Las electroválvulas servo accionadas tienen pérdidas altas a baja presión hasta que la válvula se abra completamente por diferencia de presión entre la entrada y la salida. Éste factor puede ser decisivo a baja presión de operación (< 0.5 bar) pero a mayor presión se comporta como una válvula de globo tradicional debido a su forma semejante (Figura 4.2). Por lo tanto se utiliza un coeficiente similar al de una válvula de globo para realizar la simulación de la electroválvula solenoide en el software Hydroflo™.

¹⁹ Anexo 1: Resultados del cálculo del sistema con Hidroflo

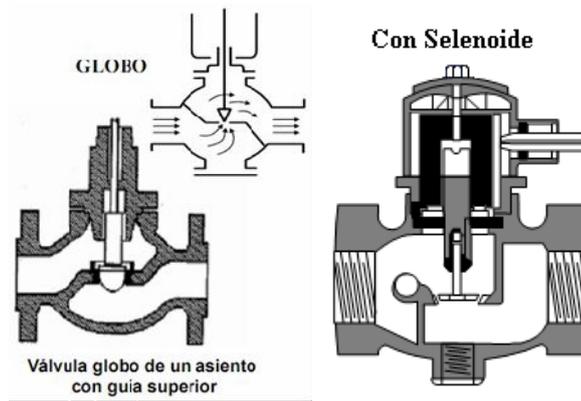
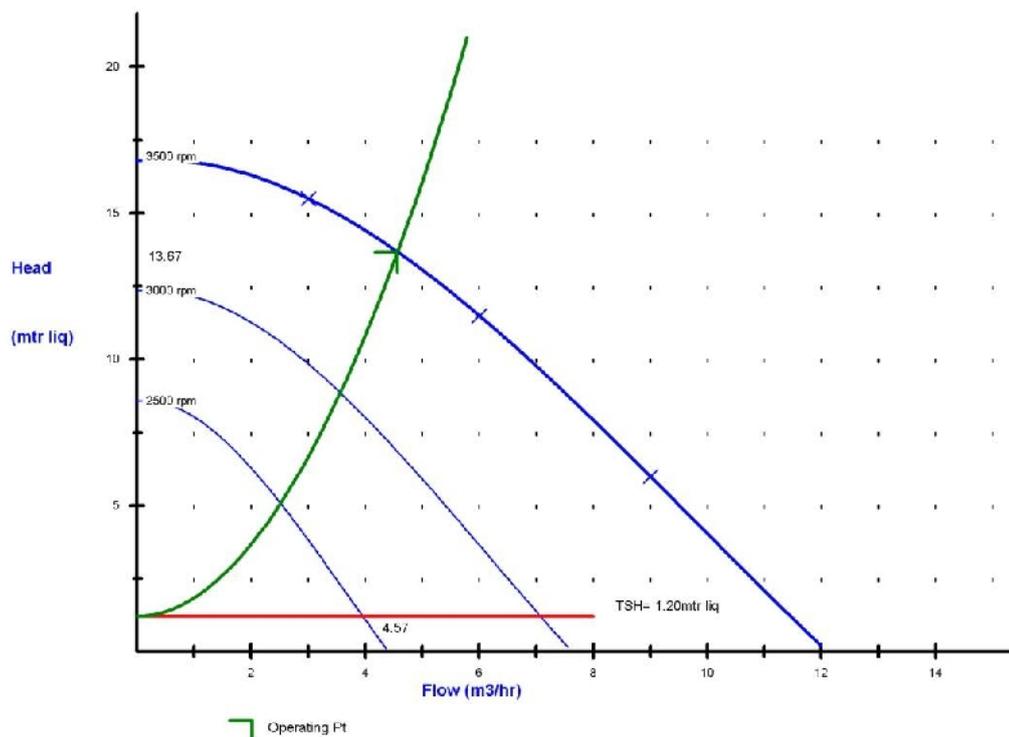


Figura 4.2 Semejanza entre la forma de una válvula de globo y una válvula solenoide.

El método utilizado para la simulación de caudal se basa en la ecuación de *Darcy-Weisbach*²⁰ que toma en cuenta la velocidad del fluido para calcular un “factor de fricción equivalente y además permite utilizar la fórmula para sistemas abiertos”²¹. Además ha sido el método elegido para la comprobación manual del flujo de sistema referida en el capítulo 2 del presente documento.



²⁰ QUEZADA, Celerino. *Darcy y su contribucion a la hidraulica*. Chile 2007. <http://www.ciencia-ahora.cl/Revista18/10DarcyHidraulica.pdf>

²¹ Hidráulica de los canales abiertos. *Ven Te Chow*. 1982. ISBN 968-13-1327-5

Figura 4.3 Curva del sistema mediante Hydroflo

Los datos de la curva de la bomba se han tomado del catálogo original y se han elegido tres diferentes velocidades de operación de la bomba para verificación posterior. No se han ingresado al programa datos de cabeza de presión positiva porque estos no existen en el catálogo de la bomba.

En la figura 4.3 se pueden observar los puntos simulados de intersección entre la curva del sistema y la curva de la bomba siendo el más importante el que se encuentra a velocidad de 3500 rpm y muestra un flujo máximo de 4.41 —.

4.2 Calibración del transmisor de caudal

Antes de realizar las pruebas de caudal en el sistema es necesario explicar el método de calibración del dispositivo de medición de caudal.

Todo el proceso se realiza en el programa del PLC siguiendo los siguientes pasos:

4.2.1 Captación de los pulsos

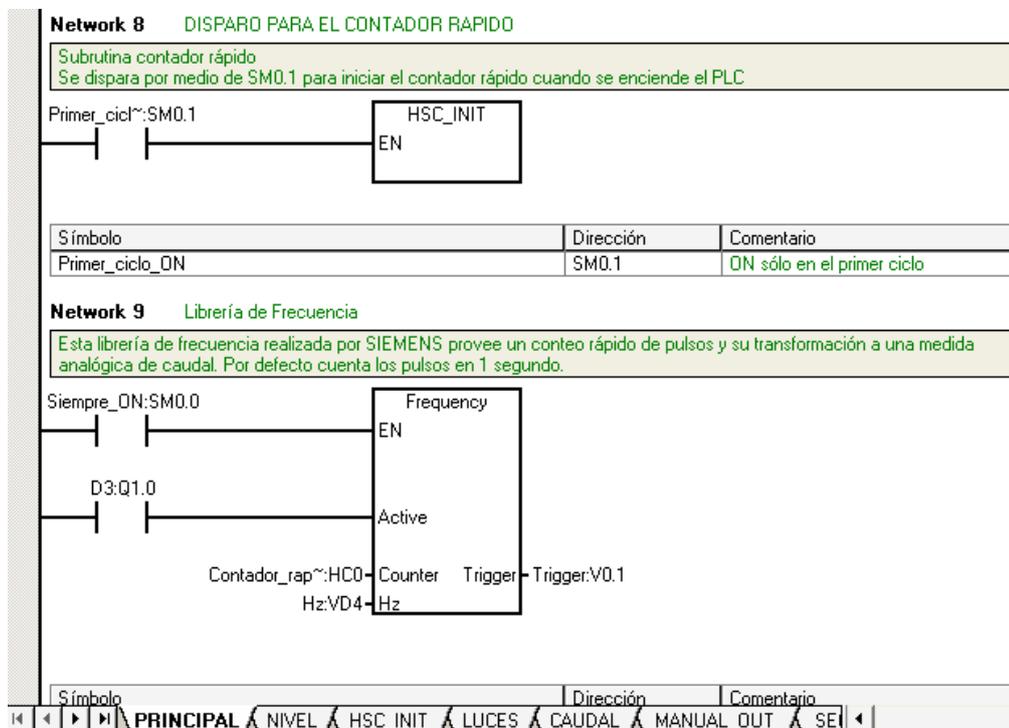


Figura 4.4 Librería de frecuencia

Por medio de la librería “*Frecuency*” (Figura 4.4) de la misma SIEMENS se facilita el cálculo de la frecuencia a través de pulsos. Se ha utilizado el programa estándar haciendo una modificación al intervalo de tiempo de conteo. Originalmente es 1.0 segundos, un tiempo que es demasiado extenso y provoca la variación del caudal en forma demasiado escalonada. Para que la medición se actualice rápidamente se ha reducido el tiempo de conteo a 0.125 segundos. Para calcular este intervalo se utiliza la siguiente fórmula:

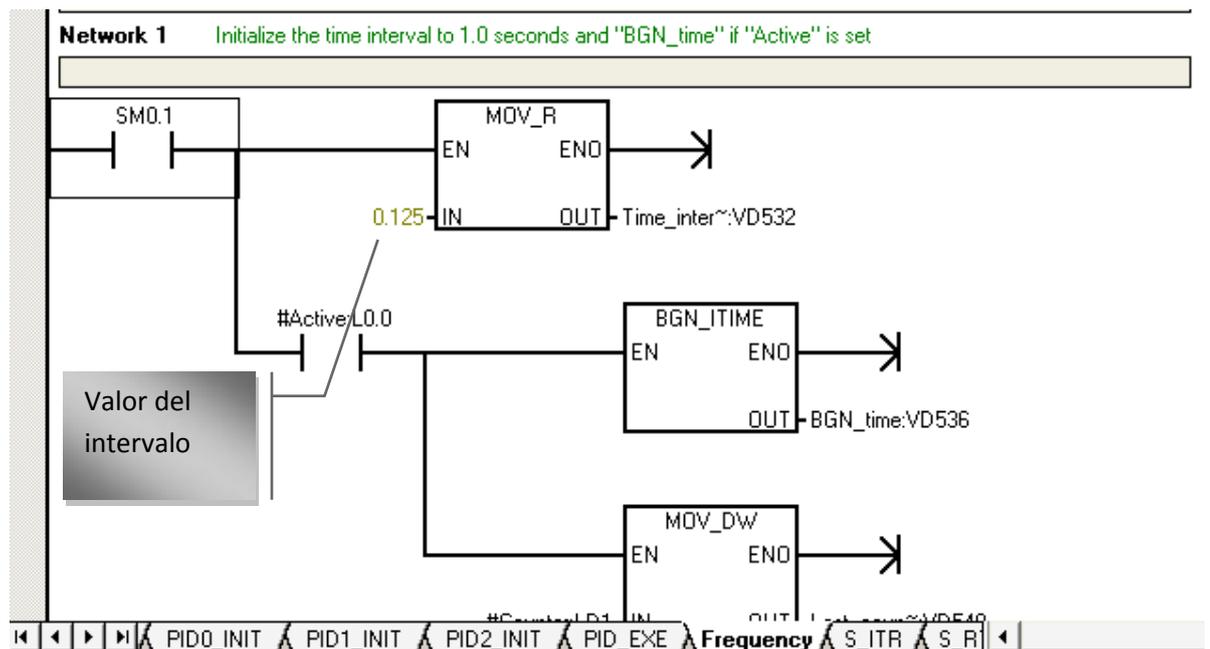


Figura 4.5 Intervalo mínimo para medición de pulsos

El valor de escalamiento de 0-320 Hz se obtiene a partir del catálogo del transmisor de caudal, y corresponde a un valor de 2-40 lt/min. El transmisor de caudal cuenta con una tolerancia de 1.5% de su escala total que corresponde a 0.6 lt/min.

4.2.2 Conversión de la frecuencia a un valor entre 0 y 32000

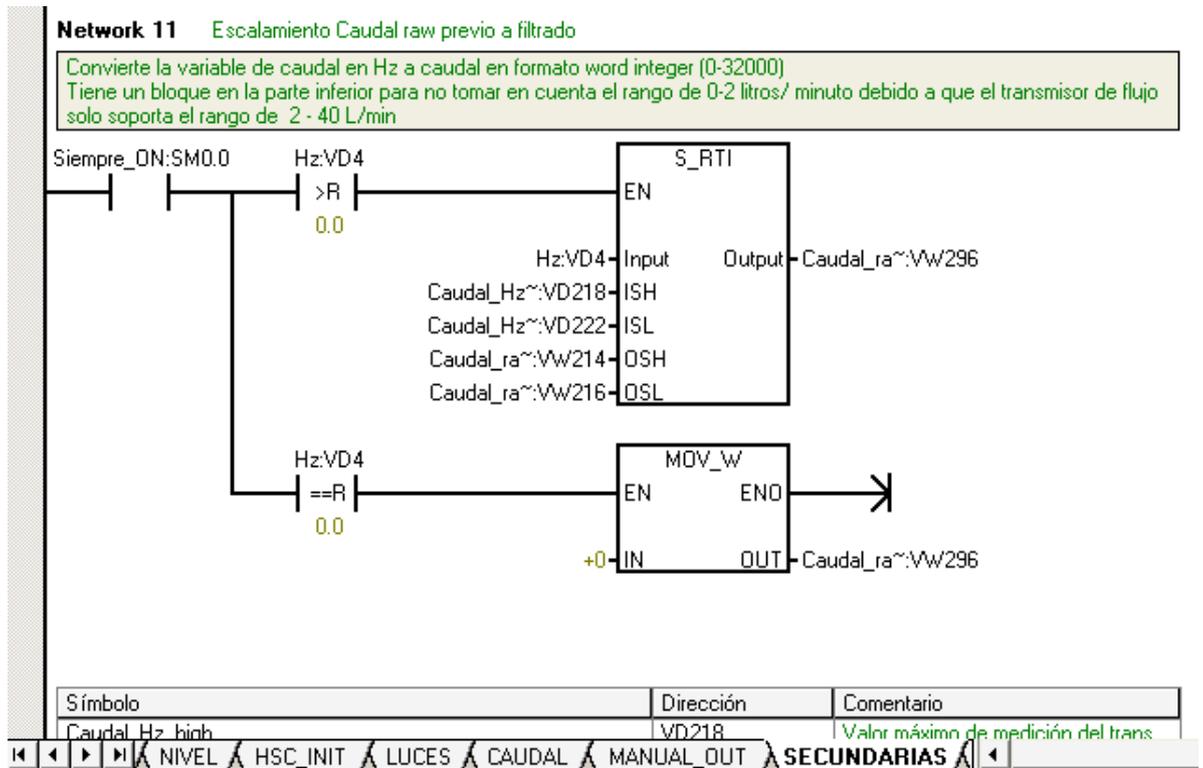


Figura 4.6 Escalamiento del caudal

Los valores para esta subrutina de escalamiento se guardan en el bloque de datos lo que permite que se puedan modificar durante la operación; sin embargo para que los cambios sean permanentes se deben modificar en el bloque de datos.

```
//DATOS PARA CONFIGURAR LA SALIDA RAW (0-32000) DEL TRANSMISOR DE CAUDAL
Caudal_raw_high:VW214 32000
Caudal_raw_low:VW216 680
Caudal_Hz_high:VD218 356.88
Caudal_Hz_low:VD222 0.0
```

Figura 4.6 Información en el bloque de datos del PLC

Como el transmisor no envía pulsos a partir de 2 Lt/min, se debe indicar un punto mínimo en la variable *Caudal_raw_low*. El punto máximo se debe calibrar en la variable *Caudal_Hz_High*.

4.2.3 Filtro de la señal del transmisor de caudal

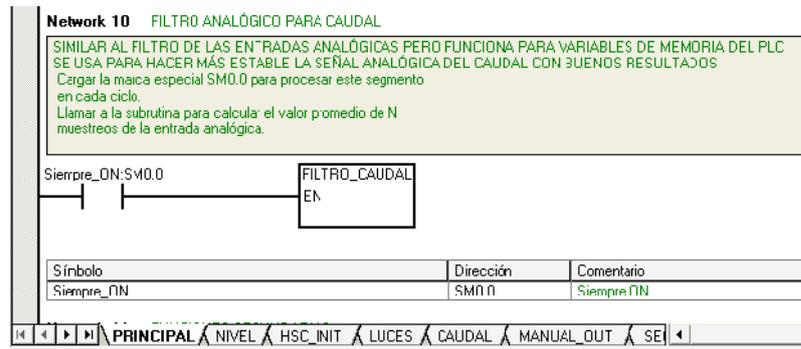


Figura 4.7 Filtro analógico para el caudal

El filtro para caudal se debe calibrar para que la señal del caudal tenga muy pocos picos de medición y permita cierta estabilidad. Este programa utiliza una ecuación de filtrado y ha sido modificado en los valores de ancho de banda.

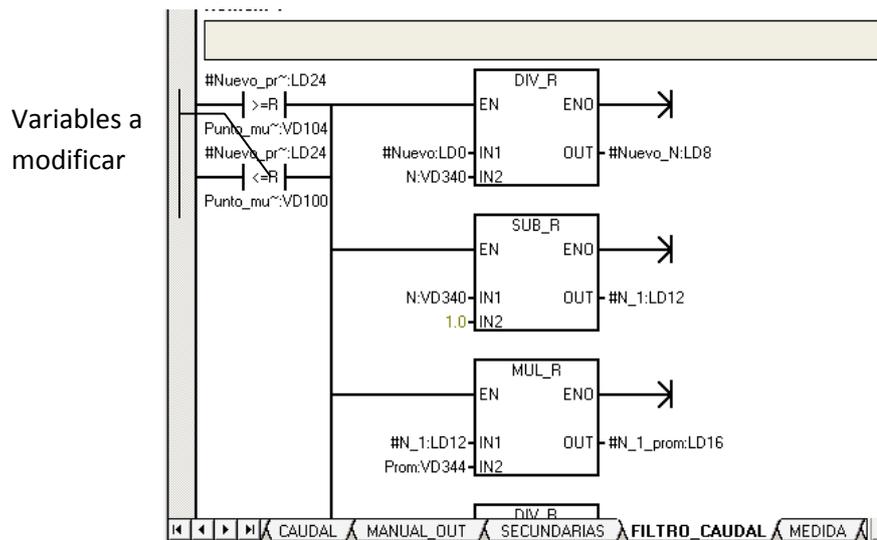


Figura 4.8 Programa de filtrado para caudal

Los valores también se pueden cambiar durante la operación pero para que sean permanentes se los debe cambiar en el bloque de datos del sistema:

```
//TOLERANCIA PARA FILTRAR LA VARIABLE DE CAUDAL
Punto_muerto_superior:VD100 3.0
Punto_muerto_inferior:VD104 -3.0
N:VD340 120.0
```

Figura 4.9 Tolerancia para el filtro de caudal

4.2.4 Pruebas en el sistema para verificar el caudal

Con un cronómetro se deben verificar por lo menos dos valores situados en puntos extremos de medición como 4 lt/min y 20 lt/ min. Considerando que el volumen del agua dentro del tubo de ensayo tiene un litro cada 50 mm de altura y 20 litros totales se debe comparar el tiempo de llenado con el caudal fijado

4.3 Datos reales del caudal con respecto a la velocidad de la bomba

Se realizó una prueba de aceleración partiendo desde 0 a 3500 rpm en un tiempo de 100 segundos para obtener datos del transmisor de caudal una vez que éste se ha calibrado.

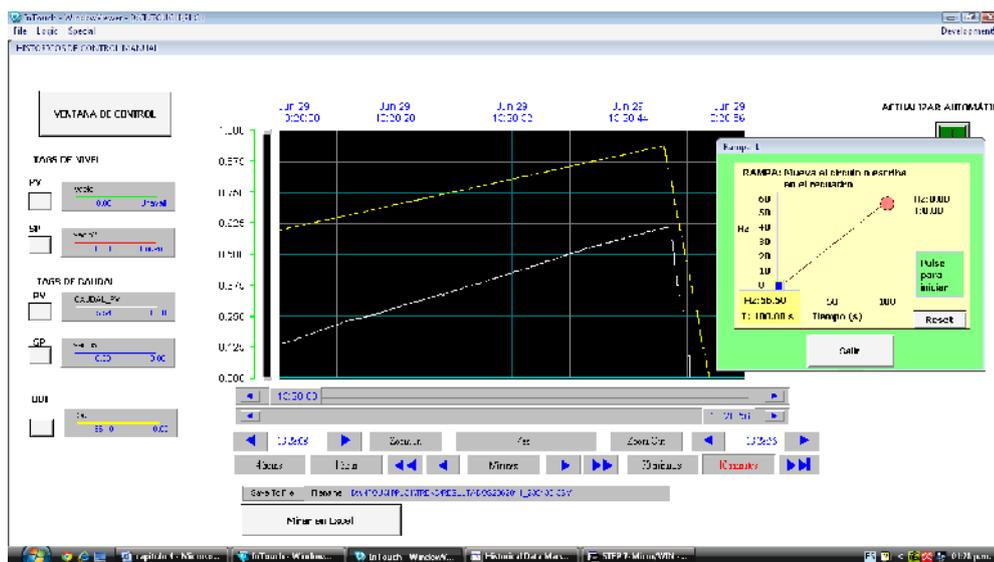


Figura 4.10 Velocidad de la bomba con respecto al caudal en el programa Intouch

La prueba permite obtener datos reales y compararlos con los datos de simulación y de cálculo. Estos datos se guardan desde el programa Intouch en formato CSV o de archivo de texto separado por coma. A través de este archivo se hacen visibles los datos al programa Excel para realizar una tabla de datos o a cualquier otro programa ya que el formato CSV tiene un alto nivel de estandarización. Cuando los datos se transfieren a Excel se ha realizado una conversión entre las medidas de caudal (de lt/min a m^3/s) y de velocidad de la bomba (de Hz a rpm).

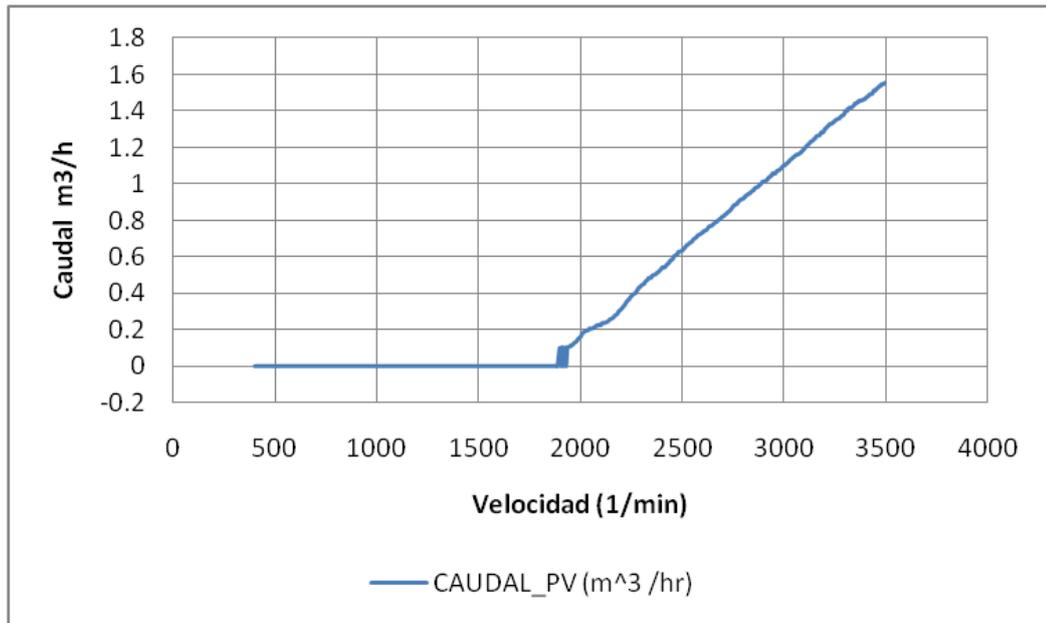


Figura 4.11 Velocidad de la bomba Vs. Caudal

A partir de la figura 4.11 se puede entender que el transmisor de caudal no funciona en el rango de caudales muy bajos (según el catálogo de menos de 0.5 gl/min) debido a que se necesita una fuerza mínima impulsora del agua para que la rueda de la turbina tenga un movimiento.

Se puede realizar además una comprobación de la proporcionalidad entre el flujo de caudal y la velocidad, factor clave puesto que el flujo es el factor a controlar en este sistema.

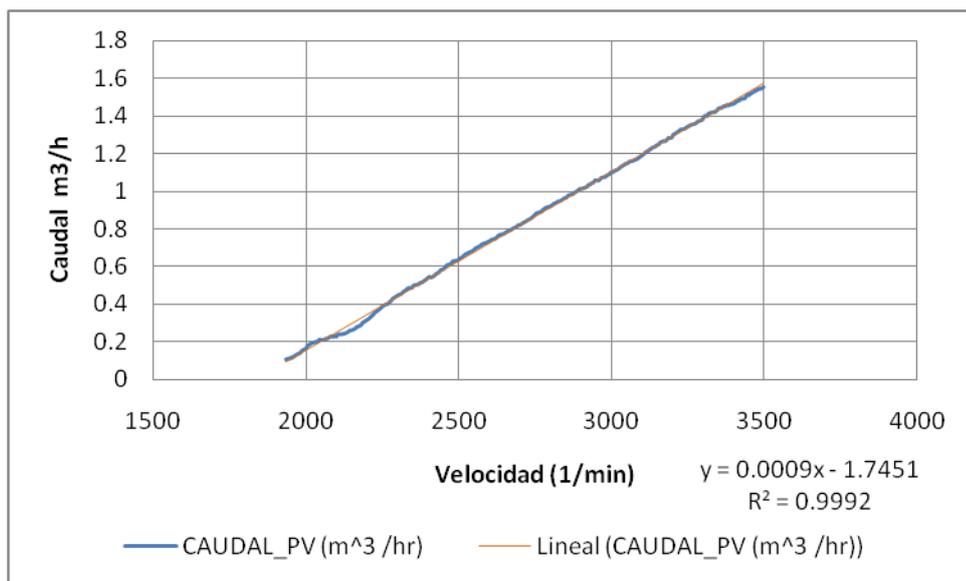


Figura 4.12 Comprobación de la linealidad del caudal vs velocidad

Realizando una regresión lineal (Figura 4.12) se encuentra que el caudal tiene una relación lineal con la velocidad porque es una ecuación de un solo grado y los datos coinciden en una manera satisfactoria con la ecuación presentada por la cercanía al 1 del factor .

Haciendo uso de esta ecuación se presenta una tabla de velocidad con respecto al caudal:

<i>Caudal = 0.0009*velocidad - 1.7451</i>		
Velocidad	Caudal	Resultados Hydroflo™
2500	0	2.25
3000	0.9549	2.8
3500	1.4049	4.57

Tabla 4.1 Resultados reales vs simulación

Los datos presentados en la tabla 4.1 pueden parecer inconsistentes debido a que no se ha incluido la eficiencia de la bomba en la simulación. La eficiencia de la bomba en el catálogo se encuentra entre 40 y 45 %.

4.4 Cálculo de la eficiencia de la bomba

Para calcular la eficiencia de la bomba se debe hacer la relación entre el caudal real y el caudal simulado con el programa HydroFlo™.



La eficiencia de la bomba está muy lejos de lo que indica en el catálogo en donde se muestra una eficiencia mínima de 40%.

4.5 Control PID para la variable Nivel

4.5.1 Calibración de la variable de proceso

La variable “nivel” ha sido obtenida a través de un transmisor de presión el cual envía hacia el PLC una corriente de 4 a 20 mA rango escalado en el PLC entre 6400 y 32000 aproximadamente.

Para calibrar estos valores se debe verificar visualmente que los valores que aparecen en el HMI coincidan con los valores en el tubo de medición.

Los datos para calibración son los siguientes:

```
//DATOS PARA CONTROLAR LA ESCALA DE LA VARIABLE DE PRESION
PV_raw_High:VW120 32150
PV_raw_Low:VW122 6525
PV_meter_High:VD126 1000.0
PV_meter_Low:VD130 0.0
```

Figura 4.13 Datos para controlar la escala de nivel

Estos datos posteriormente son escalados hacia un valor de 6400-32000 que sirve para calcular el PID de la variable de nivel.

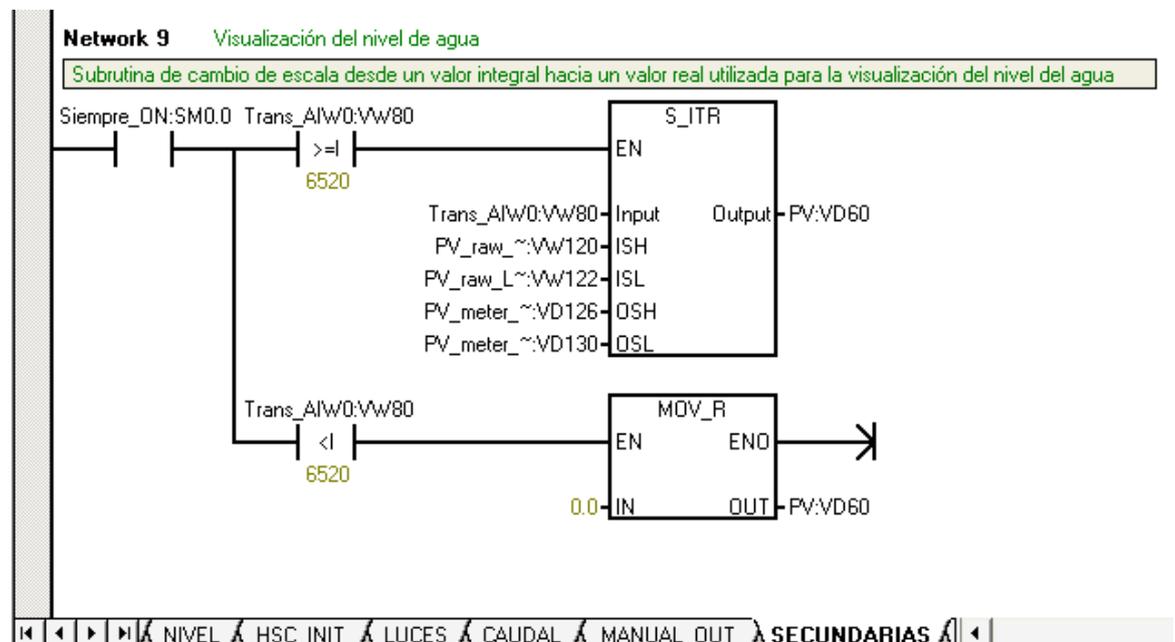


Figura 4.14 Primer escalamiento para medir nivel

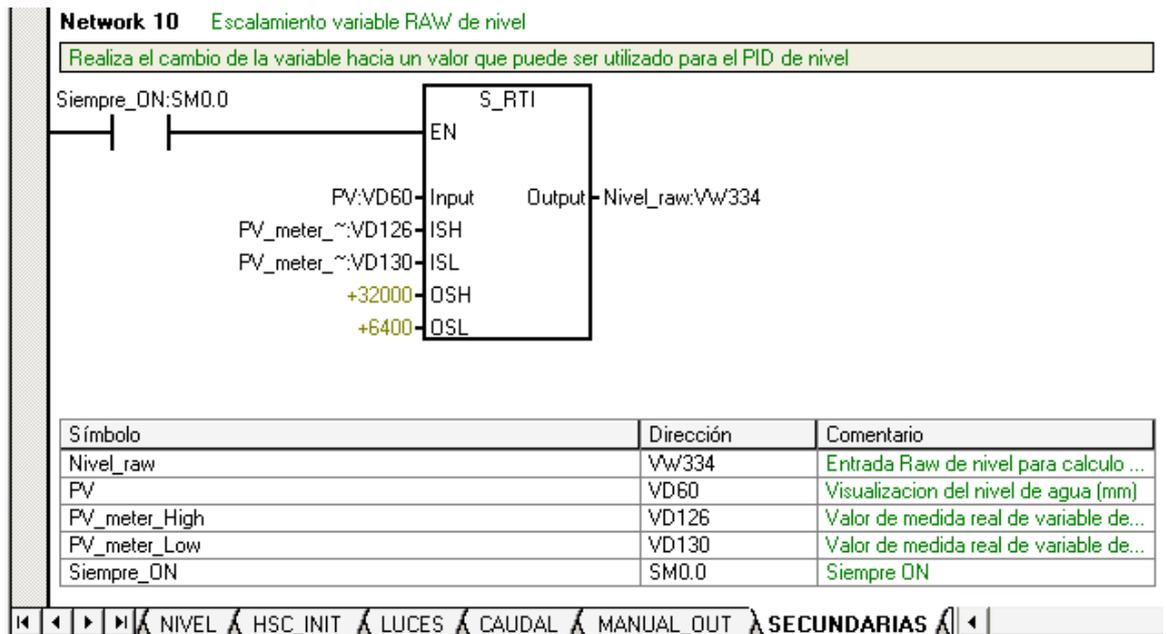


Figura 4.15 Segundo escalamiento para medir nivel

El valor obtenido por la variable de nivel es bastante preciso, sin embargo aún en estado completamente estable no se obtiene una línea recta sino un zigzag constante

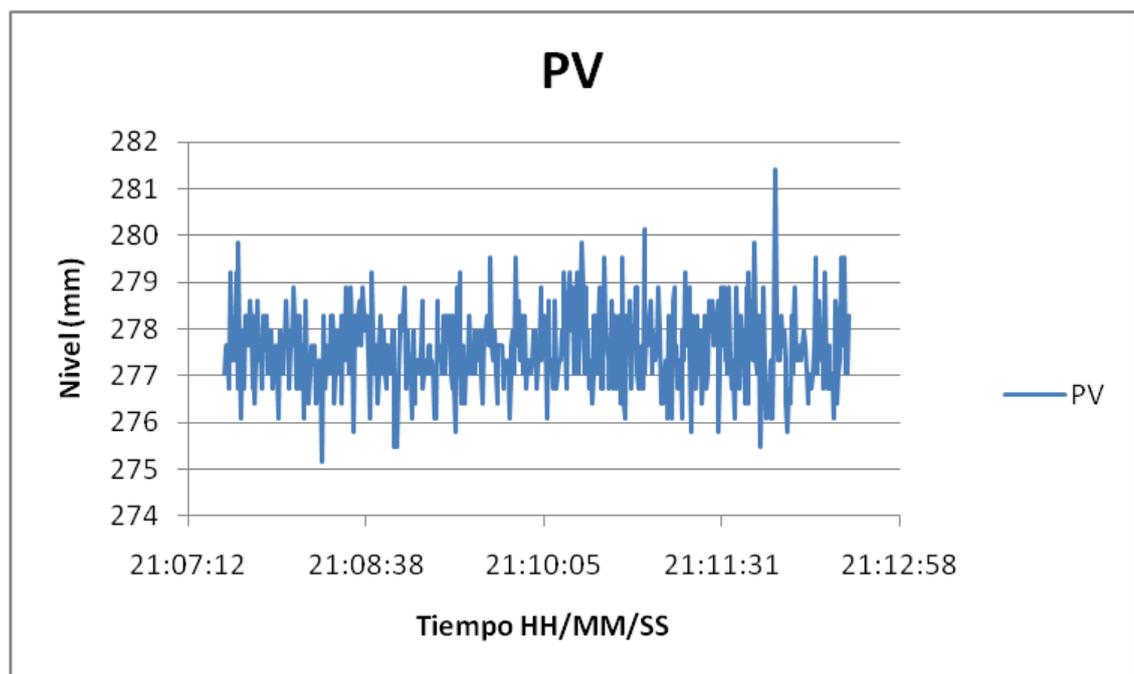


Figura 4.16 Variable de presión sin filtro

Para la figura 4.16 se han calculado en una hoja de Excel con el complemento Estadística descriptiva algunos datos de una muestra de 500 puntos. El constante

zigzagueo se debe a que el transmisor tiene una exactitud máxima de 5 mm según el catálogo y sube o baja dentro de ese rango sin estabilizarse completamente. Esto no es adecuado para el control porque afecta directamente a la variable OUT que sale al motor desestabilizando el sistema y disminuyendo la precisión.

Nivel PV	
Media	277.549469
Error típico	0.03837941
Mediana	277.6585
Moda	277.0341
Desviación estándar	0.85904748
Varianza de la muestra	0.73796257
Rango	6.2439
Mínimo	275.161
Máximo	281.4049
Cuenta	501

Tabla 4.2 Datos estadísticos de la variable de nivel sin filtrar

Los datos de la tabla 4.2 muestran que la media, la mediana y la moda son similares y por eso los datos tienen una forma simétrica. El error típico es muy bajo, la desviación estándar de 0.85 es igualmente un valor bajo y la varianza de la muestra indica que un alto porcentaje del conjunto cumple con la precisión requerida. Un rango de variación entre el mínimo y el máximo se puede tomar en cuenta debido a que es una muestra estable y con muchos datos; este rango es de 6.24 mm y es demasiado alto para el cálculo PID. Para solucionar este problema en parte se puede utilizar un filtrado de entradas analógicas.

Una vez se utiliza el filtrado se pueden observar dos efectos:

- Si se aumenta el número de muestreos la variable se hace más estable pero más lenta al cambio de valor.
- Si se aumenta la banda muerta la variable deja de tener picos pero si se aumenta demasiado se hace más lenta al cambio súbito de valor.

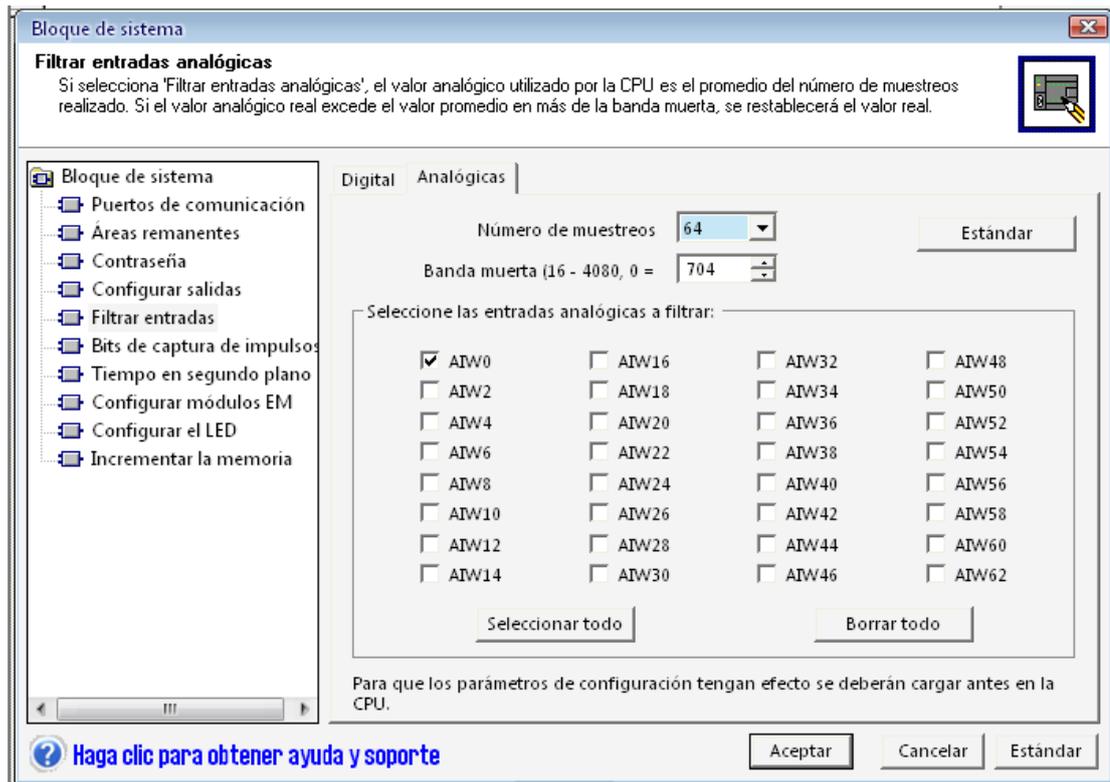


Figura 4.17 Filtrado de entrada analógica

Con la variable filtrada se obtiene la siguiente figura:

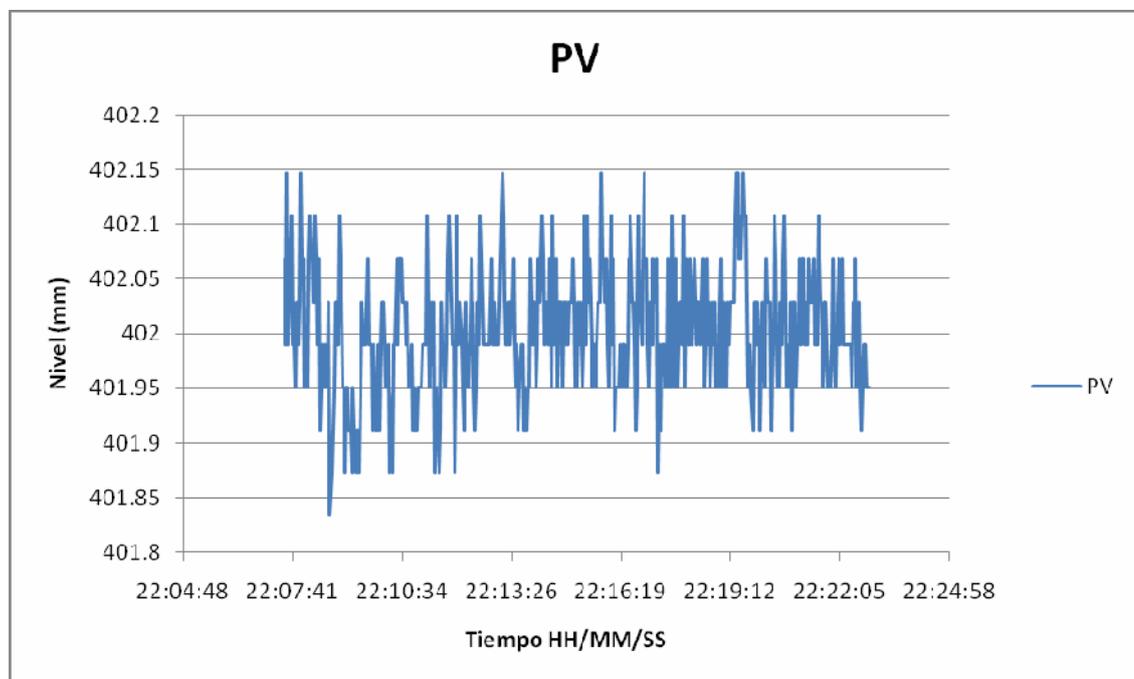


Figura 4.18 Variable de presión filtrada

La diferencia es muy notoria si se revisan los datos:

<i>PV</i>	
Media	402.001842
Error típico	0.00254916
Mediana	401.9902
Moda	401.9902
Desviación estándar	0.05705788
Varianza de la muestra	0.0032556
Rango	0.3122
Mínimo	401.8341
Máximo	402.1463

Tabla 4.3 Variable de nivel filtrada

En la tabla 4.3 se puede observar que la moda, mediana y media son similares con un grado de exactitud muy grande lo que indica la simetría en los datos de la muestra. El error típico también indica una gran exactitud. Los datos de desviación estándar muy bajo y varianza de la muestra cercana a cero indican que un porcentaje casi del 100% de la muestra se encuentra dentro del rango permisible. El rango entre el mínimo y el máximo valor medido es de menos de 1 mm y es aceptable con respecto al rango requerido de máximo 5 mm.

4.5.2 Datos de la configuración PID de nivel

El control PID funciona mediante una subrutina oculta del sistema que se inicia mediante el asistente de operaciones del programa Microwin. Los datos necesarios para que el control PID haga los cálculos previstos se guardan en el bloque de datos y en diferentes variables que el PLC asigna para tal efecto.

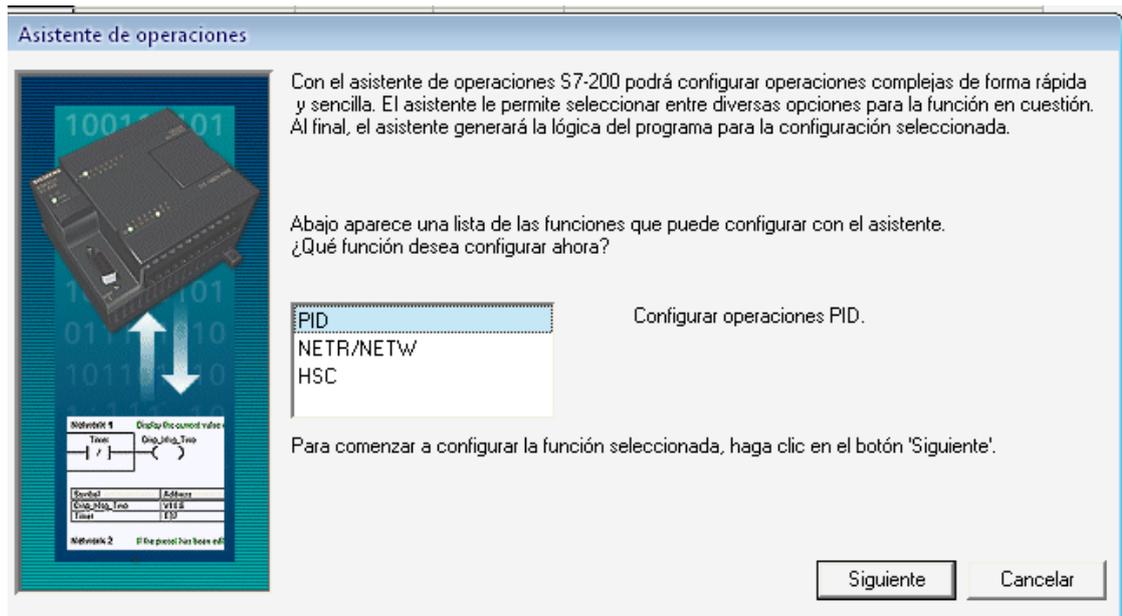


Figura 4.19 Asistente de operaciones

Los parámetros que necesita el PID para funcionar son los siguientes:

- Límites de consigna de lazo:

Indican la variable que se va a controlar, en este caso milímetros entre 0.0 y 1000.0.
- Tiempo de muestreo:

Se utiliza el valor mínimo, en este caso 0.1 segundos.
- Ganancia

Permite que la variable OUT cambie con respecto al tiempo en mayor o menor medida; 7.5
- Tiempo de acción integral:

Este tiempo mientras más largo sea indica que se va a demorar más tiempo en ajustar el error a cero; 0.21 minutos
- Tiempo de acción derivativa:

Permite estabilizar variables o predecir estados de *setpoint*; sin embargo su comportamiento es errático la mayor cantidad del tiempo y es preferible no usar esta función; 0.0 minutos
- Opciones de la entrada del lazo:

La entrada analógica de 4-20 mA se corresponde con 6400-32000

- Opciones de la salida del lazo:
 - Debido a que con un número bajo de revoluciones del motor no se envía caudal al tanque de medición, es preferible utilizar un valor de 8000-32000 para la salida desde el PID.
- Las direcciones propuestas deben estar libres en este caso se ha optado por VB620 hasta VB739
- Finalmente activar el control manual, esto ayuda para utilizar varios PID al mismo tiempo con una única salida.

```

-----
//El asistente de operaciones S7-200 ha generado lo siguiente para la función PID:
//Tabla de parámetros para PID 0.
-----
PID0_PV:VD620 0.0 //Variable del proceso
PID0_SP:VD624 0.0 //Consigna del lazo
PID0_Output:VD628 0.0 //Salida del lazo calculada
PID0_Gain:VD632 8.229426 //Ganancia del lazo
PID0_SampleTime:VD636 0.1 //Tiempo de muestreo
PID0_I_Time:VD640 0.1927441 //Tiempo de acción integral
PID0_D_Time:VD644 0.0 //Tiempo de acción derivativa
VD648 0.0 //Suma integral o bias
VD652 0.0 //Valor de la variable del proceso almacenado en la última ejecución.
VB656 'PIDA' //Marcador ampliado de la tabla del lazo
VB660 16#00 //Byte de control del algoritmo
VB661 16#00 //Byte de estado del algoritmo
VB662 16#00 //Byte de resultado del algoritmo
VB663 16#03 //Byte de configuración del algoritmo
VD664 0.08 //Valor de desviación ajustado con el botón 'Avanzado' o con el valor esta
VD668 0.02 //Valor de histéresis ajustado con el botón 'Avanzado' o con el valor esta
VD672 0.1 //Valor de salida inicial ajustado con el botón 'Avanzado' o con el valor
VD676 7200.0 //Timeout del temporizador de vigilancia ajustado con el botón 'Avanzado'
VD680 0.0 //Valor de ganancia determinado por el algoritmo de autosintonía
VD684 0.0 //Valor de tiempo de acción integral determinado por el algoritmo de auto
VD688 0.0 //Valor de tiempo de acción derivativa determinado por el algoritmo de au
VD692 0.0 //Valor de desviación calculado por el algoritmo (si se ha ajustado el cá.
VD696 0.0 //Valor de histéresis calculado por el algoritmo (si se ha ajustado el cá.

```

Figura 4.20 Bloque de datos del Asistente PID para control de nivel

Una vez se han ingresado los primeros datos al PID se puede utilizar el Panel de sintonía PID para calcular los valores exactos. Se debe tener muy en cuenta que el nivel tiene que estar estable antes de ingresar cualquier valor por lo que se recomienda esperar hasta que la variable se estabilice o cambiar los valores de ganancia e integral manualmente para que se estabilice la variable de presión.

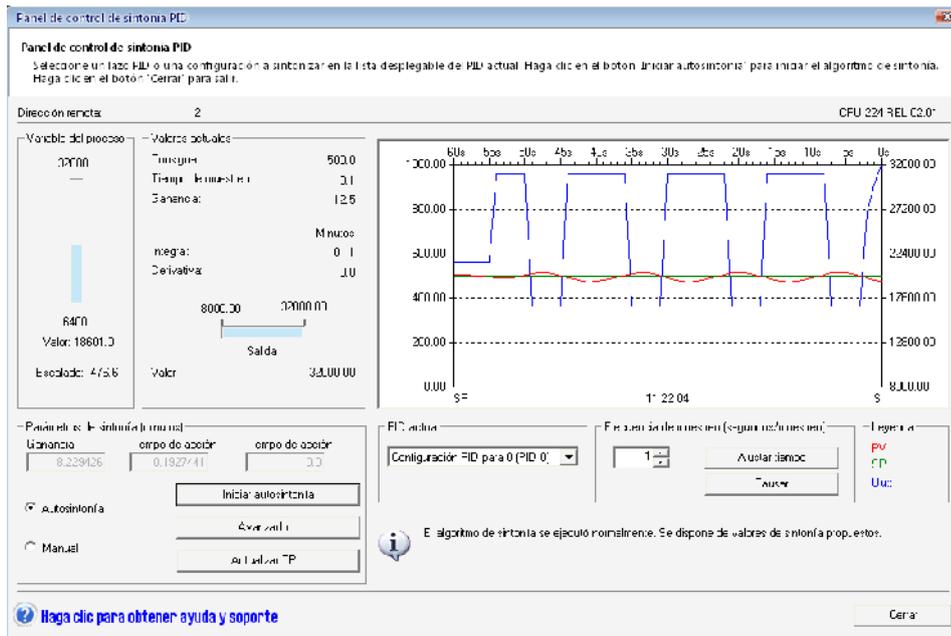


Figura 4.21 Panel de control PID

Una vez que se ha realizado este paso se debe volver a cargar los datos en el PLC para que los valores sean permanentes.

4.5.4 Control de nivel por PID

El nivel del líquido que se encuentra dentro de un tanque con una entrada y una salida de líquido se va a estabilizar el momento en que la variable de flujo de entrada se iguale con la variable de flujo de salida. Encontrar el flujo adecuado para que se estabilice el nivel a voluntad en el sistema puede ser casi imposible sin una medición del nivel y un control por lazo cerrado. El lazo PID ofrece la ventaja de ser rápido y preciso.

Para configurar el lazo PID se usa el asistente PID o se puede realizar manualmente cambiando valores a voluntad con el fin de encontrar una estabilización adecuada.

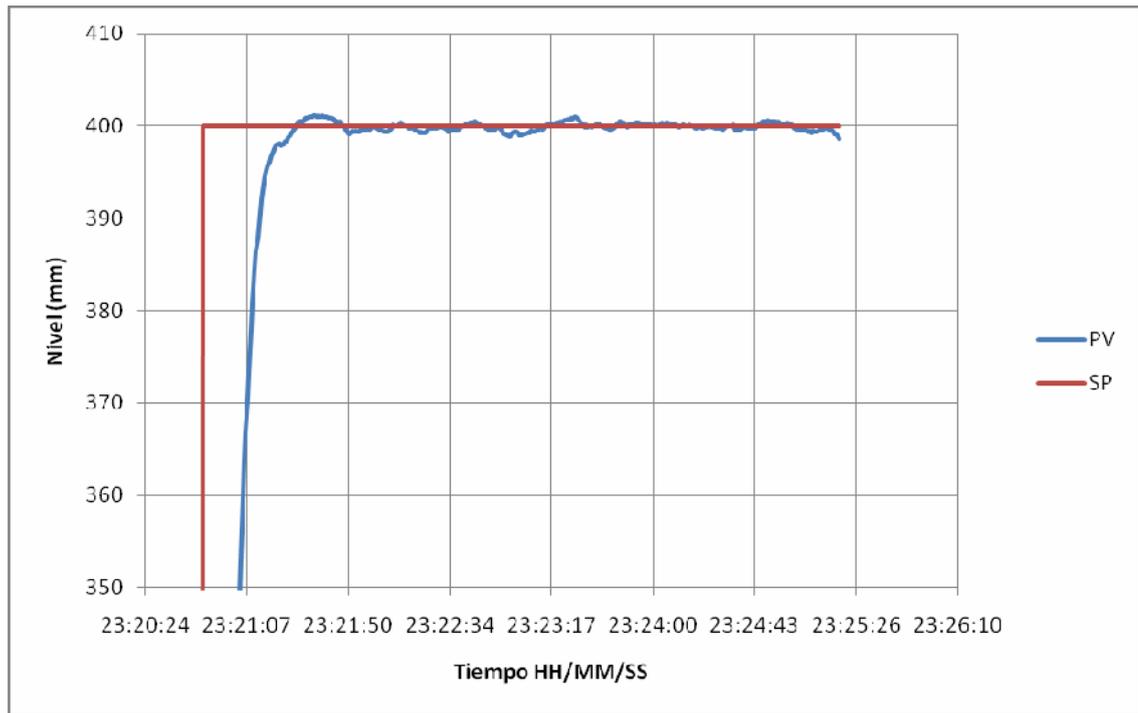


Figura 4.22 Control PID en el nivel

El control PID en el nivel es bastante exacto y rápido. Se podría clasificar como subamortiguado lo que quiere decir que la variable de proceso sobrepasa el *setpoint*. El tiempo de estabilización es de 1 a 2 minutos. El nivel no se estabiliza totalmente debido principalmente a la precisión del transmisor de nivel y a la vibración del prototipo por el funcionamiento de la bomba centrífuga.

El resumen estadístico acerca de la variable de nivel una vez que se ha estabilizado con un *setpoint* de 400 milímetros es el siguiente:

<i>PV Nivel</i>	
Media	399.939865
Error típico	0.02063763
Mediana	399.961
Moda	400.1951
Desviación estándar	0.46193257
Varianza de la muestra	0.2133817
Rango	2.6536
Mínimo	398.4781
Máximo	401.1317

Tabla 4.4 Resultados de la variable de Nivel

En la tabla 4.4 se puede observar que la media, mediana y moda son similares y corresponden a datos simétricos por lo que sí se puede hablar de estabilización. La desviación estándar menor que 0.5 (mm) y la varianza por debajo de 1 indican que un alto porcentaje de la muestra cumple con una precisión requerida de menos de 1 mm. El rango de 2.6 mm confirma que el nivel puede considerarse estable al no sobrepasar los 5 mm de tolerancia por precisión del transmisor de nivel. El valor mínimo y el valor máximo por encima y por debajo del valor de *setpoint* indican que el nivel busca estabilizarse y no tiene un error permanente en el control.

4.5.5 Reacción del PID ante los cambios de *setpoint* y a perturbaciones

El control reacciona adecuadamente ante los cambios de *setpoint* como se puede observar en la siguiente figura

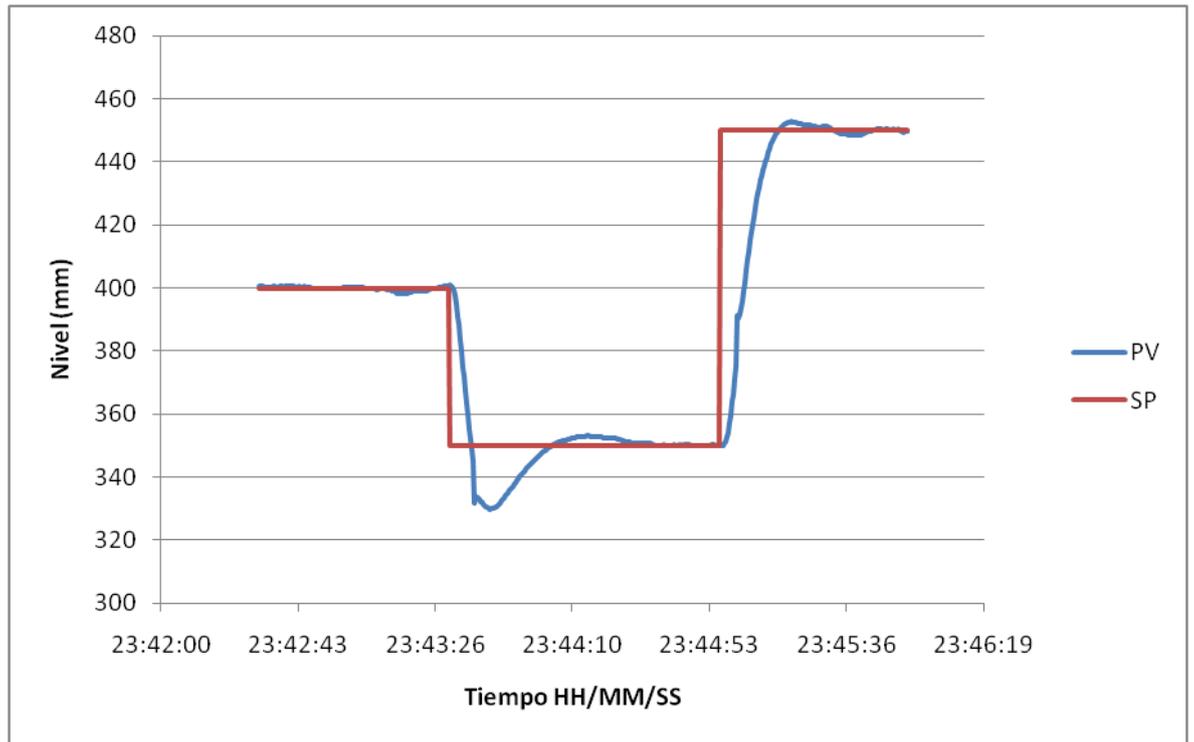


Figura 4.23 Reacción del PID ante cambios de *Setpoint*

En la figura 4.23 se puede observar que la variable de proceso se estabiliza tanto en cambios de un *setpoint* mayor a uno menor y también de un *setpoint* menor a uno mayor en menos de 2 minutos para ambos casos.

El prototipo posee una válvula manual que se usa para inducir perturbación al sistema y mediante la misma se ha realizado una prueba en la figura 4.24. La línea amarilla corresponde al *out*, la línea roja al *setpoint* y la línea verde a la variable de nivel.

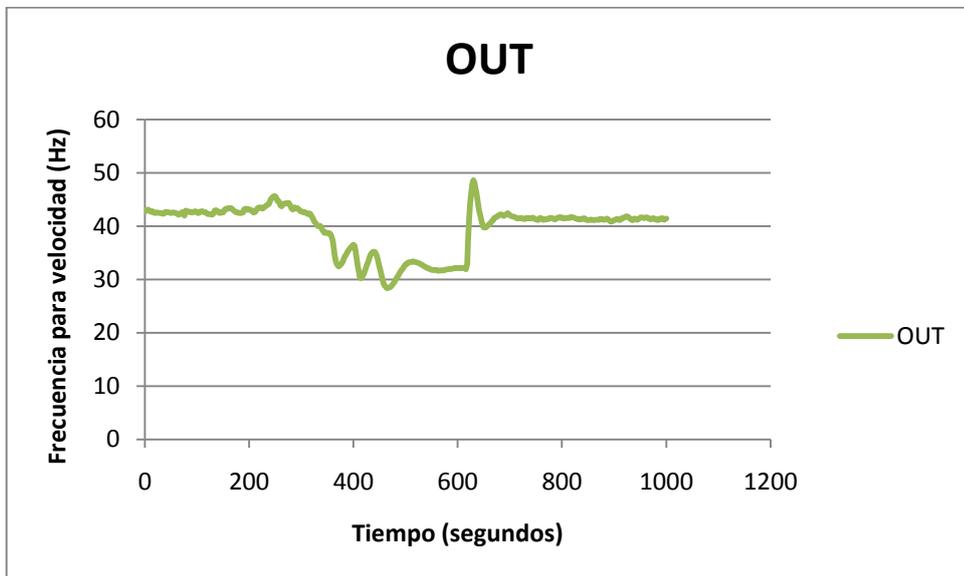
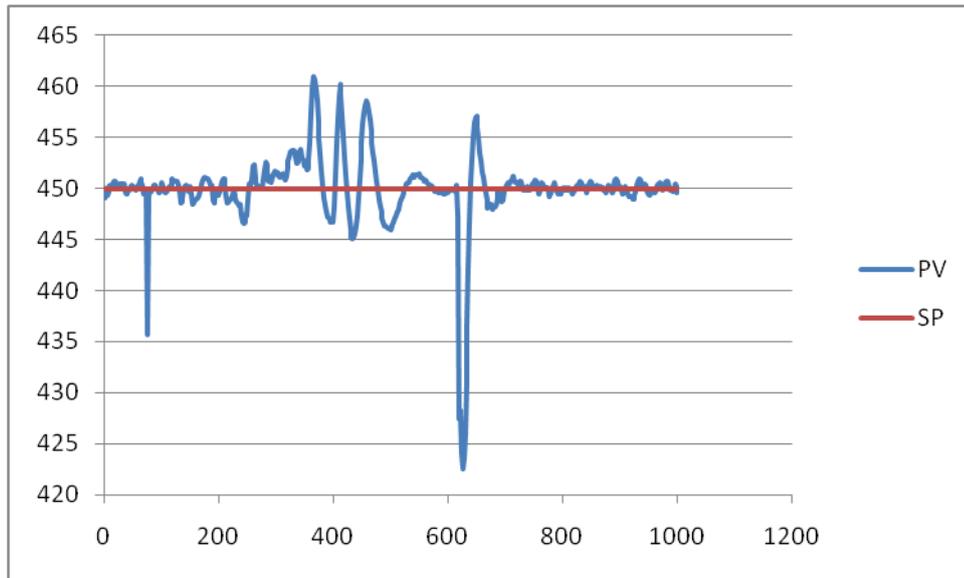


Figura 4.24 Reacción del lazo PID a perturbaciones

De la figura 4.24 podemos concluir que el lazo reacciona lentamente ante las perturbaciones pero logra igualar la variable de proceso con el *setpoint*.

4.6 Control PID para la variable Caudal

4.6.1 Datos del control PID para caudal

Los datos sugeridos para el PID de caudal son los siguientes:

- Límites de consigna de lazo: 0.0 y 40.0.
- Tiempo de muestreo: 0.1 segundos.
- Ganancia: 0.8 minutos
- Tiempo de acción integral: 0.02 min
- Tiempo de acción derivativa: 0.0 min
- Opciones de la entrada del lazo: 0-32000
- Opciones de la salida del lazo: 8000-32000
- Las direcciones propuestas deben estar libres en este caso se ha optado por VB740 hasta VB859
- Control manual activado

4.6.2 Resultados del PID de caudal

Los resultados del PID de caudal son bastante buenos, la respuesta del transmisor es rápida y se muestra bastante exacto. Se debe realizar el respectivo filtrado a la variable de caudal para obtener mejores resultados. Se puede decir que este PID es en verdad útil porque es muy rápido y exacto, permite tener resultados casi instantáneos para el PID.

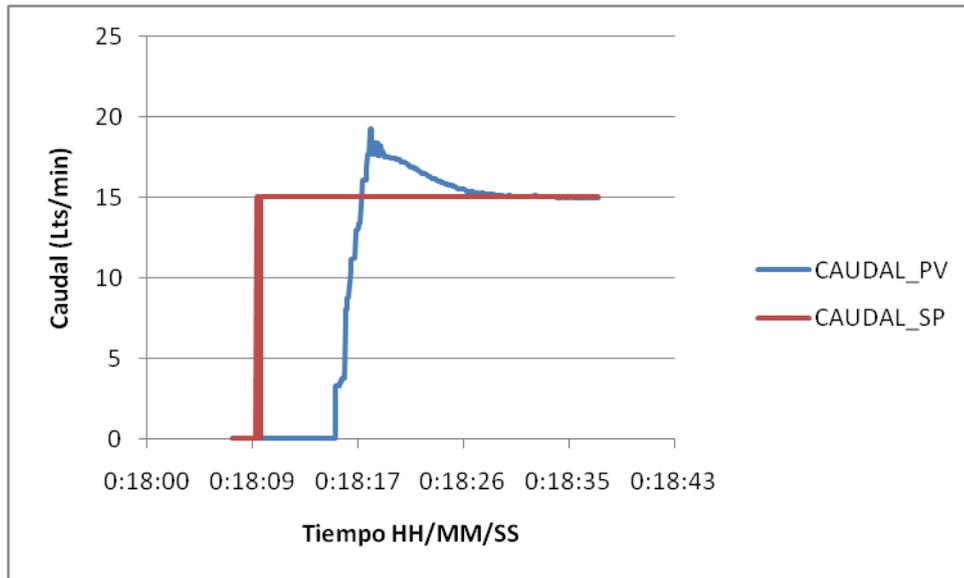


Figura 4.25 Reacción del PID de caudal

Una vez que el PID se ha estabilizado se han obtenido los siguientes datos estadísticos de la variable de proceso de caudal cuando su *setpoint* es 15 lt/min.

PV de Caudal	
Media	14.9955165
Error típico	0.00090969
Mediana	14.995
Moda	14.9925
Desviación estándar	0.02036153
Varianza de la muestra	0.00041459
Rango	0.12375
Mínimo	14.93625
Máximo	15.06

Tabla 4.5 Datos estadísticos de la variable de caudal

La desviación estándar es muy pequeña, la varianza es casi despreciable y se acerca a cero lo que indica que casi el 100% de los datos tiene gran precisión con respecto al *Setpoint*. El rango de 0.12 lt/min es mínimo. La media, mediana y moda son muy similares lo que indica simetría en la medición. Los valores mínimo y máximo son casi simétricos con una diferencia de 0.03 lts/min por lo que este control tiene una precisión de 0.03 lts/min.

4.6.3 Reacción del PID de caudal frente a cambios en el Setpoint

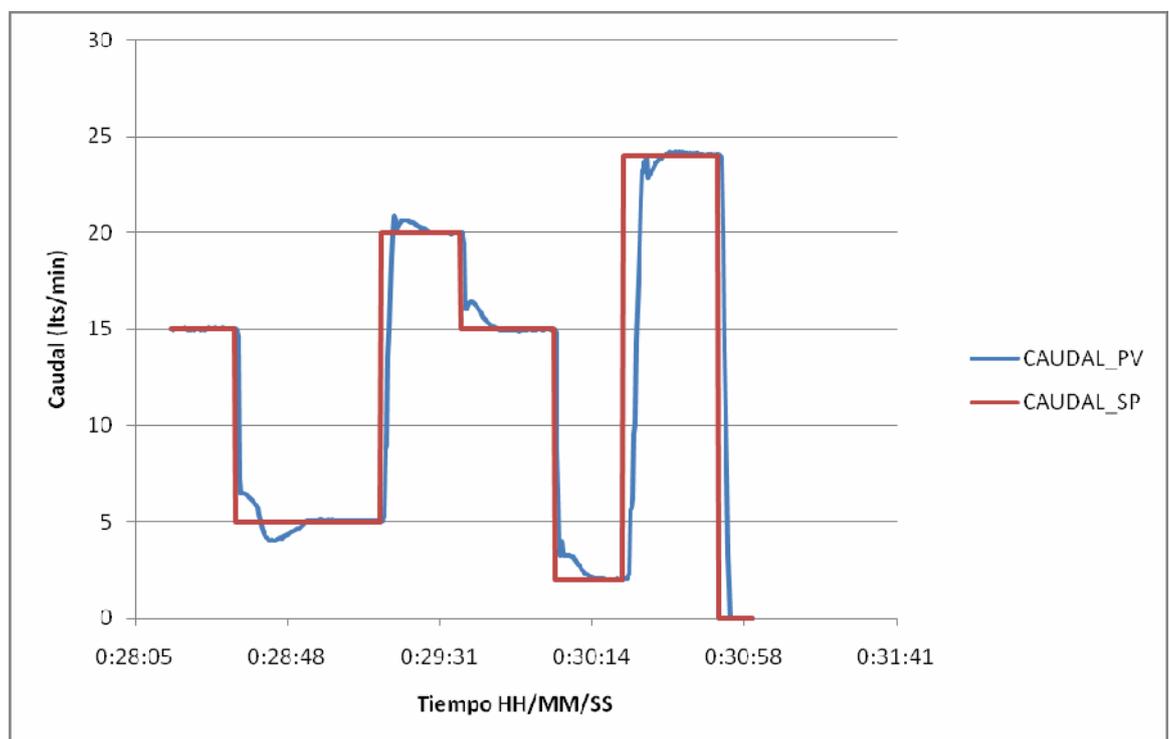


Figura 4.26 Reacción del caudal con cambios en el *Setpoint*

El control PID de caudal es muy rápido para controlar el caudal y lo hace de manera bastante exacta como se observa en la figura 4.26 en donde se han realizado cambios súbitos de subida y bajada en el *setpoint* y la variable de caudal rápidamente se estabiliza.

1.5 4.7 Medida de volumen y contador de litros

Para obtener una medida de volumen por medio de la variable de nivel, se debe multiplicar el valor del nivel por una constante.

El cálculo se ha realizado de la siguiente manera:

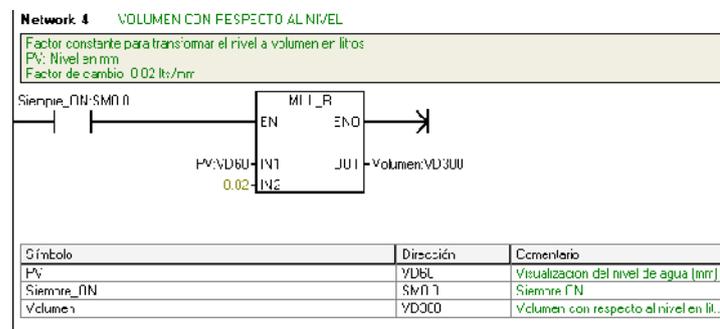


Figura 4.27 Operación para conteo de volumen

Además de contar volumen con el transmisor de presión se puede contar volumen con el transmisor de caudal de la misma manera en que lo hace un dispensador de

bebidas que debe entregar una medida adecuada. Este conteo se lo realiza a través de un temporizador que suma el caudal que circula en un periodo de tiempo muy pequeño.

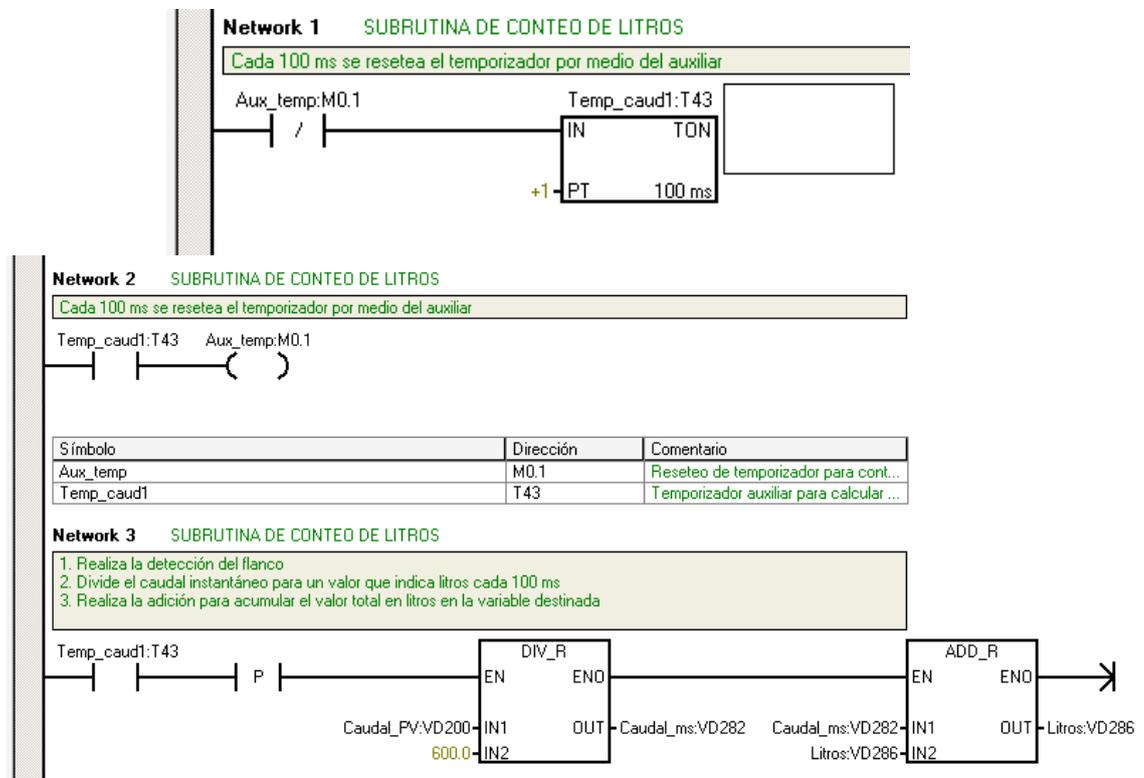


Figura 4.28 Conteo de litros por medio de caudal

Si unimos el conteo de litros y la visualización de medida es posible realizar un contador de litros con comprobación instantánea de volumen entregado.

Para esto se realizó un programa que cuenta los litros que circulan a través de transmisor de caudal a partir de un momento preciso, estos litros a su vez alimentan un reservorio virtual que se va llenando, y con la ayuda de un PID de volumen llega hasta el *Setpoint* asignado. La comprobación se realiza por medio de la visualización de volumen que se logra con el transmisor de presión.

El programa está diseñado para repetir la acción de llenado como si se tratase de un dosificador de líquido. Este tipo de dosificadores se encuentran en toda la industria y sirven para llenar todo tipo de recipientes de forma repetitiva. Este llenado debe ser exacto para evitar problemas con pérdidas económicas y para garantizar la homogeneidad del producto.

El conteo de volumen también se utiliza en dispensadores de gasolina, siendo todos éstos industriales y realizados con materiales muy fuertes por lo que pueden soportar fácilmente golpes relacionados con el cierre de la válvula. En este prototipo se debe evitar cerrar las electroválvulas que están conectadas a la bomba cuando ésta tiene una velocidad alta puesto que el golpe podría llegar a dañar ciertas partes del dispositivo sobre todo a los transmisores de nivel y de caudal debido a la desaceleración brusca.

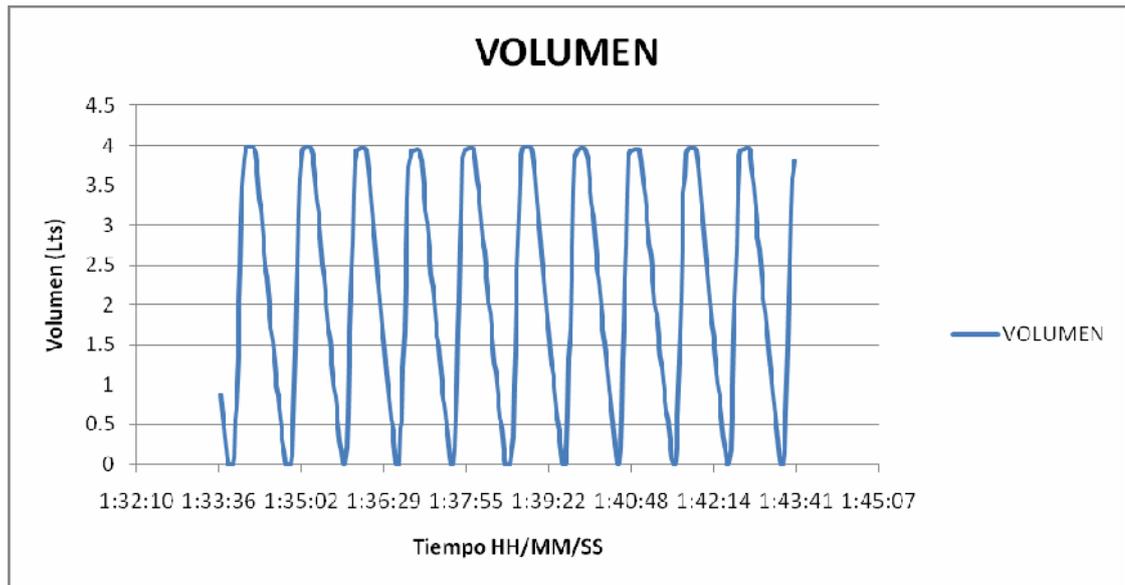


Figura 4.29 Conteo de volumen por medio del transmisor de caudal

En la figura 4.29 se puede observar que el conteo de caudal tiene resultados bastante parecidos y repetibles adecuados para el uso en dispensadores de líquidos.

Datos de conteo de volumen	
<i>Setpoint = 4 litros</i>	
Muestra	10 ciclos
Máximo	3.987512 litros
Promedio	3.96773978 litros
Error promedio	0.03226022 litros

Tabla 4.6 Datos estadísticos del conteo de volumen

Según la tabla 4.6 se ha medido durante 10 ciclos el volumen máximo alcanzado antes de sacar el agua del tanque de medición y se ha encontrado que el máximo llega a 3.99 litros e indica que el líquido no se pasa del nivel previsto. El promedio es 3.96 con un error promedio de 0.03 son valores que indican una precisión cercana al 1% que es permisible considerando que el transmisor de caudal puede tener un error de hasta 1.5% en sus mediciones.

4.8 Conclusiones

Luego de terminado el proyecto hemos llegado a las siguientes conclusiones:

1. Conseguir equipos con características especiales suele ser complicado y puede causar serios retrasos en la culminación de un proyecto.
2. La exactitud y el rango de medición que poseen los equipos es muy importante para realizar un buen control.

Un transmisor de caudal con un rango desde 1GPM ayuda a controlar pequeños caudales mientras que un transmisor que posea un rango de medición desde 5GPM simplemente no lo registrará.

3. Trabajar con motores de velocidad constante resulta conveniente cuando un proceso está libre de perturbaciones, pero cuando un proceso es variable o sufre perturbaciones del exterior se hace imprescindible contar con motores de velocidad variable, permitiendo así que el proceso no pierda su ritmo y a la vez un ahorro considerable de energía gracias a un variador de frecuencia.
4. Un variador de frecuencia nos da la oportunidad de trabajar con un mismo motor a distintas velocidades con lo cual solo consume la potencia que necesita para determinado momento, volviéndose así dinámico y eficaz dentro de la industria.
5. La programación de un autómata tiene varias etapas que van desde lo más sencillo, activar o desactivar un actuador por medio de bobinas y contactos hasta una gama de complejas combinaciones de operaciones como: lógicas, Aritmética con coma flotante, fija, transferencia, temporizadores, librerías de frecuencia entre otras que conforman un solo programa para controlar un proceso.
6. Al verificar que la diferencia entre el *Setpoint* y la variable de proceso es menor al 0.5% en el caso de nivel y 1.5% en el caso de caudal datos se

concluye que la técnica de PID (Control Proporcional Integrativo Derivativo) es adecuada para este prototipo.

7. El PLC S7-200 puede transformar una señal de pulsos a un número real de manera efectiva por medio de un contador incorporado en el programa cargado al PLC como se ha comprobado con la operación correcta del transmisor de caudal..
8. Un transmisor de presión hidrostática con un rango bajo de medición es muy sensible ante las vibraciones del sistema lo cual muchas veces puede provocar un error en la medición debido a un movimiento brusco del líquido.
9. En el control de nivel es posible visualizar y obtener datos físicamente (mediante la escala graduada en el tanque de medición), mientras que en el control de caudal, los datos se obtienen por medio del HMI realizado en el Intouch manejado desde el computador, aunque se puede comprobar por medio de la medición de volumen en un tiempo transcurrido.
10. La calibración exacta de los transmisores es una base fundamental del buen funcionamiento del prototipo.
11. Al aplicar el control PID se pudo observar que es más rápida la respuesta para caudal que para nivel ya que la variable de proceso va casi a la par con los cambios del setpoint; esto se debe a que el caudal varía en función directa a la velocidad de la bomba mientras que el nivel depende del volumen acumulado en el tanque, del flujo máximo de entrada y del flujo máximo de salida.
12. Un programa para contabilizar el caudal que registra el sensor nos sirve como un medidor con el cual podemos realizar dosificaciones exactas del líquido tomando como referencia un nivel equivalente.

4.9 Recomendaciones:

1. Es recomendable antes de adquirir los equipos para un determinado proyecto realizar un estudio de los mismos y sus características, para luego no tener inconvenientes ya en el proceso de funcionamiento o en el presupuesto por tal vez requerir la compra de equipos adicionales.
2. Estudiar detenidamente el autómata y sus características conjuntamente con el software que el fabricante recomienda para tener un perfecto control del proceso, además de adquirir conocimientos sobre el tipo de programación requerida por el mismo y la forma de comunicación con otro software que cumple con la función de un OPC.
3. Buscar asesoría para cuando se requiera conectar equipos sobre los cuales no tiene conocimiento ya podría causar serios daños en el mismo y su costo puede ser muy elevado.
4. Tomar todas las medidas de seguridad necesarias cuando se pruebe un nuevo programa dentro de un autómata.
5. Antes de programar un equipo se debe leer cuidadosamente la ayuda de soporte que se tenga sobre él como catálogos, manuales y documentos técnicos.
6. Investigar cuidadosamente los equipos existentes en el mercado para cada aplicación que se desee llevar a cabo buscando la alternativa más eficaz y económica.
7. Realizar un estudio del tratamiento más adecuado que se le puede dar a las diferentes variables que se pueden encontrar dentro de un proceso industrial y como se comportan cada una de ellas ante las perturbaciones que puedan sufrir en el transcurso del proceso.
8. Siempre que se esté controlando una variable de proceso se debe realizar un análisis de su comportamiento, con el fin de optimizar el proceso de forma continua.

9. Poner especial atención al diseño del HMI ya que por medio de este se podrá controlar al autómeta y a la vez obtener toda la información de cómo se desarrolla el proceso, este debe ser fácil de operar pero debe tener control completo del proceso físico.
10. Recomendamos a futuro realizar ampliaciones a este proyecto con la implementación de nuevos equipos como podrían ser sensores de temperatura, que den la oportunidad al estudiante de adquirir nuevos y valiosos conocimientos sobre la automatización industrial.
11. Para el manejo del prototipo se debe seguir cuidadosamente los pasos detallados en el manual de operación del usuario adjuntado a este documento y al prototipo mismo.
12. Para visualizar bien los cambios que sufren las variables en su comportamiento en un periodo de tiempo, se debe manejar muy bien los trends históricos aplicando reducciones o ampliaciones de imagen además de la escala de medición y herramientas de análisis.
13. Se debe evitar el cierre brusco de la electroválvula que conduce el líquido hacia el tanque de medición, ya el golpe por el cierre puede causar vibraciones en la tubería y podría causar daños al transmisor de caudal.

GLOSARIO

A

Amplificador: Circuito que puede aumentar la variación pico a pico de la tensión, la corriente o la potencia de una señal.

Analógico: Dispositivo, circuito o sistema electrónico que procesa señales eléctricas que toman infinitos valores dentro de un intervalo, y que reciben el nombre de señales analógicas

Ancho de Banda: Diferencia entre las dos frecuencias de corte de un amplificador. Si el amplificador no tiene frecuencia de corte inferior, el ancho de banda es igual a la frecuencia de corte superior.

B

Bit: Del Inglés *binary digit*. Unidad elemental de información representada por un símbolo con dos valores, generalmente denotados por 0 y 1, asociados a los dos estados posibles de un dispositivo.

Bloqueo: Estado de un dispositivo semiconductor (diodo, transistor, tiristor, triac, etc.) que trabaja en conmutación y que ofrece una resistencia prácticamente infinita. Este estado corresponde al de un interruptor abierto

Bobina: Arrollamiento con espiras unidas en una o varias capas con o sin núcleo Magnético

Boolean: Un tipo de variable que sólo puede tener dos valores, normalmente 1 ó 0. Las variables de tipo *Boolean* se usan a menudo para expresar condiciones que son Verdadero o Falso. Las consultas con operadores booleanos (*And*, *Or*, *Not* y *Near*) se denominan consultas Booleanas.

Bps: Bits por segundo. La velocidad con que se transmiten los bits de datos a través de un medio de comunicaciones, como un cable de transmisión o un módem. Las velocidades comunes de los módems para PC son 28800 y 14400 bps.

C

Cable PC/PPI: Permite conectar el puerto del autómata al puerto serie de un PC estándar.

Calibración: El proceso para ajustar un instrumento de medida mediante patrones Estándares

Cebado: Cuando un transistor entra en avalancha, la tensión entre sus extremos se mantiene en un valor elevado. Pero con un tiristor, el cebado da como resultado la saturación. En otras palabras, el cebado se refiere a la forma en que un tiristor se dispara e inmediatamente se satura.

Ciclo de Trabajo: Es la anchura de un pulso dividida entre el periodo entre pulsos. Generalmente. Se multiplica por 100 para obtener la respuesta como un Porcentaje

Circuito de Adelanto: Otro nombre de un circuito de acoplo. La palabra adelanto se refiere al ángulo de salida, que es positivo con respecto al ángulo de la señal de entrada. La fase puede variar de 0 a + 90° (adelanto)

Circuito de Retardo: Otro nombre de un circuito de desacoplo. La palabra atraso se refiere al ángulo de la señal de salida, que es negativo con respecto al ángulo de la señal de entrada. La fase puede variar de 0 a -90° (atraso)

Circuito Secuencial: Dispositivo lógico cuyos estados de salida en un instante dado dependen de la sucesión de los estados precedentes de entrada.

Comparador: Circuito o dispositivo que detecta cuándo la tensión de entrada es mayor que un valor límite predeterminado. La salida es una tensión alta o bien una tensión baja. El límite predeterminado se llama punto de conmutación.

Compilar: Aunar en un programa todos los datos generados procedentes de distintas áreas de memoria del autómata.

Condensador: Dispositivo que almacena carga eléctrica. En su forma más sencilla, un condensador está formado por dos placas metálicas (armaduras)

separadas por una lámina no conductora o dieléctrico. Al conectar una de las placas a un generador, ésta se carga e induce una carga de signo opuesto en la otra placa.

Conductividad: Concepto inverso de resistencia. Un material tiene buena conductividad cuando su resistencia es pequeña. Por contra, un material tiene una baja conductividad cuando su resistencia es muy elevada.

Contador: Es un elementos que cuenta los flancos crecientes en las entradas de contaje. (CPU212 tiene 64 y la CPU214 tiene 128).

Contador rápido: Un contador rápido puede contar más deprisa de lo que tarda un ciclo de la CPU. Los contadores rápidos tienen un valor de contaje entero (o valor actual) con signo.

Controlador PID: Un PID (Proporcional Integral Derivativo) es un mecanismo de control por realimentación que se utiliza en sistemas de control industriales. Un controlador PID corrige el error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener calculándolo y luego sacando una acción correctora que puede ajustar al proceso acorde.

Corriente: Si dos cuerpos de carga igual y opuesta se conectan por medio de un conductor metálico, por ejemplo un cable, las cargas se neutralizan mutuamente. Esta neutralización se lleva a cabo mediante un flujo de electrones a través del conductor, desde el cuerpo cargado negativamente al cargado positivamente (en ingeniería eléctrica, se considera por convención que la corriente fluye en sentido opuesto, es decir, de la carga positiva a la negativa).

Cortocircuito: Es uno de los problemas que se presenta comúnmente. Se produce un cortocircuito cuando una resistencia extremadamente pequeña se hace e casi cero. Por esto, la tensión en un cortocircuito tiende a cero, aunque la corriente puede ser muy grande. Un componente puede tener un cortocircuito interno, o puede tener un cortocircuito externo por una salpicadura de soldadura o una conexión mal hecha.

D

Desplazamiento de fase: Diferencia en las fases de dos tensiones en los puntos A y B. Para un oscilador, el desplazamiento de fase a lo largo del amplificador y el lazo de realimentación a la frecuencia resonante debe ser igual a 360° , equivalente a 0° para que el oscilador funcione.

Diagrama de Tiempos: Un diagrama de tiempos o cronograma es una gráfica que muestra la relación temporal entre los elementos que hacen parte del sistema automatizado

Digital: Área de la electrónica que estudia los sistemas electrónicos que procesar señales eléctricas que toman sólo dos valores asignados a los dígitos 0 y 1, y reciben el nombre de señales digitales

Discreto: Componente electrónico elemental (diodo, transistor, resistencia, condensador...). La idea de componente discreto aparece con el advenimiento de los circuitos integrados para distinguirlos de los montajes electrónicos que no empleaban estos circuitos.

E

Entrada: Señal/información que llega a las computadoras, grabadoras de cuadros, medidores digitales de panel u otros dispositivos del PLC desde dispositivo.

Esquema de contactos (KOP): La representación hexadecimal se basa en un sistema numérico de 16 dígitos.

F

Filtro: En Internet *Information Server*, una característica de ISAPI que permite procesar previamente las peticiones y procesar posteriormente las respuestas, lo que permite realizar un tratamiento específico del sitio para las peticiones y respuestas HTTP.

Forzar: Es una función que permite forzar los valores de las Entradas y las Salidas o variables independientemente del estado del proceso o del programa.

Fuente de alimentación: Convierte la tensión de la red, 110 ó 220V (ac) a baja tensión de (cc) (24V por ejemplo) que es la que se utiliza como tensión de trabajo en los circuitos electrónicos que forma el autómeta

G

Ganancia: Amplificación

Grafcet: El GRAFCET (Grafica de Control de Etapas de Transición) es un grafo o diagrama funcional normalizado, que permite hacer un modelo del proceso a automatizar, contemplando entradas, acciones a realizar, y los procesos intermedios que provocan estas acciones. Inicialmente fue propuesto para documentar la etapa secuencial de los sistemas de control de procesos a eventos discretos. No fue concebido como un lenguaje de programación de autómatas, sino un tipo de Grafo para elaborar el modelo pensando en la ejecución directa del automatismo o programa de autómatas.

H

Histéresis: Diferencia entre los dos puntos de conmutación de una báscula de Schmitt. En cualquier otro caso, la histéresis se refiere a un fenómeno en virtud del cual la evolución de un proceso físico no es independiente de la historia del mismo, de modo que el estado de un sistema depende de la causa que produce una modificación y, además, de los valores alcanzados en procesos análogos anteriores. En relación con el magnetismo la histéresis se presenta al imantar una sustancia ferromagnética.

I

Instrucciones de contador: Programación de códigos de computadora que permiten que un PLC realice funciones de conteo de un equipo contador por ejemplo contar hasta, cuenta atrás, restaurar el contador.

Interfaz: Un grupo de operaciones o métodos relacionados lógicamente que proporciona acceso a un objeto componente.

L

LED: Diodo que irradia luz de colores como el rojo, verde, amarillo, etc., o bien luz invisible como la infrarroja.

Lenguaje de programación: Los fabricantes de PLC han desarrollado una cantidad de lenguajes de programación en mayoría de los casos siguiendo normas internacionales, con el fin de suplir las necesidades y expectativas de los programadores.

M

Módulo de entradas: Aquí se unen eléctricamente los captadores (interruptores, finales de carrera...). La información que recibe la envía al CPU para ser procesada según la programación. Hay 2 tipos de captadores conectables al módulo de entradas: los pasivos y los activos.

Módulo de salidas: Es el encargado de activar y desactivar los actuadores (bobinas de contactores, motores pequeños...). La información enviada por las entradas a la CPU, cuando está procesada se envía al módulo de salidas para que estas sean activadas (también los actuadores que están conectados a ellas). Hay 3 módulos de salidas según el proceso a controlar por el autómatas: relés, triac y transistores.

Módulo de E/S analógicas: Convierten dimensiones reales (analógicas) tales como tensión, temperatura...etc. En una palabra digital y viceversa.

P

Palabra (W): Una palabra consta de 16 bits.

Palabra doble (DW): Consta de 32 bits

Polarización del PNP invertido: Cuando se tiene una fuente de alimentación positiva y un transistor PNP, es habitual dibujar el transistor invertido o boca abajo. Esta situación es especialmente útil cuando el circuito emplea tanto transistores NPN como PNP.

Potenciómetro: Divisor resistivo variable ajustable por medio de un cursor.

R

Raw: Nombre que se le da a una variable analógica cuando tiene un valor entero en formato palabra o palabra doble.

S

Salida: Información/señal transportada desde el controlador a un dispositivo actuador externo. Puede ser DISCRETA, y activar o desactivar un relevador, arrancador, electroválvula, o cualquier otro dispositivo que tome esta información como señal de referencia para realizar una función. NUMÉRICA, y visualizar valores almacenados en los registros del controlador, por medio de displays de 7 segmentos, de cristal líquido, monitores, paneles, etc. o ANALÓGICA, activando válvulas proporcionales, variadores de velocidad para motores, etc.

Scripts: Un script (cuya traducción literal es 'guion') o archivo de órdenes o archivo de procesamiento por lotes es un programa usualmente simple, que por lo regular se almacena en un archivo de texto plano.

Sensores: En el sistema EIB son los elementos encargados de transformar una orden física en una orden eléctrica. Ejemplos: pulsadores, sensores crepusculares, de intrusión...etc.

T

Tabla de estado: En el programa STEP7-Micro/Win, la tabla de estado refleja el estado actual de cada elemento que aparece en el programa del autómatas en tiempo real cuando está en posición de simulación.

Tabla de símbolos: En el programa STEP7-Micro/Win, la tabla de símbolos especifica el significado de cada denominación indicada en el esquema de contactos KOP, para cada símbolo.

Temporizador: Función de los sistemas domóticos capaz de memorizar tiempos, para realizar funciones horarias.

Temporizadores: Es un elemento que cuenta incrementos de tiempo. En el S7-200, los temporizadores tienen resoluciones (incrementos) de 1,10 ó 100mS. (CPU212 tiene 64 y la CPU214, 128).

Transductor: Dispositivo al que se aplica una energía de entrada y devuelve una energía de salida; esta energía de salida suele ser diferente al tipo de energía de

entrada. Por ejemplo, en un medidor de temperatura una espiral metálica convierte la energía térmica aplicada, en el movimiento mecánico de la aguja del marcador.

Debido a la facilidad con la que se transmite y amplifica la energía eléctrica, los transductores más utilizados son los que convierten otras formas de energía, como calor, luz o sonido, en energía eléctrica.

Transistor NPN: Dispositivo de dos uniones semiconductoras, formando tres zonas. Transistor que tiene una región p entre dos regiones n.

Transistor PNP: Dispositivo de dos uniones semiconductoras, formando tres zonas. Transistor que tiene una región n entre dos regiones p.

Tren de impulsos: La función Tren de impulsos provee una salida en cuadratura (50% factor de trabajo) para un número de impulsos y un tiempo de ciclo determinados.

BIBLIOGRAFÍA.

- YUNUS A. CENGEL, JOHN M. CIMBALA. 2009. *Mecánica de fluidos, fundamentos y aplicaciones*. Mc. Graw Hill Interamericana. 1 Ed. México. 956p
- MARTINEZ SANCHEZ, Victoriano A. *Potencia hidráulica controlada por PLC*. México: Alfaomega, 2009, 283 p. ISBN: 978-970-15-1432-0, Es.
- KUO, Benjamín C. *Sistemas de control automático* 7ª. Ed. México. Prentice Hall, 2003, xxiv, 904 p. ISBN: 968-880-723-0, Es.
- CREUS Antonio. *Instrumentación industrial* 6ª. Ed Bogotá Alfaomega, 1999, XVI, 750 p. ISBN: 970-15-0246-9, Es.
- ACEDO SANCHEZ, José. *Control Avanzado de procesos* Madrid: Edigrafos, 2003, 579 p. ISBN: 84-7978-545-4, Es
- VILLALOBOS Gustavo, RICO Raúl, ORTIZ Fernando, MONTÚFAR Marcela. *Medición y control de procesos industriales*. Instituto Politécnico Nacional– México, 2006.
- VALLEJO ZAMBRANO. *Física Vectorial 2*. 2001.
- <http://proton.ucting.udg>
- <http://fluidos.eia.edu.co/lhidraulica/guias/bombas/Bombas.html>
- válvulas: instrumentación y control
- GARCÍA GUTIÉRREZ, Luis. *Asociación Española de Normalización y Certificación*, 2003, 1ª Ed (Válvulas)

- SALDARRIAGA Juan. *Hidráulica de Tuberías*, 2009, 6ª. Ed, Alfaomega.(Hidráulica)
- OGATA, *Ingeniería de Control Moderna*, 3era edición, pags 7 y 8
- Arquitectura Hardware: bus de instrucciones y bus de datos independientes
- <http://www.monografias.com/trabajos11/valvus>
- SOERES, C *Process Engineering Equipment handbook*. Ed. MacGraw-Hill. 2002 (Válvulas)
- ARAGONÉS SAIGÍ ZABALETA. *Automatismos Eléctricos Programables*.
- COWIE, Charles J. (2001). *Adjustable Frequency Drive Application Training*.
- InTouch HMI Help
- SISKIND, Charles S. (1963). *Electrical Control Systems in Industry*. New York: McGraw-Hill, Inc. ISBN 0-07-057746-3
- PHIPPS, Clarence A. (1997). *Variable Speed Drive Fundamentals*. The Fairmont Press, Inc. ISBN 0-88173-258-3
- SPITZER, David W. (1990). *Variable Speed Drives*. Instrument Society of America. ISBN 1-55617-242-7
- CAMPBELL, Sylvester J. (1987). *Solid-State AC Motor Controls*. New York. Marcel Dekker, Inc... ISBN 0-8247-7728-X

- JAESCHKE, Ralph L. (1978). *Controlling Power Transmission Systems*. Cleveland. OH: Penton/IPC.

- http://es.wikipedia.org/wiki/Variador_de_velocidad.

- CEMBRANOS NISTAL, Florencio J. *Automatismos eléctricos, neumáticos e hidráulicos* (Paraninfo) 192 páginas. isbn: 8497323203. (2004).