

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO EN INGENIERÍA**

**Diseño y Simulación del Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y
Flujo de Agua para el Proceso de Perforación en la Fase de Exploración
Minera del Proyecto IAMGOLD Quimsacocha**

Cristian Rafael Vallejo Carpio

SANGOLQUÍ – ECUADOR

2008

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente proyecto fue realizado en su totalidad por el señor Cristian Rafael Vallejo Carpio, como requisito parcial para la obtención del Título en INGENIERÍA ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL.

Ing. Hugo Ortiz
DIRECTOR

Ing. Wilson Yépez
CODIRECTOR

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento especial a la empresa IAMGOLD Ecuador S.A., por el auspicio brindado para el desarrollo de este proyecto.

Al señor Ing. Hugo Ortiz, Director del Proyecto de Grado y al señor Ing. Wilson Yépez, Codirector; por sus comentarios, correcciones y sugerencias para la finalización de este propósito.

DEDICATORIA

Este trabajo esta dedicado a mi familia por todo el apoyo brindado para la culminación de mi carrera profesional.

PRÓLOGO

El Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo de agua es un proyecto desarrollado con el objeto de implementar un circuito de reciclaje de líquido para el proceso de perforación en un régimen automatizado, que realiza las tareas de acumulación y reciclaje del líquido utilizado en las actividades de exploración minera en el proyecto Quimsacocha, de la empresa IAMGOLD S.A.

Este Sistema está controlado mediante un PLC de la marca TELEMECANIQUE, modelo TWIDO, que realiza las acciones de control y monitoreo para los distintos dispositivos del sistema automatizado, manipulando sus diferentes prestaciones para los parámetros requeridos por el proceso.

El diseño y la simulación están integrados mediante la plataforma de interface Intouch Versión 9.5, que brinda la posibilidad de realizar control y monitoreo en tiempo real de dicho proceso.

El Sistema de Control cuenta con un mando de operación en el sitio del proceso mediante un tablero de control para el operario; pero además ofrece la posibilidad de una conexión remota mediante el protocolo de comunicación Modbus y una interface HMI con pantallas de ingeniería que se integran al control y supervisión de las variables involucradas en el sistema.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTO	III
DEDICATORIA	IV
PRÓLOGO	V
ÍNDICE	VI
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 SISTEMA DE PERFORACIÓN Y LA UTILIZACIÓN DE AGUA.....	2
1.2 REVISIÓN HISTÓRICA.....	3
CAPÍTULO 2. PROCESO DE EXPLORACIÓN MINERA	6
2.1 PERFORACIÓN POR ROTACIÓN ABRASIVA.....	7
2.1.1 Muestras obtenidas por rotación.....	9
2.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE PERFORACIÓN.....	11
2.2.1 Montaje y propulsión.....	11
2.2.2 Unidad de potencia.....	11
2.2.3 Mecanismo de rotación.....	12
2.2.4 Mecanismo de empuje.....	12
2.2.5 Sistema de barrido.....	13
2.2.6 Descripción técnica del equipo de perforación.....	13
2.2.7 Herramientas de perforación.....	16
2.3 VARIABLES DE LA OPERACIÓN DE PERFORACIÓN.....	18
2.3.1 Velocidad de rotación.....	19
2.3.2 Fuerza de empuje y diámetro de perforación.....	20

2.3.3 Velocidad y caudal del fluido de barrido de partículas.....	21
2.3.4 Velocidad del fluido.....	21
2.3.5 Caudal del fluido.....	23
2.3.6 Desgaste de la herramienta de perforación.....	24
2.3.7 Consumos de energía.....	24
2.3.7.1 Energía consumida por la rotación.....	24
2.3.7.2 Energía consumida por el sistema de empuje.....	26
2.4 CIRCUITO DE RECICLAJE DE AGUA DE PERFORACIÓN.....	28
CAPÍTULO 3. INSTRUMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL.....	31
3.1 ESTRATEGIAS Y PARÁMETROS PARA EL CONTROL AUTOMÁTICO	35
3.2 SENSORES Y TRANSMISORES.....	38
3.2.1 Sensores y Transmisores de Flujo.....	39
3.2.1.1 Características y definiciones.....	40
3.2.1.2 Funcionamiento.....	41
3.2.1.2.1 Sensores de flujo basados en la caída de presión.....	41
3.2.1.2.2 Sensores basados en la velocidad de flujo.....	45
3.2.1.3. Selección.....	50
3.2.2 Sensores e Interruptores de Nivel.....	55
3.2.2.1 Características y definiciones.....	56
3.2.2.2 Funcionamiento.....	57
3.2.2.2.1 Instrumentos de medición directa.....	57
3.2.2.2.2 Instrumentos basados en la presión hidrostática.....	58
3.2.2.2.3 Instrumentos basados en el desplazamiento.....	63
3.2.2.2.4 Instrumentos basados en características eléctricas del líquido.....	65
3.2.2.3 Selección.....	70
3.3 ELEMENTOS FINALES DE CONTROL.....	73
3.3.1 Válvulas de control.....	73
3.3.1.2 Especificación de válvulas.....	75
3.3.1.3 Funcionamiento.....	75
3.3.1.4 Selección. Dimensionamiento de válvulas de control.....	78
3.3.1.5 Característica del Flujo.....	80
3.3.2 Bombas de Accionamiento Eléctrico.....	83
3.3.2.1 Características.....	83

3.3.2.2 Motor Eléctrico.....	84
3.3.2.3 Funcionamiento.....	87
3.3.2.4 Selección.....	92
CAPÍTULO 4. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL.....	96
4.1 CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO.....	98
4.1.1 Selección de la acción del controlador.....	98
4.1.2 Variaciones.....	98
4.1.3 Características del proceso y controlabilidad.....	99
4.1.4 Variables.....	100
4.1.5 Modelamiento matemático.....	101
4.2 MÉTODOS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL.....	108
4.2.1 Sistemas de control por retroalimentación.....	111
4.2.1.1 Control de Encendido/Apagado o Control On/Off.....	112
4.2.1.2 Controlador proporcional.....	114
4.2.1.3 Controlador integral.....	115
4.2.1.4 Controlador derivativo.....	116
4.2.1.5 Controlador proporcional-integral.....	116
4.2.1.6 Controlador proporcional-derivativo.....	117
4.2.1.7 Controlador proporcional integral derivativo.....	118
4.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL Y FLUJO DEL PROCESO	118
4.3.1 Diseño del Sistema de Control de Nivel de Líquido.....	120
4.3.1.1 Consideraciones de diseño.....	120
4.3.2 Diseño del Sistema de Control de Flujo de Líquido.....	123
4.3.2.1 Consideraciones de diseño.....	123
4.4 DIAGRAMA DE INSTRUMENTACIÓN Y PROCESO.....	126
CAPÍTULO 5. EL CONTROLADOR PROGRAMABLE.....	127
5.1 SELECCIÓN DEL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE.....	127
5.1.1 Factores Cuantitativos.....	128
5.1.2 Factores Cualitativos.....	130
5.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y FUNCIONAMIENTO.....	131
5.2.1 Información General.....	131
5.3 CONFIGURACIÓN DEL CONTROLADOR.....	132

5.4 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN TWIDO SUITE.....	132
5.4.1 Configuración mínima.....	133
5.5 PROGRAMACIÓN BASADA EN LÓGICA DE ESCALERA.....	134
5.5.1 Reticulado de programación.....	134
5.5.1.1 Secciones y subrutinas.....	136
5.5.1.2 Cabeceras de escalón.....	136
5.5.1.3 Bloques de diagramas Ladder.....	136
5.5.1.4 Contactos, bobinas y flujo de programas.....	136
5.5.1.5 Bloques de función.....	136
5.5.1.6 Bloques de comparación.....	137
5.5.1.7 Bloques de operación.....	137
5.6 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN MODBUS RTU/ASCII.....	137
5.6.1 Comunicaciones ASCII.....	139
5.6.2 Comunicaciones Modbus.....	141
5.6.2.1 Modbus Master.....	143
5.6.2.2 Modbus Slave.....	145
5.6.2.3 Características de Transmisión.....	146
5.7 DESARROLLO DEL PROGRAMA.....	146
5.7.1 Lógica de Control.....	151
5.7.1.1 Sección 1. Control de Nivel: Modo Manual.....	151
5.7.1.2 Sección 2. Control de Nivel: Modo Automático.....	153
5.7.1.3 Sección 3. Control de Flujo: Controlador tipo PI.....	154
5.7.1.4 Sección 4. Salidas del Controlador.....	156
5.7.1.5 Sección 5. Conexiones con Intouch: Entradas.....	159
5.7.1.6 Sección 6. Conexiones con Intouch: Salidas.....	161
5.8 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES.....	164
CAPÍTULO 6. DESARROLLO DE LA INTERFACE HMI.....	166
6.1 DESCRIPCIÓN DE LA INTERFACE.....	167
6.2 PROGRAMACIÓN.....	179
6.3 FUNCIONES DE CONTROL Y MONITOREO.....	187
6.3.1 Entorno de Desarrollo: WindowMaker.....	187
6.3.2 Definición de Tagnames.....	188
6.3.3 Scripts.....	190

6.3.4 Alarmas y Eventos.....	190
6.3.5 Tendencias históricas y de tiempo real.....	193
6.3.6 Gestión con SQL.....	195
6.3.7 Comunicaciones.....	196
CAPÍTULO 7. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	199
7.1 SIMULACIÓN.....	199
7.1.1 Maqueta del Circuito de Reciclaje de Agua.....	199
7.1.2 Panel de Control.....	201
7.2 PRUEBAS Y RESULTADOS.....	203
7.3 ANÁLISIS COSTO – BENEFICIO.....	207
7.3.1 Análisis de prefactibilidad.....	207
7.3.2 Análisis Costo-Efectividad.....	208
7.3.3 Inversión Inicial.....	209
7.3.4 Método de Retorno de Inversión.....	215
7.3.4.1 Primer Escenario.....	216
7.3.4.2 Segundo Escenario.....	217
7.3.4.3 Tercer Escenario.....	218
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	220
8.1 CONCLUSIONES.....	220
8.2 RECOMENDACIONES.....	222
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	224

ANEXOS

ANEXO 1. Advertencias y recomendaciones para el uso del autómata Twido
ANEXO 2. Certificaciones del autómata y sus módulos de extensión
ANEXO 3. Tabla de Indicadores para el enlace HMI-PLC
ANEXO 4. Tabla de direcciones usadas en la Lógica de programación
ANEXO 5. Diagramas de Instrumentación y Proceso
ANEXO 6. Plano de la Maqueta para la Simulación del Circuito de Reciclaje de Agua
ANEXO 7. Diagrama Eléctrico del Panel de Control
ANEXO 8. Diagrama de Gantt para el Análisis de tiempo en el proceso de prefactibilidad

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Los desafíos a los que apunta el desarrollo de tecnologías y software orientados a la automatización de la Industria Minera son los de contar con una mayor integración de la multiplicidad de datos involucrados en el proceso en sus diferentes etapas, de manera que los antecedentes relevantes puedan ser compartidos por los diferentes actores. Además, se busca disponer de esta información en tiempo real, a fin de ejercer una debida gestión sobre el proceso de exploración en el que actualmente se encuentra la Empresa IAMGOLD S.A, por medio del control y monitoreo de las variables involucradas.

El proyecto Quimsacocha con un enfoque de responsabilidad social y ambiental empresarial, desarrolla sus actividades con un manejo sustentable de los recursos de la zona y en lo que corresponde específicamente al recurso hídrico busca minimizar el impacto ambiental y cumplir con parámetros técnicos para la instrumentación y puesta en marcha del proceso tales como las certificaciones de aprobación de los dispositivos (UL, CE, CSA), certificaciones de trabajo para las áreas peligrosas, grados de protección (IP, NEMA), normativas para el diseño eléctrico del sistema (EIA, IEC, NEC).

Bajo el estudio de impacto y la obtención de la licencia ambiental, el procedimiento que sigue el proyecto en la fase de exploración avanzada es un método de perforación abrasiva, que consiste en el uso de maquinaria de perforación, cuya herramienta de asalto radica en el uso de brocas huecas cilíndricas, donde su superficie está provista de insertos de diamantes o llevan una impregnación de este material. Su propósito es perforar la roca mediante abrasión o alta fricción y su aplicación principal es obtener testigos en sondaje de la roca para el posterior análisis de sus muestras.

1.1 Sistema de perforación y la utilización de agua

En la práctica minera, los sistemas de perforación presentan según el tipo de herramienta utilizada, muestras intactas o inalteradas de núcleos o testigos. Estas muestras son recuperadas por la acción rotativa de la corona diamantada que corta los materiales del subsuelo y que a su vez son alojados en un barril porta testigo que sigue a la corona. Esta técnica requiere el uso de un flujo controlado de agua más aditivos especiales con el fin de lubricar, refrigerar la herramienta o sarta de perforación y limpiar el pozo de sedimentos y recortes de perforación, como también el de estabilizar las paredes del pozo.

Con este fin se ha implementado un circuito cerrado de reciclaje de agua, controlado manualmente, que toma el líquido desde una vertiente del sector con una bomba centrífuga y que conecta diferentes tinas de procesos en serie que permiten filtrar, sedimentar y eliminar sólidos en suspensión en base a floculantes, bentonita y polímeros; y a su vez poder reutilizar el agua dentro el proceso. Con la intención de causar el menor impacto posible, el agua que ha sido recuperada del proceso, previo a un estudio ambiental, se deposita en el sector de regeneración.

El circuito cerrado de reciclaje de agua es controlado mediante válvulas manuales, que permiten el manejo del nivel del líquido en la tina de acumulación. Este líquido se conduce por tubería hacia el sistema de inyección de agua a presión del equipo de perforación y dicho circuito permite también la reutilización del agua contenida en la tina del líquido reciclado. Flujómetros de funcionamiento mecánico permiten el control y monitoreo del agua que ingresa hacia el sistema de inyección del equipo de perforación. Los datos del flujo monitoreado por el operador sirven para determinar los parámetros técnicos que se utilizan para el proceso de perforación.

La importancia del control de nivel de líquido es la de garantizar un flujo permanente hacia el proceso, para el correcto desempeño de la herramienta de perforación, tomando en cuenta los parámetros de lubricación, refrigeración y eliminación de sedimentos. Por otro lado, el control de flujo de agua adecuado, es necesario e importante por la responsabilidad que tiene la empresa para utilizar el recurso hídrico de forma

mesurada, causar el menor impacto ambiental posible, cumplir con las normas y leyes ambientales y también asegurar un proceso de perforación adecuado por el alto costo de sus herramientas.

El desarrollo de este proyecto implica profundizar el conocimiento, identificar claramente el proceso y las variables requeridas para la actividad de perforación dentro de la fase de exploración. Todo esto con el objeto de contar con los medios adecuados que permitan un diseño con la calidad requerida para una gestión óptima.

En busca de este desarrollo se plantea en este proyecto una propuesta que permitirá automatizar este proceso, justificando todos los parámetros requeridos, tanto para el control de nivel y flujo de agua en las tinas que se utilizan para el proceso de perforación y reciclaje, así como también para el monitoreo de las variables de control por su importancia en la investigación del proceso de perforación.

1.2 Revisión histórica¹

Los primeros datos sobre la existencia de minerales en la zona fueron entregados por una misión de las Naciones Unidas en el año de 1969. Los técnicos de dicha misión descubrieron comportamientos geoquímicas de metales base, en los sectores de Jordania y Loma Tasqui, ubicados en lo que actualmente corresponde a la concesión del proyecto.

Entre el año de 1992 y 1993 la compañía COGEMA detectó presencia de oro en los sedimentos fluviales cercanos a la caldera Quimsacocha, efectuando trabajos de mapeo y exploración. En 1993 esta empresa se asoció mediante la estrategia Joint Venture con las compañías Newmont y TVX para continuar las exploraciones, pero a finales de 1997 se estimó que el proyecto tenía aproximadamente 350.000 onzas de oro para la explotación, lo que no ameritaba seguir con la inversión de riesgo por lo que Newmont y TVX dejaron la sociedad y sus actividades de exploración.

¹ Revisión obtenida del informe de Auditoría Ambiental de la empresa AMBIGEST CIA. LTDA.

El 11 de Octubre del 2002, el Ministerio del Ambiente otorga la primera licencia ambiental en la historia minera del Ecuador a la compañía IAMGOLD ECUADOR S.A., para que desarrolle actividades de exploración avanzadas en las áreas de Cerro Casco y Río Falso (Proyecto Quimsacocha), las mismas que se encuentran ubicadas dentro del Bosque Protector cuenca del Río Paute y microcuenca del Río Yanuncay.

El Proyecto de Exploración Minera Quimsacocha se encuentra ubicado en la provincia del Azuay, a 30 kilómetros al suroeste de Cuenca, en los altos de la Cordillera Occidental, a una altura aproximada de 3.800 metros sobre el nivel del mar.

Como se observa en la Figura 1.1, el área de influencia abarca los cantones Cuenca, Girón y San Fernando, específicamente las parroquias Victoria de Portete, Tarqui, Baños, San Gerardo y Chumblín.

Dos de las áreas del proyecto se localizan en el bosque protector Irquis-Yanuncay, en la cuenca alta del río Paute, el área Cerro Casco está totalmente dentro del bosque, mientras que el área Río Falso en forma parcial.

El proyecto se divide en cuatro concesiones: Cerro Casco, Río Falso, San Martín y Cristal, con un total de 12.967 hectáreas. Los trabajos de exploración se concentran en 120 hectáreas correspondientes a la concesión Río Falso, donde la compañía ha efectuado más de 200 perforaciones para extraer las muestras o testigos.

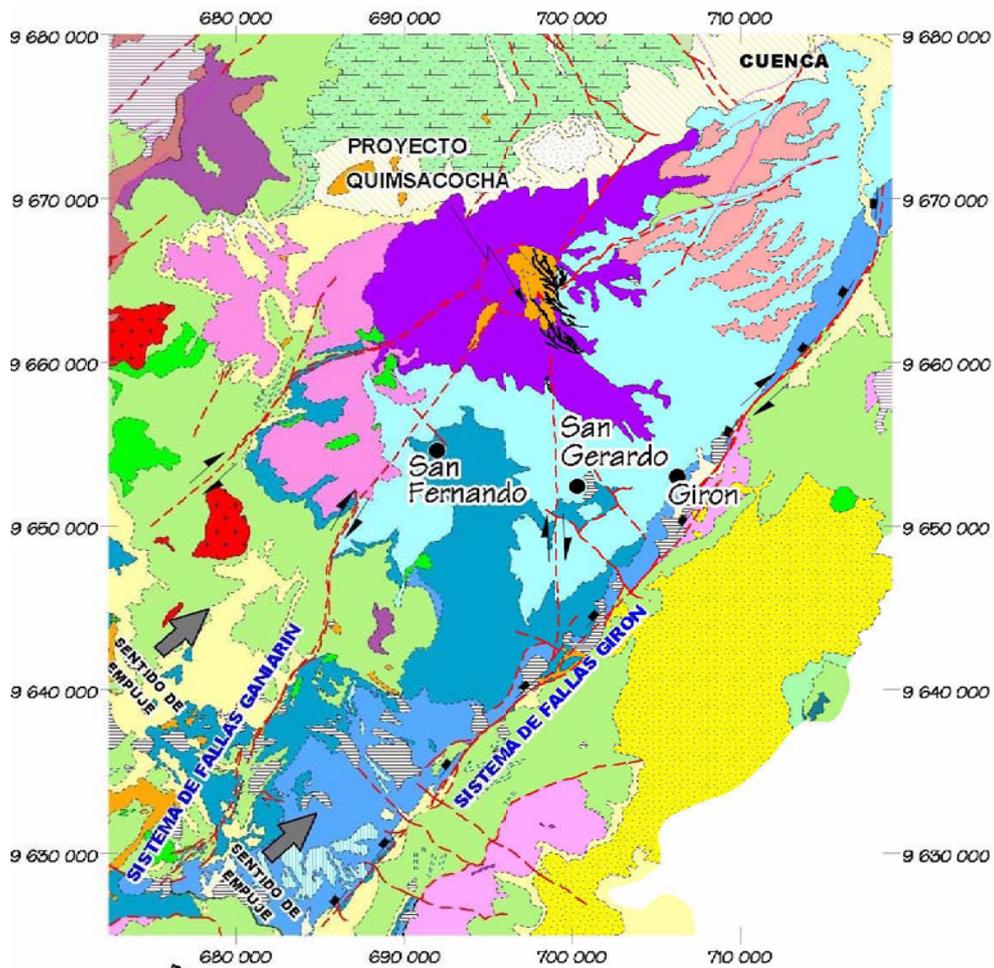


Figura 1.1. Mapa Geográfico de la Zona de Exploración

La empresa IAMGOLD S.A. apunta a iniciar la producción del proyecto Quimsacocha, a mediados del 2009. El estudio inicial se basó en un recurso calculado en 2,8 millones de onzas de oro en octubre del 2005. Actualmente, se está buscando actualizar el recurso, con el fin de incluir los últimos resultados de perforación, de los cuales, un 80% son de perforaciones realizadas a lo largo de la mineralización.

CAPÍTULO 2

PROCESO DE EXPLORACIÓN MINERA

La exploración de los yacimientos minerales es una actividad de alto riesgo económico, ya que supone inversiones a largo plazo que muchas veces se sustentan en precios del producto minero sujetos a altas oscilaciones. A su vez, la fase de explotación supone también un elevado riesgo económico, derivado éste del hecho de que los gastos solamente se recuperan en caso de que la exploración tenga éxito y la explotación minera sea fructífera. Sobre estas bases, es fácil comprender que la exploración supone la partida de la industria minera, ya que debe permitir la localización de los recursos mineros al mínimo coste y cumplir con todos los requerimientos ambientales para causar el menor impacto posible.

La base de cualquier trabajo bien hecho es la planificación de las actividades a realizar; así, en Investigación Minera se suele subdividir el trabajo en tres etapas claramente diferenciadas, de forma que solamente se aborda la siguiente en caso de que la anterior haya cumplido satisfactoriamente los objetivos previstos. Aunque pueden recibir distintos nombres, en términos generales se trata de una fase de preexploración, una de exploración propiamente dicha y otra de evaluación. Si incluso ésta última alcanza los resultados previstos se realiza un nuevo estudio de viabilidad económica.

La preexploración tiene por objeto determinar si una zona concreta, normalmente de gran extensión, presenta posibilidades de que exista un tipo determinado de yacimiento mineral. Esto se establece en función de la información que se disponga sobre ese tipo de yacimiento y sobre la geología de la región de estudio. Suele ser un trabajo fundamentalmente de investigación, en el que se cuenta con el apoyo de información bibliográfica, mapas, fotos aéreas, imágenes de satélite, etc., aunque puede incluir alguna salida al campo para reconocer las zonas de mayor interés.

En la fase de exploración, una vez establecidas las posibilidades de la región estudiada, se pasa a la investigación sobre el terreno. En esta fase se aplica las diversas técnicas disponibles para llevar a cabo el trabajo de la forma más completa posible. Su objeto final debe ser corroborar o descartar la hipótesis inicial de existencia de mineralizaciones del tipo prospectado.

Una vez detectado una mineralización de interés, es decir, en la que se observa caracteres que permiten suponer que pueda llegar a ser explotada, se lleva a cabo su evaluación o valoración económica. A pesar de lo que pueda parecer, los datos de ésta no son aún concluyentes, y debe ir seguida, en caso de que la valoración económica sea positiva, de un estudio de viabilidad, que contemple todos los factores geológicos, mineros, sociales, ambientales, etc., que puedan permitir o no, que una explotación se ejecute.

Los métodos de sondeo utilizados en las exploraciones tienen por objeto el estudio de un determinado terreno o formación, proporcionando los siguientes datos:

- Litología, mediante el estudio del tamaño de las partículas de la roca y sus características físicas y químicas, obtención de testigos y registros de sus propiedades.
- Presiones de formación y niveles piezométricos de los distintos acuíferos cortados.
- Propiedades físicas de las rocas tales como porosidad, permeabilidad, temperatura, existencia de fluidos, características mecánicas, etc.
- Propiedades químicas de los fluidos contenidos en la roca, salinidades, efectos corrosivos o incrustantes, concentraciones de diferentes elementos, composición isotópica.

2.1 PERFORACIÓN POR ROTACIÓN ABRASIVA

Para la realización de los sondeos para la obtención de muestras existen diversos métodos de perforación, que se adaptan de distintas maneras a las condiciones de cada caso. Básicamente todos los métodos se pueden incluir en dos grupos, diferenciados por el sistema de trabajo de la herramienta de corte, que son percusión y rotación. El método utilizado en la fase de exploración minera del proyecto Quimsacocha es la perforación por

rotación abrasiva, debido a su eficacia en la obtención de testigos intactos para el estudio de las propiedades mineralógicas de las muestras obtenidas.

Los sondeos perforados durante las fases de investigación deben atender a diferentes propósitos. Cada uno de ellos exige diferentes especificaciones en cuanto a situación, orientación, profundidad, diámetro y tipos de muestras que han de recogerse. La selección del método de perforación y ensayos debe adaptarse a las necesidades de cada caso particular. Los ensayos, testificación y muestreo también caracterizan las condiciones naturales del agua subterránea y del sistema que las contiene. Sin embargo, la propia perforación altera las condiciones naturales originales por acción de los fluidos de perforación y de los ripsos generados. Ambos contaminan el agua subterránea y alteran las propiedades hidráulicas del sistema. Es también frecuente que el sondeo perforado sirva de conexión entre sistemas hidráulicos con diferentes niveles piezométricos, provocando movimientos de agua subterránea entre unidades diferentes. En la fase de exploración del proyecto Quimsacocha se conoce y se cuantifica los efectos de estas perturbaciones, de tal manera que se busca desarrollar metodologías y sistemas de perforación que minimicen la alteración del estado natural.

Por otro lado, la correcta selección de la corona y del equipo de perforación es de suma importancia dado que debe ser compatible con el terreno a perforar para poder obtener testigos de calidad y completar los requerimientos técnicos y de cronograma de la investigación geotécnica. Una incorrecta selección de los elementos antes indicados conllevará a un trabajo de baja calidad recuperando testigos alterados, con poco rendimiento y alto desgaste de las coronas, redundando finalmente en un excesivo costo de la investigación y no cumplir con los objetivos planteados.

El fluido de perforación bombeado desde la superficie hasta la corona por dentro del tren de porta testigos, lubrica y refrigera la herramienta cortante mientras simultáneamente lava la perforación de los detritos y los conduce a la superficie entre las paredes de la misma y el tren porta testigos.

El agua es el fluido generalmente utilizado mientras que los restantes fluidos de perforación consisten en soluciones de agua con bentonita y aditivos como el cloruro de sodio, la baritina, espumas y polímeros. Estos últimos tienen la ventaja frente al agua, como único medio de inyección, de que permiten la remoción de los detritos de perforación a baja velocidad produciendo nula o poca perturbación dentro de la perforación. Esta situación resulta crítica cuando el material es blando, se encuentra muy alterado, está fisurado y se desea recuperar el testigo con el material fino contenido dentro de las fisuras o si la formación no está cementada.

Las perforaciones por rotación pueden ser consideradas como operaciones de dificultad, donde el éxito de éstas estará basado por un lado, en los equipos utilizados y su estado de mantenimiento y por el otro, en la técnica empleada por el perforista, su experiencia y su habilidad. Estas últimas consideraciones son primordiales cuando la formación es parcialmente cementada, alterada, fracturada o blanda y se desea obtener un testigo de carrera completa y de adecuadas condiciones de calidad para su clasificación, descripción y posteriores ensayos de laboratorio.

2.1.1 Muestras obtenidas por rotación

La evolución de las técnicas de toma de testigos ha seguido dos tendencias. La convencional con empleo de porta testigos de doble tubo, acoplada al varillaje de perforación y la de wireline o extracción de testigo con cable.

En la primera técnica, la herramienta se instala directamente sobre la sarta de perforación para obtener el testigo. Constan de dos tubos: la barra exterior y el tubo porta testigos, que van montados mediante una cabeza que permite que el porta testigos permanezca estático durante la rotación de la barra exterior, alojando y protegiendo el testigo de los esfuerzos surgidos durante la perforación.

Las barras pueden ser extraídas relativamente rápido si se emplean sistemas avanzados de manejo del varillaje. La proporción de testigo recogido frente a roca perforada es alta; por ejemplo, una herramienta abrasiva convencional de 72 mm de

diámetro permite obtener testigos de 62mm de diámetro; como es lógico, se debe sacar la sarta cada vez que el porta testigos ha penetrado toda su longitud en la formación. Generalmente se utiliza como porta testigo, un tubo de plástico rígido de poli cloruro de vinilo (PVC).

En la perforación mediante wireline, actualmente utilizada para el proceso de exploración del proyecto Quimsacocha, la tubería interior es independiente de la herramienta y puede extraerse mediante un sistema de anclaje por cable. Por ello no es necesario detener toda la maniobra cada vez que se completa la muestra en el porta testigo. Sus dimensiones deben ser suficientemente pequeñas para poder pasar por el interior del tubo de perforación que sustituye al varillaje.

La extrusión del testigo debe ser realizada preferentemente en el mismo sentido en que éste entró en el porta testigos. Los extrusores son del tipo a pistón por acción hidráulica (agua o aceite), por cuanto se pueden estropear las muestras durante la aplicación de grandes esfuerzos en el proceso de extrusión.

En el caso de rocas blandas, alteradas por intemperización o con fallas, se deberá tener presente que la extrusión puede afectarlas aunque la tarea sea hecha con cuidado. La utilización de un tubo guía de plástico transparente y de baja fricción por dentro del porta testigos, permite solucionar gran parte de los problemas asociados con la extrusión de testigos de roca obtenidos por rotación. Asimismo, facilita la protección del testigo durante el manipuleo y transporte al laboratorio.

Las cajas porta-testigo y las divisorias deben ser de tales dimensiones que garanticen la inmovilidad de los testigos con el fin de evitar dañarlos durante el transporte. Dichas cajas deberán estar diseñadas para poder soportar el peso de la misma al estar llenas de testigos de roca y ser lo suficientemente livianas como para poder ser levantadas para su transporte.

2.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE PERFORACIÓN

2.2.1 Montaje y propulsión

Se utilizan dos sistemas de montaje, sobre orugas o sobre neumáticos; los factores que influyen en la elección son las condiciones del terreno y principalmente el grado de movilidad requerido. Mientras están perforando, estos equipos se apoyan sobre tres o cuatro patas hidráulicas, que además de soportar su peso sirven para nivelar la máquina.

El montaje sobre orugas se utiliza preferentemente en las grandes minas a cielo abierto, donde los requerimientos de movilidad son escasos. Su limitación en cuanto a menor velocidad de traslación, 10 a 15 km/h, es poco relevante cuando el equipo permanece durante largos períodos de tiempo operando en un mismo banco o sector de la mina.

En procesos de tamaño mediano, donde se requiere un desplazamiento más frecuente y ágil del equipo, se prefiere el montaje sobre neumáticos. Estos equipos van montados sobre un camión de dos o tres ejes los más livianos, y sólo los de mayor tamaño se construyen sobre un chasis de cuatro ejes. Su velocidad media de desplazamiento es del orden de 20 a 30 km/h.

2.2.2 Unidad de potencia

La fuente primaria de potencia utilizada por estos equipos puede ser eléctrica o motores diesel, y su aplicación se realiza mediante mecanismos de transmisión mecánicos e hidráulicos. Los equipos que perforan diámetros superiores a nueve pulgadas, grandes minas a cielo abierto, por lo general son alimentados por energía eléctrica suministrada a la máquina mediante un cable que la conecta con subestaciones ubicadas al interior del espacio utilizado para el proceso de perforación, a estos se les denomina equipos fullelectric.

En el caso de perforadoras de menor tamaño, montadas sobre un camión, la fuente de energía es uno o dos motores diesel. En el primer caso, se trata del mismo motor que acciona el vehículo; pero en la actualidad se prefiere, por su mayor eficiencia, la segunda configuración, dada las diferentes características de los motores requeridos. También existen versiones diesel-eléctricas, diseñadas para minas de gran producción que no disponen de suministro de energía eléctrica.

2.2.3 Mecanismo de rotación

El torque de rotación se transmite a la herramienta por intermedio de la columna de barras. El accionamiento del sistema lo provee un motor eléctrico o hidráulico montado sobre el cabezal deslizante. En los equipos de mayor tamaño, se utiliza preferentemente un motor eléctrico de corriente continua con su eje en posición vertical, que permite una fácil regulación de la velocidad de rotación en un rango entre 0 a 1500 rpm. Los equipos montados sobre un camión, con unidad de potencia diesel, utilizan un motor hidráulico que opera en circuito cerrado con una bomba de presión constante y un convertidor de torque, que permite variar la velocidad de rotación.

2.2.4 Mecanismo de empuje

Para obtener un efecto de penetración eficiente es preciso aplicar una fuerza de empuje que depende de la resistencia de la roca y del diámetro de perforación. Prácticamente, casi sin excepciones, esta fuerza de empuje se obtiene a partir de un motor hidráulico.

Por lo general el mecanismo de empuje está diseñado para aplicar una fuerza del orden de un 50 % del peso de la máquina, y los equipos de mayor tamaño que operan hoy en día alcanzan un peso de hasta 120 toneladas. El sistema, además, permite accionar el izamiento de la columna de barras, a velocidades de elevación del orden de 20 m/min.

2.2.5 Sistema de barrido

El barrido del detritus de la perforación se realiza mediante la inyección de agua a presión, para lo cual el equipo está dotado de uno o dos compresores ubicados en la sala de máquinas del equipo de perforación.

Mediante un tubo flexible se inyecta el flujo del líquido a través del cabezal de rotación, por el interior de la columna de barras hasta el fondo del rig de perforación. Dependiendo de la longitud de los tiros a lo largo de la penetración, la presión requerida se ubica entre un rango de 2 a 4 Bares.

2.2.6 Descripción técnica del equipo de perforación

En las tablas 2.1 hasta 2.6 se especifica la información técnica del equipo de perforación de la firma Klunne², según los parámetros de cada parte del equipo.

Tabla 2.1. Capacidades del equipo de perforación

Capacidad		
Capacidad de profundidad para la perforación diamantada		Se calcula la capacidad de perforación en un ángulo de perforación de 90 grados hacia la parte baja. La capacidad puede variar según la herramienta, condiciones del terreno, técnicas de perforación y los equipos utilizados.
Herramienta de 55,6 mm de diámetro	800m *	
Herramienta de 69,9 mm de diámetro	450m *	
Herramienta de 88,9 mm de diámetro	200m	
Herramienta de 117,5 mm de diámetro	70m	
* Dimensión recomendada para máximo funcionamiento		
Dimensiones especificadas de acuerdo al funcionamiento del motor de perforación de combustión diesel: Potencia: 130 HP (97 Kw) a 2100 rpm		

² Contratista de la empresa IAMGOLD S.A. para las actividades de perforación

Tabla 2.2. Malacate wireline del equipo de perforación

Malacate wireline	
El malacate wireline esta accionado por un motor de combustión diesel de 100HP que provee una velocidad variable según las necesidades del operador.	
Capacidad para cable de 3/16 pulg. (4.8mm) de diámetro	915 m
Capacidad de arrastre vacío	907 kg
Capacidad de arrastre lleno	295 kg

Tabla 2.3. Módulo hidráulico del equipo de perforación

Modulo hidráulico
El módulo hidráulico utiliza solamente la cantidad necesaria de aceite hidráulico porque cuenta con un sistema de detección de carga. Este modulo es enfriado con el agua que se utiliza para el proceso de perforación. Los controles están montados directamente sobre los controles de distribución hidráulica reduciendo la complejidad de pilotaje, el peso total y el mantenimiento. El tanque hidráulico esta presurizado y ensamblado con un filtro que permite el flujo de aceite limpio y exento de contaminación.
Funciones: Cabeza giratoria flotante Límite de torque sobre la cabeza giratoria y el cilindro de alimentación
Bomba hidráulica: 65 qpm(246 l/min) a 1800 rpm. Presión máxima 4000 psi (275 bares)

Tabla 2.4. Mástil y base de posicionamiento del equipo de perforación

Mástil de alimentación y base de posicionamiento	
El mástil esta formado por una carretilla de rodamientos accionada por un cilindro hidráulico. La base se conforma por varios puntos de anclaje, permitiendo un montaje óptimo sobre la plataforma de perforación. El deslizador permite posicionar al mástil a la altura deseada.	
Recorrido de la cabeza	1,68 m
Capacidad de arrastre y de empuje	18.000 lb (8.300 kg) @ 4.000 psi
Velocidad de arrastre y de descenso	61 m/min

Tabla 2.5. Cabeza y mandriles del equipo de perforación

Cabeza, mandril rotatorio y mandril fijo		
Capacidad de retención	20.000 lb (9.000 kg)	
Diámetro interior del tubo conductor	124 mm	
Operación de mandril	Aprieta y afloja hidráulicamente	
Impulsión	Cadenas HV 60-2 en tanque de aceite	
Motor hidráulico	80cc (variable)	
Transmisión	Hi –Lo	
Lubricación	Presurizada con bomba, filtro y enfriador	
Material de fabricación	Acero	
Velocidad	0 hasta 1500 rpm	
Transmisión		
Velocidad	Rpm	Toque
Lo	0 - 361	2.840 N-m
Hi	0 – 1500	820 N-m
Datos considerando un motor a 80 cc a una presión de 275 bares (4.000 psi)		

Tabla 2.6. Peso del equipo de perforación

Peso	
Unidad de alimentación (motor diesel)	1550 lb (703 kg)
homba hidráulica y tanque	1150 lb (522 kg)
Panel de control	510 lb (231 kg)
Cabeza de perforación	390 lb (177 kg)
Motor de la cabeza	70 lb (32 kg)
Transmisión de la cabeza	85 lb (39 kg)
Mandril fijo	200 lb (90 kg)
Mástil de alimentación	1200 lb (544 kg)
Base de mástil	500 lb(227 kg)
Malacate wireline (incluido motor)	460 lb (208 kg)
Peso total:	6108 lb (2770 kg)

En la Figura 2.1 se observa el equipo utilizado para el proceso de perforación en la fase de exploración minera del proyecto Quimsacocha.



Figura 2.1. Equipo utilizado para la perforación

2.2.7 Herramientas de perforación

Las brocas huecas utilizadas para la perforación minera en la fase de exploración, tienen una estructura en forma de corona, usando diamantes naturales en la superficie de las diferentes herramientas o alta calidad de diamantes sintéticos generalmente usados para impregnación, es decir, este tipo de herramientas se clasifican por utilizar diamante en la superficie o por tener impregnación de diamante en su corona, como se puede apreciar en la Figura 2.2.

La primera clasificación se caracteriza porque sus promedios de penetración en ciertas formaciones de roca son superiores en comparación con las de las brocas impregnadas. Estas pueden alcanzar bajos costos por metro perforado en formaciones consolidadas, lo que significa menor desgaste de la herramienta. Una de las características más importantes de esta broca es la recuperación de sus contenidos en formaciones litológicas suaves.

La clasificación que corresponde a las brocas de diamantes impregnados, se caracterizan porque generalmente duran más que los juegos de brocas de superficies. Estas herramientas son menos propensas a dañarse por tratamiento duro y son utilizables en su totalidad, debido a que no requieren tornar su corona para recuperar los diamantes impregnados, contrario a las brocas con diamantes en la superficie de abrasión que necesitan recuperar el diamantado cuando este ha sido desgastado.

Según el tipo de roca y las condiciones del suelo, las brocas de perforación se clasifican por series, como se indica en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Clasificación de las brocas de perforación

TIPO DE ROCA	CONDICION DE SUELO	SERIES
Piedra arenisca gruesa, arenas, sobrecargas, conglomerados	Conveniente para severas condiciones de operación	SER1
Piedra arenisca con granito, sedimentos resistentes	Abrasivas, formaciones rotas de grano ordinario	SER2
Pizarras, calcitas, siltstone	Abrasivas y formaciones rotas	SER4
Sedimento volcánico, gneis, garbo, esquisto.	Semiduro, rocas menos abrasivas	SER6
Basalto, dolorita, mafía, formaciones rocosas duras	Formaciones duras	SER8
Granito, cuarzito, diorita	Duras formaciones muy duras	SER9
Cuarzo, hierro, chert	Formaciones muy duras y grano fino	SER10
Cuarzo duro, chert duro, jasperlita	Extremadamente duro, con formaciones de grano muy fino	SER12



Figura 2.2. Brocas utilizadas para la perforación

2.3 VARIABLES DE LA OPERACIÓN DE PERFORACIÓN

Las variables de operación inherentes al proceso de perforación que inciden en su eficiencia son las que se identifican a continuación:

- Velocidad de rotación
- Fuerza de empuje
- Diámetro de perforación
- Velocidad y caudal del fluido de barrido de partículas
- Desgaste de la herramienta de perforación

Es importante destacar que estas variables dependen de un factor externo al sistema, la dureza o resistencia de la roca. En el caso de la perforación por rotación, la evidencia empírica indica tanto a partir de las investigaciones a nivel de ensayos, como de lo observado en la práctica, que existe una buena correlación entre la resistencia a la compresión de la roca y su velocidad de penetración. Esta afirmación resulta conceptualmente coherente, atendiendo a la forma como se aplica la energía a la roca y su consiguiente ruptura originada principalmente por un proceso de perforación abrasiva.

No existe una clasificación universal de las rocas en función de su resistencia a la compresión, conocida por su nomenclatura como S_c . En la identificación técnica sobre el

tema se encuentran diversas proposiciones; para efectos del análisis de las variables que influyen en el proceso, que corresponde a este segundo capítulo, se adoptará la clasificación que se enuncia en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Clasificación de la dureza de las rocas

TIPO DE ROCA	Sc [kgp/cm²]	Sc [MPa]
Muy blandas	< 400	< 40
Blandas	400 – 800	40 – 80
Medianas	800 – 1.200	80 – 120
Duras	1.200 – 2.000	120 – 200
Muy duras	> 2.000	> 200

2.3.1 Velocidad de rotación

La velocidad de rotación (N), expresada en rpm, es inversamente proporcional a la resistencia a la compresión de la roca (Sc). En la Tabla 2.9 se indican las velocidades observadas en la práctica para los diferentes tipos de rocas identificados anteriormente.

Tabla 2.9. Velocidades de rotación según la dureza de las rocas

TIPO DE ROCA	Sc [kgp/cm²]	N [rpm]
Muy blandas	< 400	120 – 100
Blandas	400 – 800	100 – 80
Medianas	800 – 1.200	80 – 60
Duras	1.200 – 2.000	60 – 40
Muy duras	> 2.000	40 – 30

2.3.2 Fuerza de empuje y diámetro de perforación

La fuerza de empuje necesaria (F), aumenta directamente con la dureza de la roca, y debe alcanzar una magnitud suficiente para sobrepasar su resistencia a la compresión. Por otra parte, esta fuerza no puede exceder un determinado valor límite, para evitar daños prematuros en la herramienta de perforación.

En formaciones rocosas duras o muy duras, una fuerza excesiva conduce a la destrucción de los insertos de la corana, lo que significa el término de la vida útil del instrumento.

A su vez, la mayor o menor resistencia de los insertos en la corona depende del tamaño de la herramienta o, por consiguiente, del diámetro de perforación. A mayor diámetro, más grande es la corona de perforación y por consiguiente más robustos y resistentes son sus insertos. En compendio de lo mencionado, la fuerza de empuje es función de dos variables: la dureza de la roca y el diámetro de perforación.

Según la dureza de la roca, la fuerza de empuje mínima necesaria para vencer su resistencia a la compresión, está dada por la ecuación 2.1:

$$F_{\min} = 28,5 \cdot Sc \cdot \phi \quad [\text{lbp}] \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde: Sc es la resistencia de la compresión de la roca [MPa]

ϕ es el diámetro de perforación [pulg]

La fuerza de empuje se acostumbra a expresarla en libras-peso [lbp] por unidad de diámetro de la herramienta, expresado en pulgadas.

En la Tabla 2.10 se comparan los valores mínimos que resultan de aplicar la ecuación anterior con los valores observados en la práctica minera según la dureza de la roca.

Tabla 2.10. Fuerza de empuje según tipo de roca

TIPO DE ROCA	Sc [kgp/cm ²]	Fmin [lbp / pulg]	Fpráctica [lbp / pulg]
Muy blandas	< 400	< 1.150	< 1.500
Blandas	400 – 800	1.150 – 2.300	1.500 – 3.000
Medianas	800 – 1.200	2.300 – 3.400	3.000 – 5.000
Duras	1.200 – 2.000	3.400 – 5.700	5.000 – 7.000
Muy duras	> 2.000	> 5.700	7.000 – 9.000

2.3.3 Velocidad y caudal del fluido de barrido de partículas

El agua que se inyecta por el interior de la columna de barras hacia el fondo del barreno, cumple los siguientes objetivos:

- Refrigeración y lubricación de la herramienta de perforación
- Remoción o barrido del detritus desde el fondo del tiro
- Extracción del detritus hacia afuera

El barrido y extracción del detritus de perforación se realiza a expensas de la energía cinética del fluido que circula por el espacio anular comprendido entre las barras y las paredes del pozo. Por lo tanto, la eficiencia del proceso depende, en lo esencial, de la velocidad del agua (**V**) en este espacio anular y del caudal (**Q**) que circula por el sistema.

Por otra parte, la refrigeración de la corona se obtiene por efecto de la expansión o caída de presión que se produce durante el paso del fluido por la herramienta de perforación, que a su vez depende de la presión con que llega el agua hacia la corona del taladro.

2.3.4 Velocidad del fluido

La velocidad ascensional mínima para la extracción del detritus es función de la densidad de la roca y del tamaño promedio de las partículas.

A continuación se exponen las ecuaciones que permiten estimar esta velocidad.

$$V = 573 \times \frac{\delta r}{\delta r + 1} \times d^{0.6} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

O también;

$$V = 250 \times \delta r^{1/2} \times d^{1/2} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde: V es la velocidad ascensional mínima [m /min]

δr es la densidad de la roca [gr/cm³]

d es el diámetro promedio de las partículas [mm]

En etapa de proyecto, las fórmulas anteriores tienen limitadas posibilidades de aplicación, dadas las dificultades para obtener datos confiables acerca del tamaño promedio del detritus de perforación. No obstante, según la práctica minera, las velocidades de fluido atendiendo al tipo de roca, son las que se indican en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11. Velocidad ascensional del fluido según el tipo de roca

TIPO DE ROCA	VELOCIDAD MÍNIMA		VELOCIDAD MÁXIMA	
	[m / min]	[m / min]	[m / min]	[m / min]
Blandas	1.200	4.000	1.800	6.000
Medianas	1.500	5.000	2.100	7.000
Duras	1.800	6.000	2.400	8.000

La velocidad ascensional máxima indicada obedece al problema de desgaste de las barras o tubos de perforación. El flujo de agua que circula por el espacio anular lleva en suspensión un material que puede ser altamente abrasivo, especialmente si hay presencia de cuarzo u otros minerales de gran dureza, como ocurre frecuentemente en la minería metálica. Es sabido que en los fenómenos de flujo de material particulado, el desgaste por roce es proporcional al de la velocidad de dicho material.

2.3.5 Caudal del fluido

El caudal de agua de barrido de partículas (Q) se calcula a partir de la fórmula básica que lo relaciona con la sección del ducto de circulación y con la velocidad de flujo.

$$Q = \text{Área de la sección transversal} \times \text{Velocidad de flujo}$$

En el caso que aquí se analiza, se obtiene las ecuaciones 2.4 y 2.5 según las unidades utilizadas:

$$Q = \frac{\pi(\phi^2 - D^2)}{4 \times 10^6} \times V \quad [\text{m}^3 / \text{min}] \quad \text{Ecuación 2.4}$$

$$Q = \frac{\pi(\phi^2 - D^2)}{4 \times 144} \times V \quad [\text{pies}^3 / \text{min}] \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Donde: Q es caudal del líquido [m^3/min] o [pies^3/min]

Φ es el diámetro de la herramienta [mm] o [pulg]

D es el diámetro exterior de las barras [mm] o [pulg]

V es la velocidad del fluido [m/min] o [pies/min]

Otro factor a considerar en relación con este tema, es el área de la sección anular por donde circula el líquido o, planteado de manera más práctica, se trata de la diferencia entre el diámetro de perforación y el diámetro exterior de las barras o varillas. Dado que a medida que aumenta la resistencia de la roca el tamaño del detritus es más pequeño, la práctica operacional aconseja adoptar los valores dados en la siguiente tabla.

Tabla 2.12. Área de sección anular para la circulación del fluido

TIPO DE ROCA	[$\Phi - D$]	
	[pulg]	[mm]
Blandas	3	76
Medianas	2	51
Duras	1 ½	38

2.3.6 Desgaste de la herramienta de perforación

Cuando se utilizan brocas huecas con coronas diamantadas, la velocidad de penetración disminuye considerablemente a medida que aumenta el desgaste de la herramienta. En la Figura 2.3 se aprecia que, a la mitad de la vida útil de la herramienta (50 %), la velocidad de penetración se ha reducido, aproximadamente, entre un 50 a un 75 % con respecto a la alcanzada con una herramienta nueva.

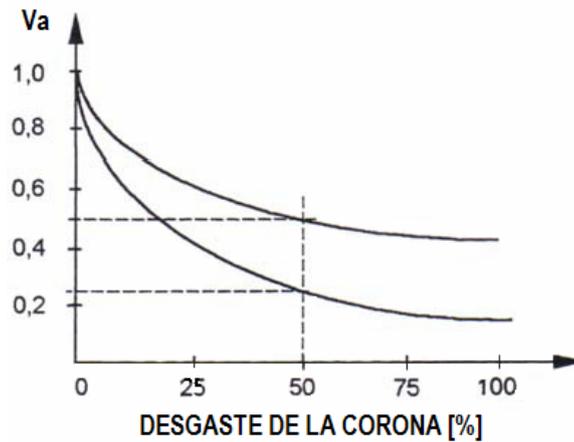


Figura 2.3. Velocidad de penetración Vs. Desgaste de la herramienta

2.3.7 Consumos de energía

Cuando la máquina está perforando los principales consumos de energía son los vinculados a los siguientes accionamientos:

- Rotación
- Fuerza de empuje
- Otros accionamientos menores

2.3.7.1 Energía consumida por la rotación

Para hacer rotar la columna de barras o varillas, es preciso aplicar una fuerza tangencial (F). La energía consumida en un giro (E_r) es igual al producto de la fuerza por el desplazamiento recorrido, como se indica en la ecuación 2.6.

$$Er = F \times 2 \cdot \pi \cdot R = 2 \cdot \pi \cdot T \quad [\text{kgp} \cdot \text{m/vuelta}] \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Donde (T) representa el torque de rotación. Si se considera como unidad de tiempo un minuto, la potencia requerida (**Wr**) será por tanto:

$$Wr = 2 \cdot \pi \cdot N \cdot T \quad [\text{kgp} \cdot \text{m/min}] \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Donde (N) es el número de vueltas por minuto [rpm] o velocidad de rotación, que es inversamente proporcional a la dureza de la roca (Sc).

La ecuación anterior da cuenta de la energía consumida en el fondo del pozo. En el caso del equipo de perforación, para obtener la potencia aplicada en el motor de rotación (**W_{MR}**), es preciso incorporar el rendimiento mecánico de la transmisión (η_{mt}) y el rendimiento mecánico del motor (η_{mm}). Expresada esta potencia en [HP], se obtiene:

$$W_{MR} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N \cdot T}{4500 \cdot \eta_{mt} \cdot \eta_{mm}} \quad [\text{HP}] \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Donde:

η_{mt} es el índice de rendimiento mecánico de la transmisión y varía entre 0,80 a 0,90

η_{mm} es el índice de rendimiento mecánico del motor y varía entre 0,90 a 0,95

A continuación en la Figura 2.4, se presenta una gráfica que permite el análisis de la potencia requerida en función del diámetro de penetración y la dureza de la roca.

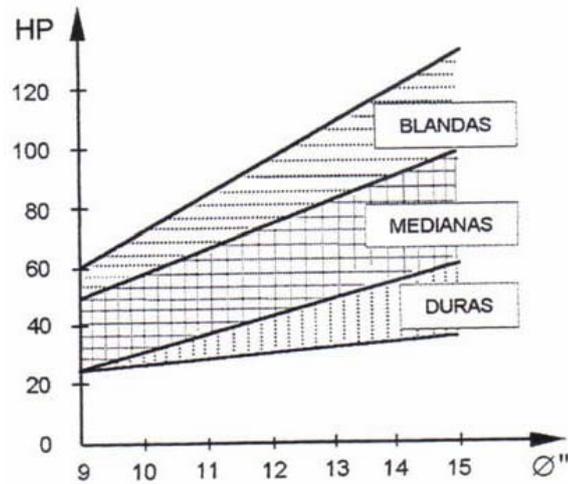


Figura 2.4. Potencia de rotación en función del diámetro de perforación

2.3.7.2 Energía consumida por el sistema de empuje

La penetración de la herramienta requiere la aplicación de una gran fuerza de empuje (**F**); no obstante, la energía consumida por este accionamiento es pequeña comparada con la rotación. Suponiendo que en un giro, la herramienta avanza una longitud **h**, la energía consumida en una vuelta (**Ee**) será igual al producto de la fuerza por el desplazamiento recorrido, como se observa en la Figura 2.5, mediante la ecuación 2.9:

$$Ee = F \times h \quad [\text{kgp} \cdot \text{m/vuelta}] \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Donde: F es la fuerza de empuje [kgp]

h la longitud que avanza la herramienta [m]

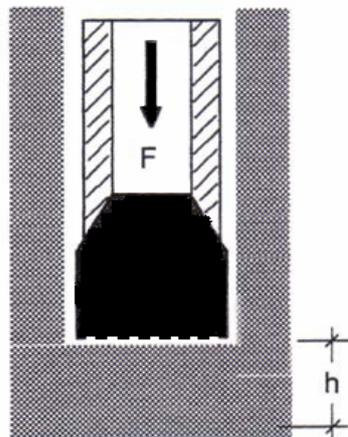


Figura 2.5. Energía consumida por el sistema de empuje

Si se elige como unidad de tiempo un minuto, la potencia requerida (W_e) será:

$$W_e = F \times Va \quad [\text{kgp} \cdot \text{m}/\text{min}] \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Donde: Va es la velocidad de avance [m/min].

En la práctica minera, en un rango de diámetros 200 a 300 mm y en rocas medianas a duras (Sc de 80 a 200 Mpa), se registran velocidades del orden de 20 a 10 m/h. En el caso de los equipos de perforación, el mecanismo de empuje es accionado por un motor hidráulico. Por lo tanto, es preciso considerar el rendimiento mecánico de las transmisiones (η_{mt}) y el rendimiento hidráulico del motor de empuje (η_{hm}). Así, la potencia aplicada en la fuerza de empuje (W_E), será:

$$W_E = \frac{F \times Va}{4500 \cdot \eta_{mt} \cdot \eta_{hm}} \quad [\text{HP}] \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Donde:

η_{mt} es el índice de rendimiento mecánico de la transmisión y varía entre 0,80 a 0,90

η_{hm} es el índice de rendimiento hidráulico del motor de empuje y varía entre 0,65 a 0,75

En la Figura 2.6, se observa que la potencia requerida para la fuerza de empuje es del orden de un 10 % de la demandada para la rotación.

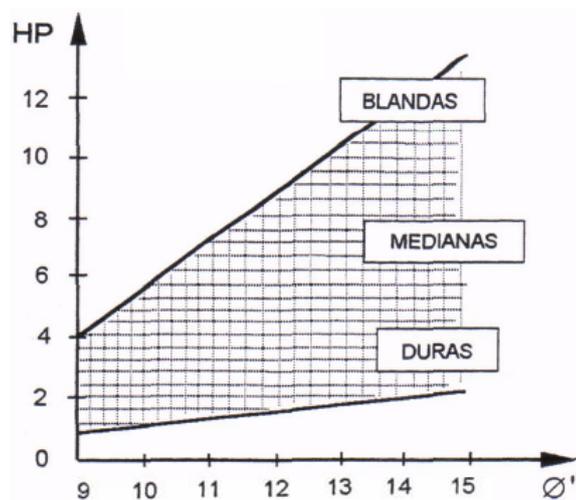


Figura 2.6. Potencia de empuje en función del diámetro de perforación

2.4 CIRCUITO DE RECICLAJE DE AGUA DE PERFORACIÓN

El circuito de reciclaje de agua esta formado por dos etapas, como se puede observar en la Figura 2.7. La primera corresponde al sistema de captación y conducción de agua desde la vertiente natural hacia la primera tina de acumulación. El agua se transporta mediante el uso de una bomba de funcionamiento mecánico accionada por un motor diesel de 10 HP a 1500 rpm; el agua acumulada pasa hacia una segunda tina de dosificación, en esta etapa se añade bentonitas y polímeros que se determinan para su uso en el proceso de perforación.

El agua dosificada se conduce hacia el sistema de inyección de agua a presión del equipo de perforación que ingresa hacia el rig. El líquido que se integra desde la tina de dosificación hacia el sistema de inyección a presión es controlado mediante el accionamiento de una válvula manual.

La distancia que recorre el agua desde la vertiente hasta la plataforma de perforación es aproximadamente 100 metros, para lo cual se utiliza tubería de 25 mm de diametro Flex con U.V. para uso en la intemperie, por su durabilidad frente a las condiciones climatológicas y del terreno.

La segunda etapa corresponde al tratamiento del líquido que se ha utilizado en la perforación y comprende una conexión en serie de diferentes tinas, cuyo propósito es el de eliminar los sedimentos obtenidos en la perforación. El líquido obtenido de la perforación es guiado mediante un canal a cielo abierto, donde se acumula el agua que contiene los ripios de perforación y es conducido hacia la tubería que conecta la siguiente tina. El paso posterior corresponde a la filtración de sedimentos, ripios y grasas de perforación, la que se realiza en una tina con una capacidad de 500 litros y cuyo propósito principal es el de eliminar la mayor cantidad de partículas en suspensión.

La filtración se la realiza mediante una malla metálica de acero inoxidable que separa las partículas de materia inorgánica como arenas, ripios y las grasas utilizadas para la lubricación de las herramientas de perforación.

En la siguiente tina, que tiene una capacidad de 2000 litros, se dosifica floculante con el objeto de sedimentar las partículas de menor tamaño. Para el resto del proceso, dependiendo de factores litológicos, propiedades físicas y químicas de la roca, se determinan el número de tinas restantes que van a ser utilizadas para el resto de la sedimentación y decantación de las partículas; estas tinas tienen una capacidad de 2.000 litros.

Por último el líquido que ha sido tratado se acumula en una tina de reciclaje de capacidad igual a las anteriores tinas. El agua tratada se reutilizará dentro del proceso de perforación y se lo reintegra al sistema mediante una bomba de accionamiento mecánico accionada por un motor diesel de 10 HP a 1500 rpm. El circuito de agua recorre una distancia aproximada de 260 metros, que corresponde a la trayectoria entre la vertiente de agua y la plataforma (100 metros); la plataforma y el circuito de reciclaje de agua (80 metros) y la distancia de la tina de agua reciclada hacia la plataforma (80 metros).

Las tinas utilizadas son fabricadas de polietileno, su diseño es cónico con una capacidad real de 2210 litros, diámetro superior externo de 1570 mm, diámetro inferior externo de 1180 mm y una altura de 1570 mm. El polietileno tiene la característica de evitar la proliferación de organismos, no se corroen ni se oxidan y no requieren de mantenimiento continuo, por esta razón es considerado ideal para el proceso de tratamiento del agua de perforación. Las tinas estas conectadas mediante tubería y acoples de policloruro de vinilo de 60 mm de diámetro.

El circuito de reciclaje de agua aprovecha la topografía del terreno, es decir la gravedad de la caída de agua, para el proceso de sedimentación y captación del agua que se utiliza en la perforación y únicamente se utiliza la bomba de accionamiento mecánico para regresar nuevamente el agua ya tratada hacia el proceso.



Figura 2.7. Circuito de reciclaje de agua para la perforación

CAPÍTULO 3

INSTRUMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

El desarrollo tecnológico de los sistemas de control y la utilización de dispositivos eléctricos y electrónicos para diseñar, simular e implementar en forma eficiente los procesos que están involucrados, hace necesario que los profesionales que intervienen en la automatización y control de los procesos industriales, amplíen y profundicen sus conocimientos en esta área, teniendo en cuenta las facilidades que se presentan para adquirir tecnología de punta.

Es este amplio campo tecnológico, el que brinda múltiples opciones en el desarrollo de nuestros sistemas de control, monitoreo de variables y las diferentes tareas que se puedan obtener al contar con una buena instrumentación, que garanticen el correcto funcionamiento de los procesos, en concepto de confiabilidad y eficiencia, para obtener mayores y mejores resultados en la calidad de la producción final.

El objetivo de este capítulo es conocer los diferentes parámetros y estrategias que se deben tomar en cuenta para diseñar el sistema de control y monitoreo, partiendo de que el proceso de perforación ya tiene implementado un sistema que requiere de mejoras para cumplir con los planteamientos establecidos. Además, en este capítulo se abarcará los diferentes elementos primarios de medición y los elementos finales de control, de tal manera que se logre realizar una selección adecuada de los dispositivos para el diseño, investigando los que más se adapten en el proceso en base a sus características técnicas y de funcionamiento.

Es parte importante dentro de la instrumentación de un proceso, conocer las normas con las cuales se va a escoger los dispositivos del sistema que se está diseñando. Estas normas están aplicadas en las características de los instrumentos, tanto de medición como

los de actuación y se estandarizan de acuerdo con las normas SAMA (Scientific Apparatus Makers Association), PMC20. Las características estáticas que se deben tomar en cuenta para escoger los instrumentos de medición son:

- **Campo de medida o Rango.** Es el conjunto de valores dentro de los límites superior e inferior de medida, en los cuales el instrumento es capaz de trabajar en forma confiable. Este denota la capacidad del equipo y puede expresarse en unidades físicas.
- **Alcance o Span.** Es la diferencia entre el valor superior e inferior del campo de medida del instrumento.
- **Error.** Es la diferencia que existiría entre el valor que el instrumento indique que tenga la variable de proceso y el valor que realmente tenga esta variable en ese momento.
- **Precisión.** Es la tolerancia mínima de medida que permitirá indicar, registrar o controlar el instrumento; en otras palabras, es la mínima división de escala de un instrumento indicador. Generalmente esta se expresa en porcentaje del Span.
- **Zona Muerta.** Es el máximo campo de variación de la variable en el proceso real, para el cual el instrumento no registra ninguna variación en su indicación, registro o control, es decir, el intervalo de valores para cual el instrumento no produce respuesta alguna.
- **Sensibilidad.** Es la relación entre la variación de la lectura del instrumento y el cambio en el proceso que causa este efecto.
- **Repetibilidad.** Es la capacidad de un instrumento de repetir el valor de una medición, de un mismo valor de la variable real en una única dirección de medición, considerando las mismas condiciones de funcionamiento.
- **Histéresis.** Similar a la repetibilidad, pero en este caso el proceso de medición se efectuara en ambas direcciones.
- **Campo de medida con supresión de cero.** Es aquel rango de un instrumento cuyo valor mínimo se encuentra por encima del cero real de la variable.
- **Campo de medida con elevación de cero.** Es aquel rango de un instrumento cuyo valor mínimo se encuentra por debajo de cero de las variables.

Por otra parte, las características dinámicas de los instrumentos de medida es otro parámetro que se debe tomar en cuenta para realizar la instrumentación del sistema. La presencia de inercias, capacidades eléctricas, térmicas, fluidas, y en general, de elementos que almacenan energía, hace que la respuesta de un sensor a señales de entrada variable sea distinta a la que presenta cuando las señales de entrada son constantes o que se representen mediante las características estáticas.

La descripción del comportamiento del sensor se hace en este caso mediante las denominadas respuestas dinámicas, error dinámico y velocidad de respuesta o retardo. El error dinámico es la diferencia entre el valor indicado y el valor exacto de la variable medida, siendo nulo el error estático. Este describe la diferencia en la respuesta del sensor a una magnitud de entrada según esta sea constante o variable en el tiempo.

La velocidad de respuesta indica la rapidez con que el sistema de medida responde a los cambios de la variable de entrada. En cuanto a la medida, no es importante que exista un retardo entre la magnitud aplicada a la entrada y la indicación correspondiente a la salida, sin embargo cuando el sensor forma parte de un complejo sistema de control, el retardo puede dar lugar a pequeñas oscilaciones.

Para poder determinar las características dinámicas de un sensor, se debe aplicar a su entrada una magnitud variable. Esta puede ser de formas distintas, pero lo normal y suficiente para un sistema lineal es estudiar la respuesta, frente a una entrada transitoria como un impulso, un escalón o una rampa periódica o aleatoria. La elección de una u otra depende del tipo de sensor.

Para describir matemáticamente el comportamiento de un sensor, se supone que la salida y la entrada se relacionan según una ecuación diferencial lineal de coeficientes constantes y que, por lo tanto, se tiene un sistema lineal invariable en el tiempo. En estas condiciones, la relación entre la salida y la entrada del sensor puede expresarse de una manera simple, en forma de coeficiente, empleando la transformada de Laplace de ambas señales y la función de transferencia propia del sensor. Hay que recordar que esta última da una relación general entre la salida y la entrada, pero no entre sus valores instantáneos.

Las características dinámicas de los sensores pueden estudiarse entonces por cada señal de entrada aplicada, agrupándolos de acuerdo con el orden de la función de transferencia que lo describe. Normalmente no es necesario emplear modelos de orden superior a dos.

Según las funciones que realizan los diferentes instrumentos se los puede clasificar:

- **Instrumentos ciegos.** Son aquellos que no tienen indicación visible de la variable medida pero cumplen una acción reguladora en el proceso.
- **Instrumentos indicadores.** Son aquellos que tienen un indicador visual de la variable del proceso, pueden ser analógicos y/o digitales.
- **Instrumentos registradores.** Estos pueden ser de tipo mecánico o también de tipo electrónico, como por ejemplo los registradores digitales que por medio del puerto serial se conectan a una computadora donde aparece gráficamente en pantalla las estadísticas de medición. Estos instrumentos se utilizan cuando el proceso requiere generar un historial de la variable.
- **Elementos primarios de medida.** Son aquellos que están encargados de medir directamente la variable a controlar, estos entran en contacto directo con la variable del proceso, con el fin de recibir un efecto sobre este y evaluar la variable en cuestión.
- **Transmisores.** Son todos aquellos que transmiten la variable a distancia en forma de señal eléctrica, neumática, hidráulica, o electromagnética. Estos transmiten las variables de proceso en forma de señales proporcionales a estas.
- **Transductores.** Son aquellos que modifican, convierten, o acondicionan la señal de entrada. Son instrumentos fuera de línea (no en contacto con el proceso), capaces de realizar operaciones lógicas y matemáticas con señales de uno o más transmisores.
- **Receptores.** Son aquellos instrumentos que reciben la señal enviada por los transmisores. Son generalmente instalados en el panel de control, como interfase entre el proceso y el operador.
- **Controladores.** Son los encargados de encontrar el error entre la variable medida y la referencia, y efectúan una acción para corregir dicho error. Es uno de los elementos más importantes, ya que será el encargado de ejercer la función de comparar lo que está sucediendo en el proceso para corregir las desviaciones.

- **Elemento final de control.** Son los instrumentos que reciben la señal de corrección del controlador y actúan sobre el proceso para corregir el error. Este instrumento está en contacto directo con el proceso en línea, ejerciendo un cambio sobre este de tal manera que se cambien los parámetros hacia el valor deseado.

3.1 ESTRATEGIAS Y PARÁMETROS PARA EL CONTROL AUTOMATICO

La automatización y control se lleva a cabo, una vez que todos los parámetros del proceso han sido reconocidos para cumplir con el alcance y los objetivos del proyecto. Uno de los avances del proyecto es considerar las estrategias que convienen para un funcionamiento óptimo del sistema, englobando todas las variables que se involucren dentro del proceso y seleccionando los recursos con los que se va a lograrlo. Con este criterio, se muestran en la Tabla 3.1, los parámetros y sus respectivas estrategias que se vienen utilizando en el diseño del proyecto.

Tabla 3.1. Estrategias y parámetros para el Control Automático del Sistema

PARÁMETRO	ESTRATEGIA
Nivel de líquido en la tina de acumulación	Diseñar un sistema de control en lazo cerrado de nivel de líquido, que minimice el número de fallas, liberando al personal de perforación de tareas reincidentes y reduciendo inconvenientes en el proceso por no llevar un procedimiento sistemático.
Flujo de líquido para el proceso de perforación	Diseñar un sistema de control en lazo cerrado de flujo de líquido que incremente los niveles de calidad del proceso, obteniendo un diseño flexible en funcionamiento con un mejoramiento continuo en el proceso de perforación.

PARÁMETRO	ESTRATEGIA
Monitoreo y manejo de las variables de operación e interface del sistema de control y monitoreo	Obtener una interface en el diseño que este orientado a la supervisión de control y adquisición de datos, que sea flexible en sus parámetros de diseño, de arquitectura abierta a posibles expansiones o modificaciones y que garantice los resultados finales esperados.
Instrumentación y conexiones	Desarrollar un diseño en donde las unidades de medición y control, equipos electrónicos y conexiones estén protegidas de las hostilidades en las que ocurre el proceso industrial, tomando medidas de prevención, corrección y predicción.
Análisis técnico y de manejo del sistema	Lograr un diseño eficiente y confiable que cumpla con los parámetros técnicos para su funcionamiento, que brinde una interface amigable al operador y que represente el comportamiento del proceso.

Existen diferentes métodos que se utilizan para realizar la acción de control dentro de un proceso, sean estos clásicos o modernos, según la clasificación del sistema en la teoría de control. Estos métodos permiten reaccionar al controlador, mandando una señal correctiva del error generado, mientras que las estrategias de control, hacen más eficiente el trabajo de todo el sistema, ahorrando recursos y tiempo.

Las estrategias de control más reconocidas dentro de los procesos industriales son las siguientes:

- **Control en cascada.** Consiste en incluir uno o más lazos de control interno dentro de otro externo, con el objetivo de anular perturbaciones, impidiendo que las perturbaciones secundarias afecten al sistema principal. Básicamente el controlador externo se encarga de la variable principal, mientras que los controladores internos se encargan de las perturbaciones más frecuentes. Como regla general, a más

interno es el lazo, la respuesta de este debe ser más rápido. Las ventajas de esta estrategia es que las perturbaciones más frecuentes son corregidas antes de afectar a la variable principal, permite usar ganancias altas y tiene una respuesta relativamente rápida.

- **Control de relación.** Consiste en analizar y mantener una proporcionalidad entre dos o más elementos (actuadores) dentro de un proceso continuo. Se usa comúnmente cuando se tiene que ingresar dos líquidos a un tanque y donde la cantidad del primer líquido debe mantener una relación respecto con la del segundo, además los líquidos deben entrar constantemente al tanque. Este tipo de estrategia significa un ahorro de instrumentos y un sistema más sencillo de supervisar y reparar.
- **Control de rango dividido.** Es aplicado a sistemas con una sola variable controlada y dos o más variables manipuladas, las cuales afectan de igual forma a la variable controlada. Requiere compartir la señal de salida del controlador con varios elementos actuadores.
- **Control selectivo.** Consiste en ejercer control sobre dos variables de un proceso, relacionadas entre sí de tal modo que una u otra pueda ser controlada por la misma variable manipulada. La acción de control se logra conectando la salida de los controladores a un switch selector. Es aplicado por lo general en seguridad y protección de equipos eléctricos y electrónicos
- **Control inferencial.** Consiste en efectuar la medición de la variable controlada a través de otra variable relacionada, considerada variable secundaria (pero dependiente de la principal). Los componentes de este sistema son los mismos que los de un sistema de control realimentado más una unidad de computo llamada estimador. Se aplica a procesos donde la obtención de información o la medición no se pueden llevar a cabo por motivos de que no existe un elemento medidor para ese tipo de parámetros, o si existe es demasiado costoso, o también porque no se puede medir constantemente el parámetro, lo que hace que se adquieran muy pocas muestras en un tiempo muy largo.
- **Compensación de tiempo muerto.** El tiempo muerto es el intervalo de tiempo de respuesta desde que se ingresa una señal en la entrada a un componente o un sistema, y el comienzo de una señal de respuesta por la salida del sistema. El tiempo muerto presenta la principal dificultad en los diseños de sistemas de control

estable. Como una regla práctica puede adoptarse la siguiente regla; si el tiempo muerto de un proceso es mayor que 1.5 veces su constante de tiempo, se requiere un compensador de tiempo muerto. Esta constante, es el tiempo necesario para que un proceso de primer orden alcance una respuesta igual al 63.2% de su respuesta final, cuando se le somete a un estímulo escalón.

Estas estrategias se toman en cuenta para el diseño del sistema de control en conjunto con los métodos con los que se logrará el control y monitoreo del nivel y flujo del líquido del proyecto. Una vez caracterizada la planta y elegidos los métodos de control más apropiados, las estrategias de control para el proceso complementan el diseño del sistema.

3.2 SENSORES Y TRANSMISORES

El elemento primario de medición o sensor, es aquel que detecta el valor de la variable medida, es decir, es la porción de los medios de medición que primero utiliza o transforma la energía del medio controlado. Los sensores y transmisores realizan todas las operaciones de medición en los procesos de control; en el sensor se produce un fenómeno físico, relacionado con una variable del proceso, que puede ser de tipo eléctrico, mecánico, electrónico o una combinación de estos varios. Por otra parte, el transmisor convierte este fenómeno que se produce en el sensor, en una señal que se pueda transmitir, y por lo tanto esta tiene relación con la variable que se mide en el proceso. Existe una clasificación de sensores por su tipo, dependiendo de las propiedades físicas en las que se desarrolla el proceso y de sus características de funcionamiento:

- **Sensores de contacto.** Son aquellos que realizan la medida en contacto directo, real y físico con el producto o materia, por ejemplo sensores de boya para medir nivel en un tanque o una termocupla para medir temperatura.
- **Sensores de no contacto.** Se basan en propiedades físicas de los materiales, son más exactos, pero propensos a interferencias del medio ambiente, por ejemplo los sensores ultrasónicos o los sensores ópticos.

- **Sensores digitales.** Trabajan con señales digitales, en código binario, pueden representar la codificación de una señal analógica, o también la representación de dos estados on/off, por ejemplo los sensores tipo switch.
- **Sensores analógicos.** Proporcionan medidas continuas, los rangos típicos son de 0 a 20mA, 4 a 20mA, 0 a 5v, 1 a 5v y dependiendo del tipo de proceso existen rangos especiales, por ejemplo los sensores capacitivos o los sensores piezoresistivos.
- **Sensores mecánicos.** Son aquellos que traducen la acción física del elemento medido, en un comportamiento mecánico, típicamente de movimiento o calor, por ejemplo el barómetro o el termómetro de mercurio.
- **Sensores electro-mecánicos.** Este tipo de sensor emplea un elemento mecánico elástico combinado con un transductor eléctrico, por ejemplo los sensores resistivos o los sensores magnéticos.

3.2.1 Sensores y Transmisores de Flujo

El sensor y transmisor de flujo es uno de los instrumentos más utilizados dentro de los procesos industriales. Los procesos de fabricación operan continuamente con variables que involucran movimiento de materiales y productos, todos estos sistemas pueden ser considerados como flujos, ya sean de soluciones líquidas o de diferentes clases de sólidos que se desplacen en el proceso. Los métodos de medición de flujo son tan variados como las aplicaciones en las que se tienen dentro de la industria; es por esta razón, que este tema se centrará en el estudio de los dispositivos de acuerdo a las características de medición de líquidos porque el proceso corresponde al control y monitoreo del flujo de agua en la perforación.

Se denomina flujo, al movimiento de fluidos por canales o conductos abiertos o cerrados, considerando como fluido a cualquier sustancia que pueda desplazarse. Es importante denotar, que el caudal es la cantidad de material, en peso o volumen, que fluye por unidad de tiempo. Las medidas de flujo y caudal están presentes en todos los procesos de transporte de materia y energía mediante fluidos, bien sea para el control de dichos procesos, para su monitoreo o con el fin de una tarea determinada, como por ejemplo el de

establecer la cantidad de agua utilizada y las pérdidas del líquido en el proceso de perforación.

La mayoría de flujómetros y de caudalímetros se basan en métodos de medida indirectos y, en particular, en la detección de diferencias de presión provocadas por la inserción de un elemento en el conjunto donde se desea medir; pero además de estos, existen instrumentos que se basan en la medición del flujo en base a la velocidad a la que se desplaza la sustancia, utilizando en sus dispositivos de censo paletas, turbinas o ultrasonido.

3.2.1.1 Características y Definiciones. La medición del flujo de un líquido obedece a la gran variedad del tipo de sustancias de las que resulta dicho flujo y del método utilizado para la medición, pero es importante destacar que se basan en las mismas unidades, que dependiendo de cuán específica sea la información que se necesite en el proceso, pueden ser mediciones basadas en el caudal o flujo volumétrico, o pueden ser mediciones basadas en la velocidad del flujo. Las unidades usadas en el primer tipo de mediciones expresan el volumen de líquido suministrado por unidad de tiempo, donde las unidades típicas de medida son los galones por minuto, metros cúbicos por hora o pies cúbicos por hora. En cambio, las mediciones basadas en la velocidad del flujo están expresadas como la distancia que el líquido viaja a través del elemento de transporte (tubería) por unidad de tiempo, las unidades típicas son metros por minuto o pies por minuto y se relaciona mediante la fórmula:

$$v = \frac{Q}{A} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde: v representa la velocidad de flujo del líquido

Q representa el caudal

A representa la sección transversal del elemento de transporte del líquido

Las características físicas y la composición de los líquidos permiten que estos tengan diferentes comportamientos, específicamente cuando se trata del desplazamiento en tuberías y elementos de transporte. Por este motivo, es importante distinguir los tipos de flujo que se producen dentro de los procesos. Se denomina flujo viscoso o laminar, al de un fluido a lo largo de un conducto recto, con paredes lisas y de sección transversal

uniforme, donde la trayectoria de cada una de las partículas es paralela a las paredes del tubo y tiene la misma dirección. Por contrapartida, se denomina flujo turbulento cuando algunas de las partículas del fluido poseen componentes de velocidad longitudinal y transversal, lo que da como resultado la aparición de remolinos y torbellinos en el fluido.

3.2.1.2 Funcionamiento

3.2.1.2.1 Sensores de flujo basados en la caída de presión

Placa orificio. Los instrumentos de medición basados en la obstrucción, son sin duda alguna, los más frecuentes en su uso. Se denomina obstrucción a una restricción de flujo de área constante, en esta se produce una caída de presión que depende del flujo, de forma que la medida de caudal se reduce a una medida de presión diferencial. Si en un conducto cerrado, se interpone una placa con un orificio, hay una contracción del fluido, que pasa a tener una sección transversal distinta del conducto a la del orificio y ello lleva asociado un cambio en su velocidad. Este orificio es un disco plano con un agujero, que se inserta en la línea del proceso, perpendicular al movimiento del fluido, de tal manera que se produzca la caída de presión, la que es proporcional a la razón de flujo volumétrico a través del orificio. El cálculo de flujo volumétrico se lo puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$Q = C \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde: q representa el caudal

ΔP representa la caída de presión a través del orificio

C representa el coeficiente del orificio

ρ representa la densidad del fluido

El diseño de la placa orificio por lo general es afilado aguas arriba y biselado aguas abajo como se observa en la Figura 3.1, esto con el propósito de eliminar perturbaciones que puedan afectar la calidad de la medición. Se debe tomar en cuenta que este tipo de sensores se utilizan en líquidos limpios, debido a que los fluidos con residuos producen erosión en los filos de la placa.

Existen variaciones de las placas orificio según la utilización dentro del proceso. Las placas con orificios concéntricos se utilizan para fluidos limpios y contienen pequeños orificios de drenaje de tal manera que se eliminan pequeñas cantidades de líquido. Las placas con orificio excéntrico en la parte alta, permite el paso de gases al medir líquidos, mientras que las placas excéntricas en la parte baja deja pasar sólidos suspendidos. Las placas con orificios segmentados se utilizan para líquidos con posible sedimentación de sólidos.

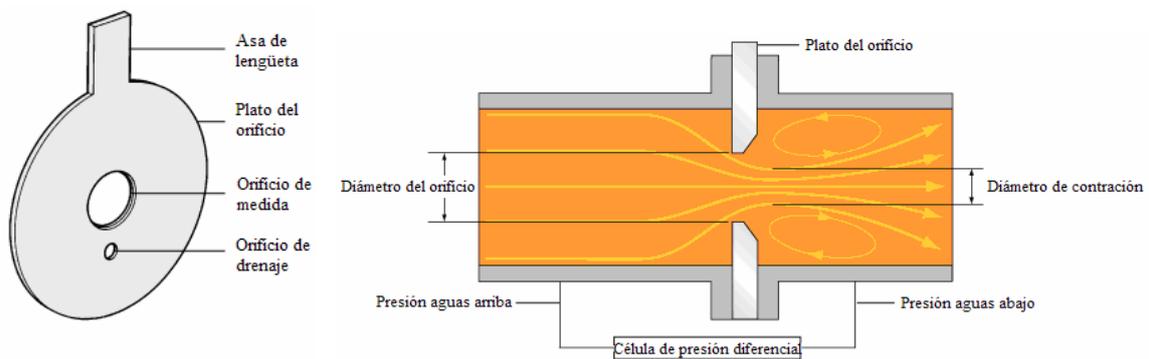


Figura 3.1. Sensor basado en la caída de presión. Placa orificio

Entre los principales inconvenientes de este método de medición se debe señalar una pérdida de carga apreciable y la dificultad de medir con exactitud caudales fluctuantes, con la excepción de que el medidor de presión diferencial sea relativamente rápido. Además la señal que se obtiene de la combinación orificio/transmisor es la caída de presión y no el flujo del líquido, es decir se utiliza un sensor diferencial de presión. En consecuencia, si se desea obtener el flujo se debe calcular la raíz cuadrada de la caída de presión dentro del proceso de instrumentación del sistema, u optar por un elemento que ofrece la extracción de la raíz dentro del transmisor y que se relaciona de manera lineal con el flujo o caudal. Otras posibles causas para evitar la utilización de los sensores de orificio es que dentro del proceso no exista la suficiente presión para crear una caída de presión, como en el caso de flujo por gravedad y el flujo de fluidos corrosivos, con sólidos en suspensión que por su tamaño puedan bloquear el orificio.

Tubo Ventura. Este tipo de medidor se utiliza cuando es importante limitar la caída de presión y cuando se requiere de mediciones de caudal superiores a los rangos de trabajo de la placa orificio. Su estructura consiste en un estrechamiento gradual cónico y una descarga con salida suave como se aprecia en la Figura 3.2, ofreciendo una gran precisión en sus mediciones y el paso de fluidos con sólidos en suspensión. Se utiliza para tasas de “turn down” altas, es decir, la relación entre el máximo y el mínimo caudal mayores a 3:1, como por ejemplo en los procesos con líneas de vapor.

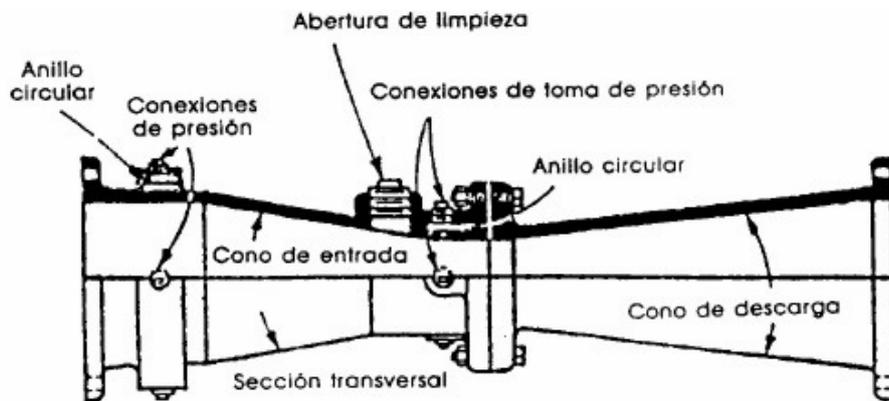


Figura 3.2. Sensor basado en la caída de presión. Tubo Venturi

El alto coste del tubo Venturi restringe su utilización, además este tipo de dispositivo se utiliza cuando se indican considerables pérdidas de carga de los elementos, lo que en el circuito de reciclaje de agua no es considerable debido a que las tinas de acumulación funcionan con la suficiente presión brindada por la bomba de accionamiento mecánico y el proceso de sedimentación del material de perforación utiliza la caída libre del agua por la tubería.

Tubo Pitot. Es un dispositivo simple que determina la velocidad de un fluido en un punto específico. Consiste en un tubo de pequeño diámetro que se opone al flujo, con lo que la velocidad en su extremo mojado es nula. Midiendo la altura de la columna de líquido, se obtiene la presión total del punto; mientras que si se mide la presión estática con otro tubo, se puede calcular la velocidad como función de la diferencia de presiones, como se observa en la Figura 3.3.

En una tubería cerrada, este medidor sensa la presión estática mediante un manómetro y la presión total o de estancamiento mediante un mecanismo Pitot, de esta forma se obtiene las dos medidas a la vez que se relacionan mediante la siguiente ecuación:

$$v^2 = \frac{(p_1 - p)}{\rho} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde: v representa la velocidad de flujo

p_1 representa la presión total en el punto

p representa la presión estática en el punto

ρ representa la densidad del fluido

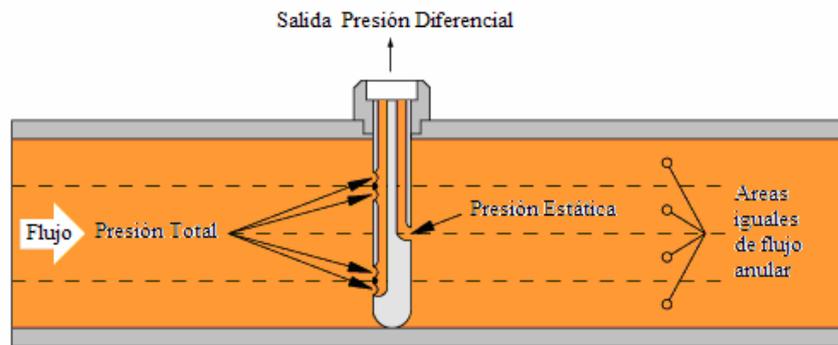


Figura 3.3. Sensor basado en la caída de presión. Tubo Pitot

Las ventajas de este medidor son la escasa caída de presión y bajo precio, siendo por ello una buena elección para tuberías de diámetros considerables, como las que se ocupan para la interconexión de las tinas de tratamiento de aguas de perforación, que comprenden tuberías de poli cloruro de vinilo de tres y dos pulgadas de diámetro.

Existe una variación del tubo de Pitot que se la conoce con el nombre de tubo de Annubar, que dispone de varias tomas, a lo largo de la sección transversal, con lo que se mide la presión total en varios puntos, obteniendo la media de estos valores y evitando el error que produce el tubo de Pitot. Estos instrumentos son sensibles a la variación de las velocidades distribuidas a lo largo de la tubería, es por esto, que su empleo está dirigido principalmente a líquidos con flujo laminar y en una sección continua recta de la tubería.

3.2.1.2.2 Sensores basados en la velocidad de flujo

Turbina. En este tipo de instrumento, el fluido entra en el medidor y hace girar un rotor a una velocidad que es proporcional a la del fluido, y por tanto al caudal instantáneo. La velocidad de giro del rotor se mide por conexión mecánica, un sensor registra el número de vueltas, o por pulsos electrónicos generados por cada giro, como se representa en la Figura 3.4. Cada uno de los elementos o vanos de la turbina tiene incorporado un dispositivo magnético, de tal forma que cuando circula el fluido y produce el movimiento de la turbina, este es captado magnéticamente por una bobina generando un pulso eléctrico. Esta señal eléctrica emite pulsos a una frecuencia proporcional a la razón de flujo volumétrico, estándar a la instrumentación electrónica con una señal de 4 a 20 mA. Dependiendo del sensor y transmisor del medidor, se generan medidas del flujo en determinados períodos de tiempo o una medida del flujo totalizado.

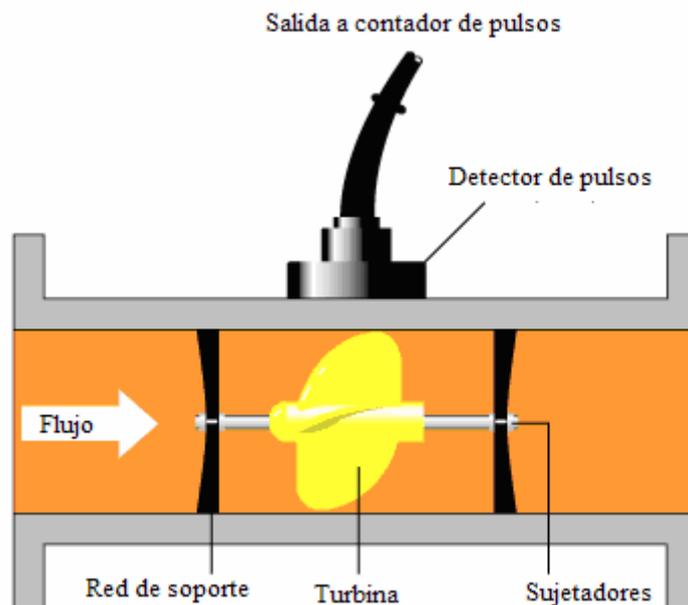


Figura 3.4. Sensor basado en la velocidad de flujo. Turbina

Este tipo de instrumento tiene uno de los más altos índices de precisión, con una escala totalmente lineal y una relación de flujo máximo respecto de flujo mínimo de 15:1. Por contraparte es un instrumento más propenso al daño, causado por el flujo de líquido con partículas que originan el desgaste de su mecanismo o por el encuentro de agua a alta

velocidad que produce sobre flujo y daño en la turbina. Además es importante notar, que la turbina tiene limitaciones con respecto a la viscosidad, considerando que este tipo de fluidos se desplazan con mayor lentitud en las paredes de la tubería y por tanto las palas de la turbina no giran a la velocidad que se desea censar.

Medidor electromagnético. Este instrumento se basa en la Ley de inducción electromagnética de Faraday que dice que el voltaje inducido en un conductor que se mueve en un campo magnético, es proporcional a la velocidad del conductor, dimensión del conductor, y fuerza del campo magnético. Para este caso, el fluido se desplaza en el seno del campo magnético creado por dos bobinas externas, en dos electrodos dispuestos a noventa grados respecto al flujo y al campo, donde se recoge una pequeña tensión eléctrica de 1mV correspondiente a 1m/s. La proporcionalidad entre la tensión de salida y el caudal sólo es cierta si el perfil de velocidades es simétrico respecto al eje longitudinal y el campo magnético es uniforme. La dependencia de la salida respecto al perfil de velocidades varía según el tamaño de los electrodos. En principio, cuantos mayores sean mejor; pero para evitar su deterioro, deben cubrirse con un aislante de tal forma que se acoplen capacitivamente, lo que implica un aumento de la impedancia de salida.

El medidor consta de dos partes, la primera el tubo de caudal, que comprende el propio tubo de material no magnético recubierto de material no conductor, para no cortocircuitar el voltaje inducido, las bobinas generadoras del campo magnético y los electrodos detectores del voltaje inducido en el fluido; y la segunda parte que es el transmisor, que alimenta eléctricamente con corriente alterna o continua a las bobinas, elimina el ruido del voltaje inducido y convierte la señal a la adecuada para los equipos de indicación y control (mA, frecuencia, digitales), como se ilustra en la Figura 3.5.

El campo magnético impuesto, del orden de teslas, como se indicó puede ser continuo o alterno. En este segundo caso se evitan los efectos electroquímicos en los electrodos y termoeléctricos en las soldaduras de los cables eléctricos de conexión. Si se considera una alimentación senoidal, el propio campo magnético variable induce tensiones parásitas en cualquier bucle conductor, una alternativa es alimentar el electroimán con una tensión cuadrada y medir la tensión inducida sólo durante el tiempo que el campo es

constante. La tendencia actual para el diseño de estos instrumentos es emplear un campo magnético pulsado, con una frecuencia submúltiplo de la red eléctrica.

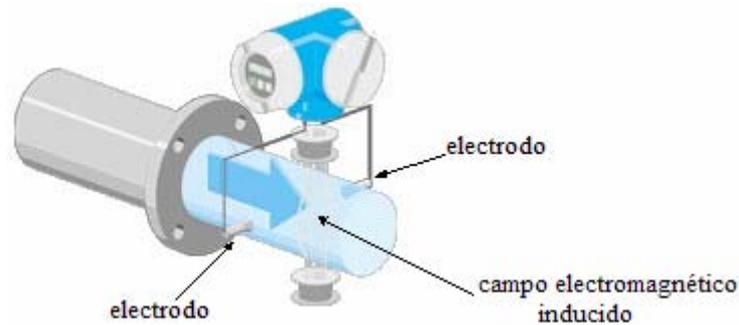


Figura 3.5. Sensor basado en la velocidad de flujo. Medidor electromagnético

Debido a que este medidor no restringe el flujo, es un instrumento con caída de presión nula que se puede utilizar tanto para flujo laminar como para flujo turbulento, para mediciones de flujo por gravedad e inclusive para flujos con variaciones rápidas. Es importante notar que este medidor es utilizado en fluidos conductores, con conductividades mayores a $5 \mu\text{S/m}$, lo que brinda alta precisión y la ausencia de obstrucciones al flujo lo hace idóneo para mediciones en aguas residuales o de tratamiento con sólidos en suspensión. Por último, es importante considerar que este medidor requiere de constante mantenimiento en los recubrimientos de los electrodos, que en el peor de los casos representaría otra resistencia eléctrica, lo que resultaría en lecturas erróneas de las mediciones obtenidas.

Medidor Vortex. La detección de la presencia de oscilaciones en el flujo de un fluido permite obtener una señal de frecuencia variable, que depende directamente de la velocidad del fluido. El método de las oscilaciones forzadas en los líquidos, consiste en introducir dentro del conducto un objeto no aerodinámico de cuerpo romo que provoca un fenómeno de la mecánica de los fluidos conocido como torbellino o vórtice de Karman, como se observa en la Figura 3.6.

Estos vórtices son áreas de movimiento circular con alta velocidad local, que se desprenden de la capa de flujo en contacto con el objeto. Se detectan normalmente

mediante ultrasonidos, a partir de las fluctuaciones de la temperatura o de la fuerza de arrastre sobre el objeto sumergido o mediante los cambios de presión causados por los torbellinos, donde el sensor detecta pulsos y los convierte en señales eléctricas.

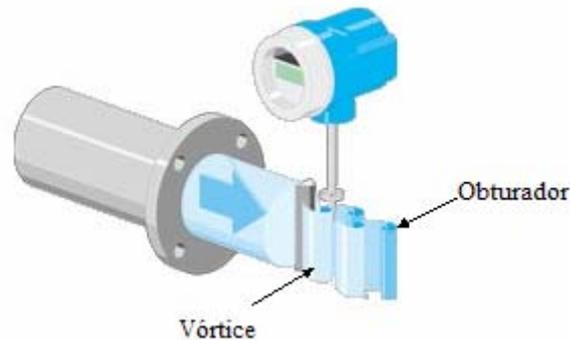


Figura 3.6. Sensor basado en la velocidad de flujo. Medidor Vortex

El rango de exactitud de este método, que se encuentra en un índice de 0.5%, junto su independencia de la viscosidad, densidad, presión y temperatura del fluido lo hacen conveniente para la medición del flujo en los procesos, sin embargo en este instrumento mientras mayor sea el diámetro de la tubería, menor es la frecuencia de salida del sensor, lo que repercute en las mediciones, siendo el límite de diámetro del orden de 350mm. Por otra parte, este instrumento eleva la pérdida de carga del fluido y es inadecuado para fluidos sucios, abrasivos o corrosivos.

Medidor ultrasónico. Los ultrasonidos son una radiación mecánica de frecuencia superior a las audibles. Toda radiación, al incidir sobre un objeto, en parte se refleja, en parte se transmite y en parte es absorbida. Si además, hay un movimiento relativo entre la fuente de radiación y el refractor, se produce un cambio en la frecuencia de radiación, conocido como el efecto Doppler, principio de funcionamiento de los sensores de ultrasonidos. Este tipo de instrumento mide el flujo volumétrico causado por la diferencia de frecuencias al propagarse en el fluido, una onda es emitida y posteriormente es reflejada, el instrumento censa la velocidad con la que se ha producido la variación y mide el caudal del fluido en la tubería, como se ilustra en la Figura 3.7.

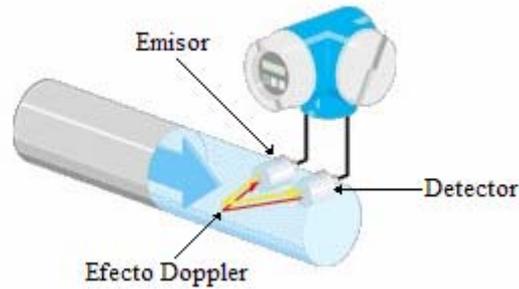


Figura 3.7. Sensor basado en la velocidad de flujo. Medidor ultrasónico

Este tipo de medidores tienen una relación de medida 20:1 con una escala lineal, adecuado para líquidos con sólidos en suspensión, con la gran ventaja de que pueden ser usados en cualquier tipo de fluidos contaminados o corrosivos, debido a que su instalación se la realiza exterior a la tubería. La desventaja de este medidor son las limitaciones por la necesidad de presencia de partículas para la propagación de las ondas. Una solución brindada por la ingeniería es mejorar los reflectores, que pueden actuar en todas las sustancias que tengan una impedancia acústica diferente a la del fluido. Para tener una medición efectiva, el tamaño de los reflectores debe ser superior a un 10% de la longitud de onda del sonido en el fluido. Las frecuencias empleadas son el orden de 1Mhz, implicando longitudes de onda de decenas de micras, por tanto, para frecuencias superiores, la atenuación de radiación en el medio sería demasiado excesiva.

Medidor térmico. Su funcionamiento se rige con en el principio de medición calométrico, que se basa en el efecto físico donde el flujo medio del líquido es proporcional a la variación de temperatura de la sonda del instrumento de medición. El medidor esta alimentado por una fuente eléctrica de precisión, que proporciona una temperatura constante al instrumento ubicado en el punto medio de la tubería por la que circula el fluido. Sondas basadas en el principio de variación de la resistencia para medir la temperatura (R_{M1} y R_{M2}), se encuentran en puntos equidistantes de la fuente de calor (R_H); así, cuando el fluido esta en reposo, la temperatura es idéntica en las dos sondas y, cuando el fluido circula, transporta una cantidad de calor hacia el segundo elemento, presentando una variación de temperatura que aumenta o disminuye dependiendo del flujo del líquido por la tubería, tal como se ilustra en la Figura 3.8.

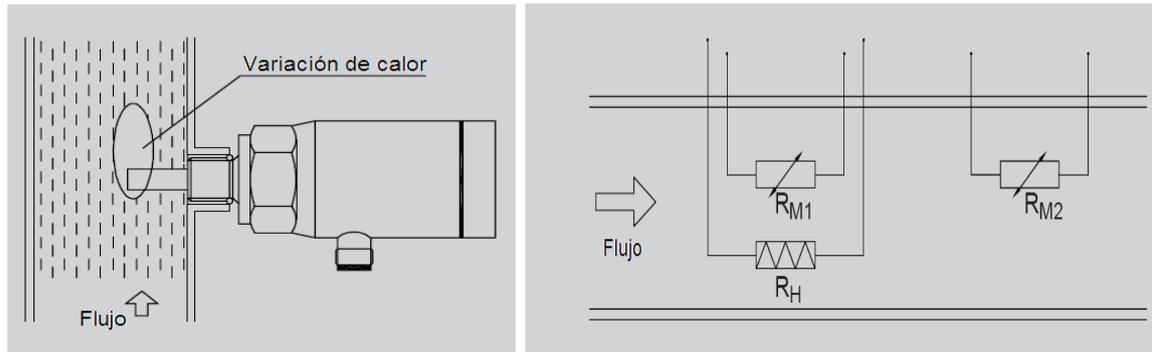


Figura 3.8. Principio de funcionamiento del medidor térmico

Este tipo de medidor es utilizado normalmente para caudales bajos y su rango de exactitud esta en el orden del 1%. La medición en esta transferencia de calor provee información del flujo del líquido que pasa por la tubería en términos de porcentaje.

3.2.1.3 Selección. La selección del sensor y transmisor de flujo debe basarse en las características estáticas y dinámicas que se adapten en el proceso, pero además se debe tomar en cuenta las variables que pueden alterar a la medición y cambiar el control del sistema.

Las variables que están presentes dentro del sistema de control y monitoreo de flujo del circuito de agua para perforación son el caudal, la viscosidad, la temperatura, la composición química y la presión, posibles variables que pueden afectar el comportamiento del instrumento de medición de flujo.

En lo que corresponde al caudal del fluido, esta relacionado directamente con la variable a controlar. El fluido que se utiliza para la perforación es agua, que se transporta desde las vertientes naturales del sector, mediante el uso de una bomba centrífuga de potencia 7 KW a 1500 rpm. El líquido se transporta mediante una tubería flexible ALFFLEX de una y media pulgada para una presión de hasta 72 psi, lo que manifiesta un caudal constante del líquido, con una temperatura que varía desde los 4 grados centígrados desde la vertiente de agua hasta los 28 grados centígrados, temperatura máxima alcanzada al pasar por la bomba centrífuga. Esta variable no altera el funcionamiento de la medición en el instrumento puesto que se mantiene dentro de un rango relativamente bajo de

temperatura. En lo que corresponde a la presión del fluido, es importante evitar la pérdida de carga causada por la obturación del instrumento que se vaya a utilizar, de esta forma garantizamos el correcto funcionamiento del proceso, con un flujo constante de agua hacia la tina de acumulación, pero además evitamos el deterioro de la bomba centrífuga que se produciría por una presión excesiva en su mecanismo, causado por un medidor cuyo principio de funcionamiento este orientado a la obstrucción del líquido. La composición química del fluido corresponde a todos los aditivos que se utilizan para la perforación, como los floculantes, polímeros y grasas biodegradables que podrían afectar el mecanismo del sensor, entonces es importante seleccionar un medidor que permita trabajar con fluidos corrosivos y al mismo tiempo considerar que para la medición del flujo de líquido de tratamiento que ha salido de la perforación, se debe incluir además de los aditivos, los sólidos en suspensión presentes.

Todos los fluidos dentro de los procesos tienen una resistencia interna al flujo, que se describe como viscosidad. Se puede considerar que la viscosidad es una fricción entre las moléculas de un fluido, y en caso de ser transportado en una tubería es también considerado como la resistencia sobre las paredes de dicho transporte. En los líquidos es ocasionada por las fuerzas cohesivas de corto enlace; el arrastre viscoso de líquidos depende de la velocidad y es directamente proporcional a esta, pero varía dependiendo de las condiciones del proceso. La fricción interna causa que las capas de un fluido se muevan unas con respecto a otras en respuesta a una tensión cortante. Este movimiento en capas, o flujo laminar, es característico del flujo uniforme a velocidades bajas en los líquidos viscosos, como es el caso del flujo del líquido que se produce en las tinas de tratamiento y en el desplazamiento del fluido de una tina a otra a través de la tubería.

Como se indicó anteriormente en la definición y características de las mediciones de flujo, a velocidades mayores, el flujo tiende a convertirse en rotacional o turbulento, es por esta razón, que para la selección del instrumento de medición, se debe considerar el cálculo y análisis del tipo de flujo del proceso. La viscosidad se caracteriza por un coeficiente que determina a cada tipo de fluido y viene dado por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{F \cdot h}{A \cdot v} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Donde: F/A representa la tensión cortante necesaria para mantener el flujo entre dos planos paralelos

h representa la distancia entre los dos planos

v representa la velocidad relativa del flujo

Las unidades SI para la viscosidad son los *pascales-segundos* [Pa-s] y las unidades combinadas se la denominan *poseuille* [PI], mientras que en las unidades cgs es el *poise* [P], utilizando la magnitud más conveniente para los fluidos, el *centipoise* [cP].

Las mediciones que se han obtenido en el proceso de perforación, indican la utilización de agua con un caudal promedio de $2.3 \text{ m}^3/\text{h}$, que fluctúan en valores mínimos de acuerdo a las condiciones del proceso. Considerando que el transporte del fluido se lo realiza mediante tubería flexible de diámetro igual 1.5 pulgadas se obtiene que:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi \cdot r^2}$$

$$r = 0.75 \text{ pulg} \cdot \left| \frac{0.0254 \text{ m}}{1 \text{ pulg}} \right| = 0.0191 \text{ m} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

$$v = \frac{2.3 \text{ m}^3 / \text{h}}{\pi \cdot (0.0191 \text{ m})^2} = 2006.8 \text{ m} / \text{h} \approx 0.5575 \text{ m} / \text{s}$$

Por tanto, la velocidad promedio de flujo del líquido es de 0.5575 m/s . Cuando la velocidad de flujo de un fluido excede cierto valor, el flujo deja de ser laminar y se convierte en turbulento. El análisis del flujo turbulento es una tarea compleja, pero existe un valor determinado experimentalmente que nos indica el umbral de la turbulencia. Este valor se expresa en términos de una cifra adimensional que se denomina número de Reynolds y su ecuación es la siguiente:

$$R_n = \frac{\rho v d}{\eta} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Donde: ρ representa la densidad del fluido

v representa la velocidad promedio del flujo

d representa el diámetro del tubo conductor

η representa la viscosidad del fluido

Considerando que la tubería es de paredes lisas, el flujo es laminar si el número de Reynolds es inferior a 2000. La turbulencia se establece cuando este número está alrededor de 2000 o es superior, tomando en cuenta que es posible que haya un flujo laminar con un número mayor a 2000, pero que será bastante inestable y que cualquier trastorno ligero ocasionaría que se convierta en turbulento. Aplicando este concepto al proceso se obtiene:

$$R_n = \frac{\rho v d}{\eta}$$

$$R_n = \frac{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0.5575 \text{ m/s} \cdot 0.0381 \text{ m}}{0.001 \text{ PI}} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

$$R_n = 21240.75$$

Por razón de simplificación de unidades, los cálculos se los realiza con unidades y derivados del sistema internacional, tomando en cuenta que la densidad de agua dulce a una temperatura de 20 grados centígrados es de 1000 kg/m^3 y la viscosidad del agua a 20 grados es de 0.001 PI . Este resultado obtenido, indica claramente que el flujo del proceso es turbulento, para lo cual se debe elegir un instrumento que pueda actuar con este flujo, de tal forma que se alcancen mediciones con la mayor precisión posible.

A continuación se presenta en la Tabla 3.2, los sensores de flujo revisados, con sus parámetros y características de funcionamiento.

Tabla 3.2. Comparación de los parámetros y características de los sensores de flujo

Elemento primario	Tipo de fluido	Pérdida de presión	Ajuste en rango del flujo	Precisión	Efecto de viscosidad	Costo	Tipo de Lectura
Orificio concéntrico	Líquido	50 – 90 %	3:1	±0.75%	Alto	Bajo	Raíz cuadrada
Orificio excéntrico	Líquido con gas	60 – 100 %	3:1	±2.5%	Alto	Bajo	Raíz cuadrada
Orificio de segmento	Líquido con sólidos en sus.	60 – 100 %	3:1	±2%	Alto	Bajo	Raíz cuadrada
Tubo Venturi	Líquido	10 – 20%	3:1	±1%	Muy alto	Muy alto	Raíz cuadrada
Tubo Pitot	Líquido	Ninguna	3:1	±1%	Bajo	Bajo	Raíz cuadrada
Medidor de Turbina	Líquidos puros	0 – 7 psi	14:1	±0.5%	Alto	Alto	Lineal
Medidor magnético de flujo	Líquido con sólidos	Ninguna	30:1	±1%	Ninguno	Alto	Lineal
Medidor de vértice	Líquidos y gases	0 – 5 WF	30:1 o 100:1	±0.5%	Mínimo Nro. de Reynolds 10,000	Alto	Lineal
Medidor Ultrasónico	Líquidos	Ninguna	-	-	Ninguno	Alto	Lineal
Medidor térmico	Líquidos y gases	5 - 10%	ajustable	±1%	Bajo	Alto	Lineal

Para el caso específico del diseño de la maqueta, que representa un modelo del circuito de reciclaje de agua, se utiliza un sensor de flujo térmico ajustado a la tubería de media pulgada que conecta al sistema. Este sensor cumple con el dimensionamiento propuesto para mediciones cuya velocidad de flujo varía entre 0 a 150 cm/s en agua, con una temperatura permisible de trabajo entre 0 a 70°C y para una presión máxima de 200 bares. Las consideraciones restantes de funcionamiento y datos específicos están definidas en las hojas técnicas correspondientes a la descripción del sensor de flujo RECHNER SW-600-1/2/ 28-IL.

3.2.2 Sensores e Interruptores de Nivel

Los sensores de nivel permiten conocer la altura de un líquido con respecto a una base referencial hasta la superficie o un límite determinado, es aplicado tanto en grandes cantidades de agua tales como ríos, lagos, mares, así como para menores cantidades de líquido como tanques, pozos, etc. Por otra parte, los interruptores de nivel son un sistema sencillo y seguro para controlar el nivel de líquidos, agua potable y en diversidad de aplicaciones generales tanto para llenado, como el vaciado de depósitos dentro de los procesos. Estos instrumentos basan su funcionamiento en principios mecánicos, que con la intervención de la instrumentación electrónica se añade mayor eficiencia en la medición del nivel, obteniendo lecturas precisas y por ende el mejoramiento de la calidad del proceso.

Los sensores e interruptores de nivel, en conjunto con los transmisores, operan ya sea directamente censando la altura del líquido sobre una referencia, midiendo la presión diferencial del líquido en el tanque, utilizando un flotador que indique la presencia del líquido contenido en el depósito del proceso, midiendo el nivel por burbujeo, por mediciones basadas en ultrasonidos y radioactividad o por las características eléctricas de los fluidos. Todos estos métodos serán analizados, de tal forma que se seleccione el más adecuado para el proceso y que cumpla con las características que se desean alcanzar en el sistema de control y monitoreo

3.2.2.1 Características y definiciones. El nivel es una variable muy importante en los procesos, ya que está vinculada a la operación del equipo, a la integración y al inventario del proceso. No existe un instrumento o medidor universal que sea aplicable a todos o la

mayoría de los casos, cada situación debe ser cuidadosamente analizada, ya que existe un sin número de condiciones a tener en cuenta como el tipo de fluido, agresividad física o química, existencia de espuma, comportamiento en el depósito, entre otros.

Durante los últimos años, la evolución tecnológica en el sector electrónico y las comunicaciones, ha propiciado la aparición de nuevos sistemas de medición de nivel para el control y gestión de inventarios en el sector industrial. Los beneficios básicos que proporciona la instalación de un sistema de medición de nivel preciso y fiable son los siguientes:

- **Mejoramiento en la calidad del producto.** La utilización de nuevas tecnologías, combinadas con los avances en el sector electrónico, proporciona medidas de mayor fiabilidad y precisión, dando lugar a mejoras en la calidad del producto.
- **Reducción en los costes de operación y mantenimiento.** El uso de nuevas tecnologías de comunicación digital facilita las tareas de configuración, detección de problemas y posibilidades de autodiagnóstico, reduciendo notablemente los costes de operación y mantenimiento.
- **Cumplimiento de Normativas medioambientales y de calidad.** La mejora en las técnicas de fabricación y la sensibilización con las normativas medioambientales y de calidad de los suministradores de instrumentación y del sector industrial en general, facilitan al usuario el cumplimiento de normativas reguladoras (ISO, FDA, OSHA)

3.2.2.2 Funcionamiento

3.2.2.2.1 Instrumentos de medición directa

Instrumentos de Flotador. La medición de nivel con instrumentos de flotador es menos común en la industria en general, pero se emplea muy frecuentemente en el campo del tratamiento de aguas potables y de desechos. Hay que señalar que en estos instrumentos, el flotador puede tener formas muy variadas y estar formado por diversos materiales según sea el tipo de fluido, como se ilustra en la Figura 3.9. Básicamente, consisten en un flotador situado en el seno del líquido y conectado al exterior de un tanque indicando directamente el nivel, donde dicha conexión puede ser directa, magnética o hidráulica.

Flotador de Conexión Directa. Este modelo de flotador es generalmente, una pieza metálica hueca de forma circular, con alambres de guía que van de la parte superior a la inferior del tanque, para limitar su movimiento. Constituye el método más utilizado en tanques de almacenamiento de gran capacidad. Por otro lado, este tipo de instrumento tiene el inconveniente de que las partes móviles están expuestas al fluido y pueden romperse. Además, el tanque no puede estar sometido a presión y es esencial que el flotador se mantenga limpio para mantener la precisión en la medida.

Flotador acoplado magnéticamente. Se ha desarrollado una gran variedad de medidores de nivel activados con flotador, que transmiten el movimiento de éste por medio de un acoplamiento magnético. Este instrumento de medición de nivel consta de un flotador que se desliza exteriormente a lo largo de un tubo de guía sellado, situado verticalmente en el interior del tanque. Dentro del tubo, una pieza magnética o imán, suspendida por medio de una cinta o cable, sigue al flotador en su movimiento y mediante el cable arrastra el índice de un instrumento situado en la parte superior del tanque. Este instrumento puede tener interruptores de alarma y varios transmisores incorporados. El flotador y el tubo de guía, que están en contacto con el fluido que se está midiendo, se producen en una gran variedad de materiales, tomando en cuenta condiciones de resistencia a la corrosión y para soportar altas presiones o vacío, así por ejemplo se construyen de acero y aleaciones, aluminio, poli cloruro de vinilo, polietileno, entre otros.

En tanques pequeños, el flotador puede adaptarse para actuar magnéticamente sobre un transmisor eléctrico, dispuesto en el exterior del tanque que capta la variable de proceso y la transmite a distancia permitiendo así un control de nivel. Los transmisores electrónicos consisten en su forma más sencilla, en una barra rígida apoyada en un punto sobre la cual actúan dos fuerzas en equilibrio, la fuerza ejercida por el elemento de medición y la fuerza electromagnética de una unidad magnética.

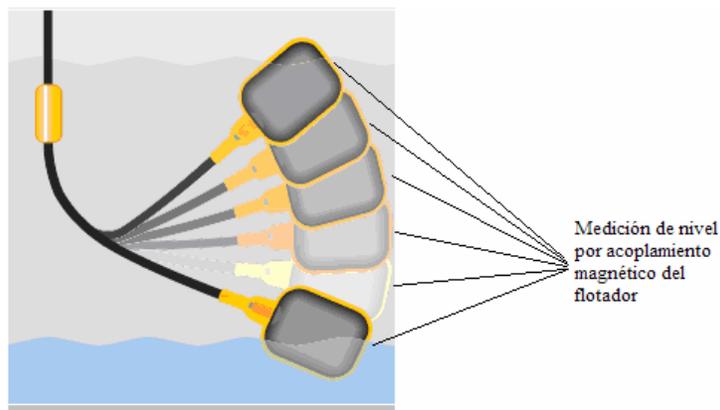


Figura 3.9. Instrumentos de medición directa de nivel. Flotador

3.2.2.2 Instrumentos basados en la presión hidrostática

Medidor de Presión Diferencial. El medidor de presión diferencial consiste en un diafragma en contacto con el líquido del tanque, que mide la presión hidrostática en un punto del fondo del tanque, como se aprecia en la Figura 3.10. En un tanque abierto, esta presión es proporcional a la altura del líquido en ese punto y a su peso específico.

$$P = H \cdot \gamma \cdot g \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Donde: P representa la presión

H representa la altura del líquido sobre el instrumento

γ representa la densidad del líquido

g representa la aceleración de la gravedad

El diafragma forma parte de un transmisor neumático, electrónico o digital de presión diferencial semejante a los transmisores de caudal de diafragma. En el tipo más utilizado, el diafragma está fijado en una brida que se monta rasante al tanque para permitir sin dificultades la medida de nivel de fluidos, tales como líquidos con sólidos en suspensión, pudiendo ser incluso de montaje saliente para que el diafragma nivele completamente con las paredes interiores del tanque, tal como ocurre en el caso de líquidos extremadamente viscosos en que no puede admitirse ningún recodo (ángulo).

Hay que señalar que el nivel cero del líquido se seleccionan en un eje a la altura del diafragma. Si el instrumento se calibra en el tanque, el 0 % del aparato debe comprobarse con el nivel más bajo en el borde inferior del diafragma, ya que entre el borde inferior y superior del diafragma la señal de salida no está en proporción directa al nivel. Algunos fluidos presentan el riesgo de depósito de cristales o de sólidos en la superficie del diafragma. En tal caso cabe la solución de emplear un diafragma recubierto de teflón para reducir el depósito gradual del producto. No obstante, como el movimiento del diafragma es muy pequeño y se considera el sólido algo flexible, continúa aplicándose la presión del líquido a todo el diafragma. Sin embargo, si parte del diafragma queda rígido, el instrumento marcará de forma errática o permanentemente menos nivel del real. Este inconveniente se resuelve empleando un transmisor de nivel de presión diferencial con membranas de sello que responde a la presión transmitida en lugar de la fuerza creada por el líquido sobre la membrana. Si el tanque es elevado y el medidor se sitúa a un nivel muy inferior, la columna de líquido que va desde el nivel mínimo al medidor es mucho mayor que la propia variación del nivel, por lo cual, la apreciación del mismo se hace sobre una parte muy pequeña de la escala. Para corregir este inconveniente se utiliza un muelle de elevación que, en forma similar al de supresión, está aplicado a la barra de equilibrio de fuerzas del transmisor y produce una fuerza que se ajusta igual a la de la columna de líquido citada. El medidor de presión diferencial puede emplearse también en la medida de interfases. La amplitud de la medida vendrá dada por la diferencia de presiones sobre el diafragma del elemento, primero con el tanque lleno de líquido más denso y después con el líquido menos denso.

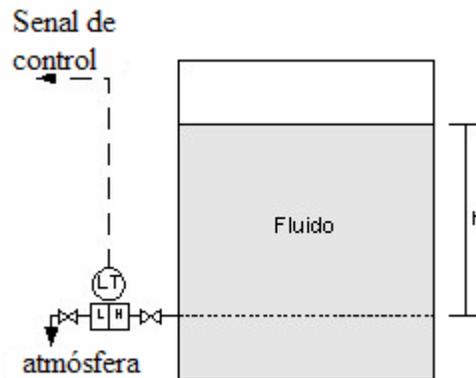


Figura 3.10. Instrumentos de medición basados en la presión hidrostática. Medidor de presión diferencial

La precisión de los instrumentos de presión diferencial es de $\pm 0.5\%$ en los neumáticos, $\pm 0.2\%$ a $\pm 0.3\%$ en los electrónicos, de $\pm 0.15\%$ en los inteligentes con señal de salida de 4-20 mA de corriente continua y de $\pm 0.1\%$ en los que se emplean en los tanques abiertos y cerrados a presión y a vacío. Una de sus principales ventajas es que no tienen partes móviles dentro del tanque, son de fácil limpieza, precisos y confiables, admiten temperaturas del fluido hasta 120°C y no son influidos por las fluctuaciones de presión.

Medidor Manométrico. El medidor manométrico consiste en un manómetro conectado directamente a la parte inferior del tanque, donde además pueden observarse varios accesorios como son una válvula de cierre para el mantenimiento del líquido, y un pote de decantación con una válvula de purga. El manómetro mide la presión debida a la altura que existe entre el nivel del tanque y el eje del instrumento.

Como las alturas son limitadas, el campo de medida es bastante pequeño, de modo que el manómetro utilizado tiene un elemento de medida del tipo fuelle, frecuentemente para la medición de presiones bajas. Este instrumento sólo sirve para fluidos limpios ya que si el líquido es corrosivo, coagula o bien tiene sólidos en suspensión, el fuelle puede destruirse o bien bloquearse perdiendo su elasticidad. Por otro parte, la medida está limitada a tanques abiertos y el nivel viene influido por las variaciones de densidad del líquido.

Una variante emplea un transductor de presión suspendido de la parte superior del tanque e inmerso en el líquido, transmitiendo la señal a través de un cable que acompaña al de suspensión.

Medidor de Tipo Burbujeo. Los sistemas de burbujeo (o de purga continua) realizan la medición de nivel determinando la presión requerida para que un flujo constante de aire venza la presión hidrostática de un líquido. Al salir el aire, lo hace a manera de burbujeo, de ahí el nombre del sistema. El medidor de tipo burbujeo es el más flexible y generalmente utilizado; este instrumento coloca un tubo sumergido en el líquido, a través del cual se hace burbujear aire mediante un rotámetro con regulador de caudal incorporado, que permite mantener un caudal de aire constante a través del líquido, independientemente del nivel, como se ilustra en la Figura 3.11. Si no existiera, habría una gran diferencia en los caudales de aire necesarios desde el nivel mínimo al máximo, produciéndose un gasto de aire indebido. La tubería empleada suele ser de $\frac{1}{2}$ pulgada con el extremo biselado para una fácil formación de las burbujas de aire. Un rotámetro es un medidor de caudal de área variable, en los cuales un flotador cambia su posición dentro de un tubo, proporcionalmente al flujo del fluido. Cuando las burbujas escapan del tubo, la presión del aire en el interior de la tubería, medido mediante un manómetro de fuelles, corresponde a la presión máxima ejercida por el líquido. Por lo tanto, si se mide la presión dentro del tubo, se obtiene la medición de nivel. De hecho, la ubicación o elevación del extremo del tubo de burbujas se convierte en el nivel de medición cero. Por ejemplo, si se sumerge un tubo de burbujas en un tanque a 3.66 metros de la superficie del agua, se indicará una profundidad de 3.66 metros.

Las velocidades de purga del tubo de burbujas son muy bajas. Mientras una burbuja escape periódicamente el sistema estará funcionando debidamente. Una velocidad común de purga es de 0.5 pies cúbicos de aire libre por hora. En tanques cerrados se emplean dos juegos rotámetro-regulador y con las señales de aire conectadas a un transmisor de presión diferencial. Como es lógico, la presión del aire de purga debe ser superior a la presión interna del tanque. Cabe destacar que no sólo se puede utilizar aire como fluido de purga, sino también otro tipo de gases e incluso líquido. De hecho, algunos sistemas de purga utilizan

nitrógeno que es uno de los que más se usan a presión. Un cilindro estándar de 110 pies cúbicos de nitrógeno para bombas de aceite comerciales puede proporcionar suficiente gas a presión para asegurar el funcionamiento del tubo de burbujas durante más de tres semanas.

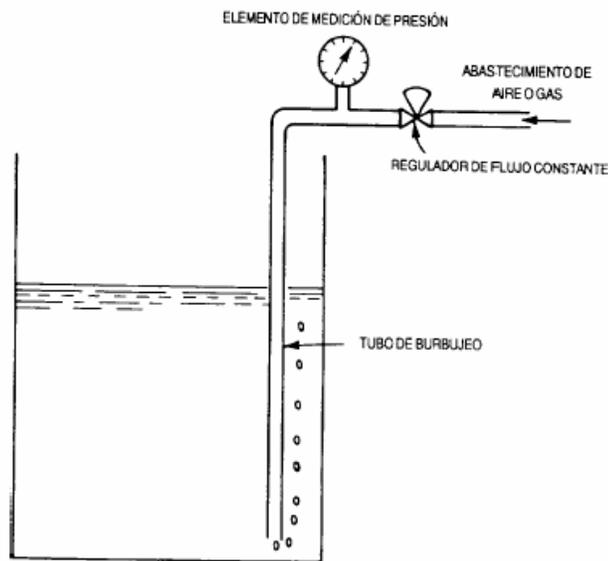


Figura 3.11. Instrumentos de medición basados en la presión hidrostática. Medidor Tipo Burbujeo

El tubo debe tener una longitud adecuada para evitar que las variaciones bruscas del nivel introduzcan en su interior una cierta columna de líquido que retarde el paso del aire y varíe momentáneamente la lectura. El método de burbujeo es simple y da buen resultado, en particular, en el caso de líquidos muy corrosivos o con sólidos en suspensión y en emulsiones. No es recomendable su empleo cuando el fluido de purga perjudica al líquido, tampoco para fluidos altamente viscosos donde las burbujas formadas del aire o del gas de purga presentan el riesgo de no separarse rápidamente del tubo. Desde el punto de vista de su mantenimiento, es muy útil situar un tubo tipo T con un tapón en la parte superior del elemento para su limpieza periódica.

3.2.2.2.3 Instrumentos basados en el desplazamiento

Medidor de nivel de tipo desplazamiento. Este tipo de medidor de nivel consiste en un flotador parcialmente sumergido en el líquido y conectado mediante un brazo a un tubo de torsión unido rígidamente al tanque. Dentro del tubo y unido a su extremo libre se encuentra una varilla que transmite el movimiento de giro a un transmisor exterior al tanque. El tubo de torsión se caracteriza fundamentalmente porque el ángulo de rotación de su extremo libre es directamente proporcional a la fuerza aplicada, es decir, al momento ejercido por el flotador. El movimiento angular del extremo libre del tubo de torsión es muy pequeño, del orden de los 9° . El tubo proporciona además un cierre hermético entre el flotador y el exterior del tanque donde se dispone el instrumento receptor de la señal transmitida.

Según el principio de Arquímedes, el flotador sufre un empuje hacia arriba que viene dado por la fórmula:

$$F = S H \gamma g \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Donde: F representa el empuje del líquido

S representa la sección del flotador

H representa la altura sumergida del flotador

γ representa la densidad del líquido

g representa la aceleración de la gravedad.

Las dimensiones relativas del flotador, es decir, longitud y diámetro, dependerán de la amplitud de medida seleccionada. El instrumento sirve también para medir la densidad del líquido y, en este caso, el flotador debe estar totalmente sumergido. Por otro lado, el cuerpo del medidor puede estar montado directamente en el tanque (montaje interno) o en un tubo vertical al lado del tanque (montaje exterior). El movimiento del brazo de torsión puede transmitirse por medio de un eslabón a un transmisor neumático o electrónico de equilibrio de fuerzas, permitiendo en la conexión una compensación mecánica o digital para el peso específico del líquido, como se ilustra en la Figura 3.12.

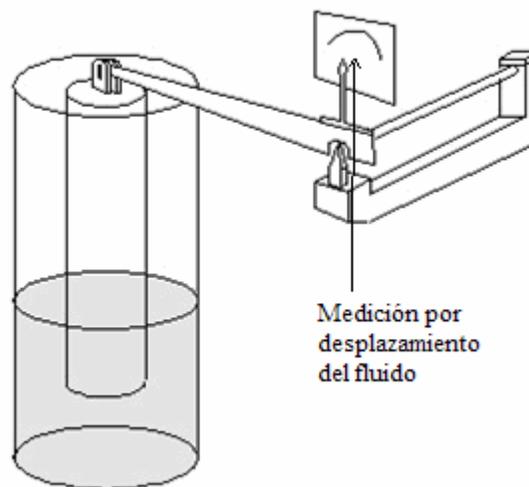


Figura 3.12. Instrumentos de medición basados en el desplazamiento del fluido

La precisión es del orden de $\pm 0.5\%$ a $\pm 1\%$ y puede utilizarse en tanques abiertos y cerrados a presión o a vacío, pero presenta el inconveniente del riesgo de depósito de sólidos o de crecimiento de cristales en el flotador que afectan a la precisión de la medida y es apto sólo para la medida de pequeñas diferencias de nivel, aproximadamente 2000 milímetros máximo.

3.2.2.2.4 Instrumentos basados en características eléctricas del líquido

Medidor de nivel conductivo. Consta de una sonda con dos electrodos, cuando estos entran en contacto con el líquido conductor se cierra un circuito eléctrico, que a través de la unidad amplificadora conmuta un contacto, como se observa en la Figura 3.13. La conductividad del fluido debe ser la suficiente como para excitar el circuito electrónico, y de este modo el aparato puede discriminar la separación entre el líquido y su vapor. La impedancia o resistencia mínima aparente del circuito es del orden de los 20 M Ω /cm, y la tensión de alimentación es alterna para evitar fenómenos de oxidación en las sondas por causa del fenómeno de la electrólisis. Cuando el líquido moja los electrodos se cierra el circuito electrónico y circula una corriente segura del orden de los 2mA. 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 levemente separados enclavados eléctricamente en el circuito.

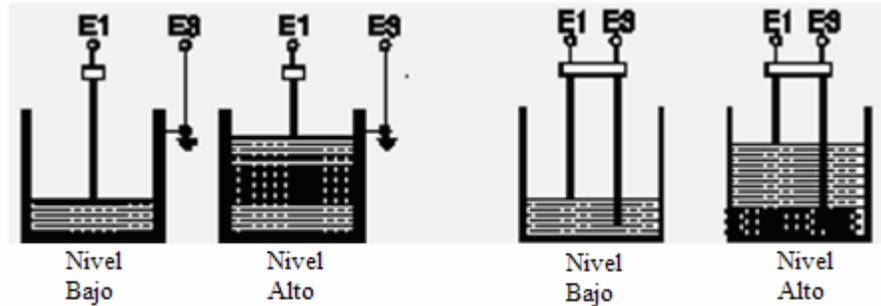


Figura 3.13. Instrumentos basados en las características eléctricas. Medidor de nivel conductivo

El instrumento se emplea como alarma o control de nivel alto y bajo, utiliza relés eléctricos para líquidos con buena conductividad, y relés con circuitos electrónicos para líquidos con baja conductividad. El instrumento es versátil, sin partes móviles, su campo de medida es grande con la limitación física de la longitud de los electrodos. El líquido contenido en el tanque debe tener un mínimo de conductividad y si su naturaleza lo exige, la corriente debe ser baja para evitar la deterioración del producto. Por otro lado, conviene que la sensibilidad del aparato sea ajustable para detectar la presencia de componentes químicos que generen espuma en caso que sea necesario.

Medidor de Capacidad. El principio de funcionamiento de este instrumento se basa en medir la variación de capacitancia de un condensador cuando va variando el medio dieléctrico entre sus placas. Con el depósito metálico e introduciendo una sonda metálica sin contacto entre ambos, se forma un condensador como se ilustra en la Figura 3.14. Al variar el nivel de líquido varía proporcionalmente la capacidad. Si el depósito no es metálico se introducen dos sondas. El circuito electrónico, alimenta el electrodo a una frecuencia elevada, lo cual disminuye la reactancia capacitiva del conjunto y permite aliviar en parte el inconveniente del posible recubrimiento del electrodo por el producto.

El sistema es sencillo y apto para muchas clases de líquidos, sin embargo, hay que señalar que en los fluidos conductores, los líquidos se encuentran en suspensión o emulsión y las burbujas de aire o de vapor existentes, aumentan y disminuyen respectivamente la constante dieléctrica del fluido dando lugar a un error máximo de 3% por cada tanto por ciento de desplazamiento volumétrico. Por otro lado, al bajar el nivel, la porción aislante del electrodo puede quedar recubierta de líquido y la capacidad adicional que ello representa da lugar a un error considerable.

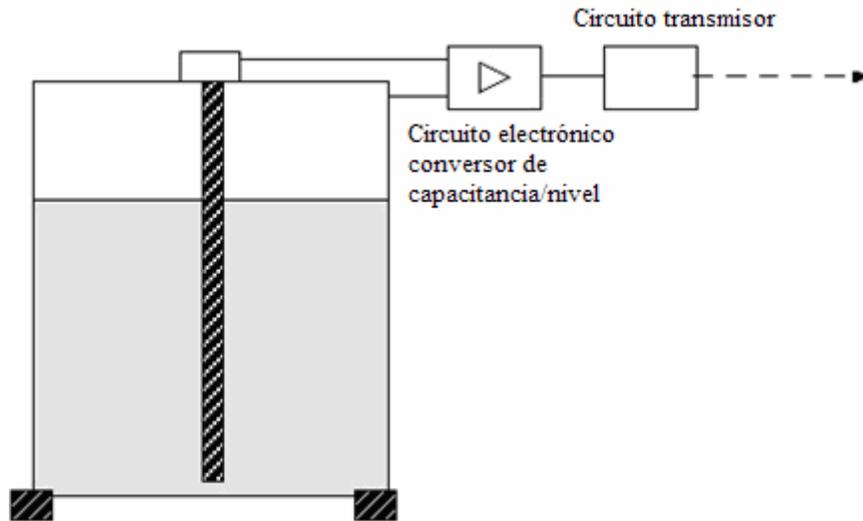


Figura 3.14. Instrumentos basados en las características eléctricas. Medidor de capacidad

La precisión de los transductores de capacidad es de $\pm 1\%$, se usa como interruptores de nivel en recipientes de líquidos conductores que no sean ni muy viscosos ni corrosivos, aunque también se usa para medidas continuas. Se caracterizan por no tener partes móviles, son ligeros, presentan una buena resistencia a la corrosión y son de fácil limpieza. Su campo de medida es prácticamente ilimitado y pueden emplearse en la medida de nivel de interfases. Tienen el inconveniente de que la temperatura puede afectar las constantes dieléctricas (0.1% de aumento de la constante dieléctrica / $^{\circ}\text{C}$) y de que los posibles contaminantes contenidos en el líquido pueden adherirse al electrodo variando su capacidad y finalmente variando la lectura, en particular en el caso de los líquidos conductores. El funcionamiento del sistema a una frecuencia elevada, o bien la incorporación de un circuito detector de fase, compensan en parte este inconveniente.

Sistema Ultrasónico de Medición de Nivel. Constan de un medidor de ondas sonoras de alta frecuencia de entre 20 y 40 KHz, que se propaga por la fase gas hasta que choca con el líquido o sólido, se refleja y alcanza el receptor situado en el mismo punto que el emisor, como se aprecia en la Figura 3.15. El tiempo entre la emisión de la onda y la recepción del eco es inversamente proporcional al nivel. El tiempo depende de la temperatura, por lo que hay que compensar las medidas. Hay que evitar que existan obstáculos en el recorrido de las ondas, aunque algunos medidores compensan los ecos fijos debidos al perfil del depósito.

En las aplicaciones de medición de nivel, los sensores vibran a una frecuencia de resonancia determinada, que se amortigua cuando el líquido los moja. En el segundo caso de indicación continua de nivel, la fuente ultrasónica genera impulsos que son detectados por el receptor una vez transcurrido el tiempo correspondiente de ida y vuelta de la onda a la superficie del sólido o del líquido. El sensor emisor dispone de un oscilador excitador para enviar un impulso ultrasónico a la superficie del fluido y el sensor receptor recibe esta señal reflejada enviando una señal en función del tiempo transcurrido, y por lo tanto del nivel, a un transmisor. En otras palabras, el nivel se mide en función del tiempo necesario para que la señal se desplace del transmisor a la superficie del líquido y retorne al receptor.

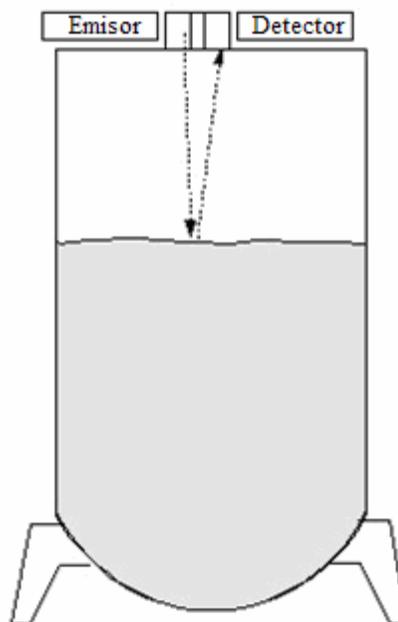


Figura 3.15. Instrumentos basados en las características eléctricas. Sistema ultrasónico

La precisión de estos instrumentos es de ± 1 a 3 %. Son adecuados para todos los tipos de tanques y de líquidos o fangos, pudiendo construirse a prueba de explosión. Presentan el inconveniente de ser sensibles a la densidad de los fluidos y de dar señales erróneas cuando la superficie del nivel del líquido no es nítida, como es el caso de un fluido que forme espuma o que contengan gran cantidad de sólidos suspendidos, ya que se producen falsos ecos de los ultrasonidos. La utilización de un ordenador o un sensor inteligente que permita establecer parámetros de la medición, consigue almacenar el perfil ultrasónico del nivel y así tener en cuenta las características particulares de la superficie del líquido, con lo cual se mejora la precisión de la medida.

Sistema de medición por rayos gamma o medidor radiactivo: Este sistema de medición, consiste en un emisor de rayos gamma montado verticalmente en un lado del tanque y un contador Geiger, que transforma la radiación gamma recibida en una señal eléctrica de corriente continua, como se aprecia en la Figura 3.16. Como la transmisión de los rayos es inversamente proporcional a la masa del líquido en el tanque, la radiación captada por el receptor es inversamente proporcional al nivel del líquido ya que el material absorbe parte de la energía emitida. La fuente radiactiva pierde igualmente su radioactividad en función exponencial del tiempo. La vida media, es decir, el tiempo necesario para que el emisor pierda la mitad de su actividad, varía según la fuente empleada.

Las paredes del tanque absorben parte de la radiación y al detector llega sólo un pequeño porcentaje. Los detectores son, en general, tubos Geiger o detectores de cámara iónica y utilizan amplificadores de corriente continua o de corriente alterna. El instrumento dispone de compensación de temperatura, de linealización de la señal de salida y de reajuste de la pérdida de actividad de la fuente de radiación, siendo este último de extrema importancia para conservar la misma precisión de la puesta en marcha. Una de las desventajas en su aplicación figuran el blindaje de la fuente y el cumplimiento de las leyes sobre protección de radiación.

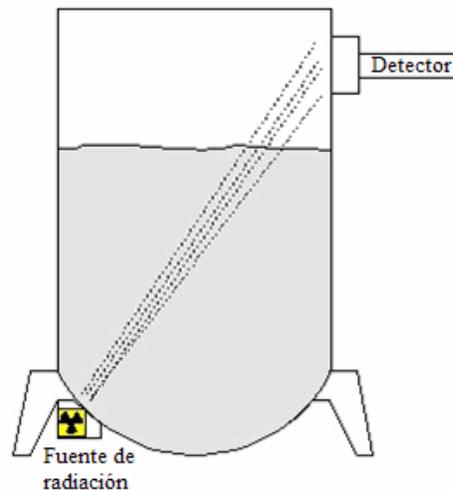


Figura 3.16. Instrumentos basados en las características eléctricas. Rayos gamma

La precisión en la medida es de ± 0.5 a ± 2 % y el instrumento puede emplearse para todo tipo de líquidos ya que no está en contacto con el proceso. Su lectura se encuentra influida por el aire o por los gases disueltos en el líquido. El sistema se emplea en caso de medida de nivel en tanques de acceso difícil o peligroso. Su ventaja se da cuando existen presiones elevadas en el interior del tanque que impiden el empleo de otros sistemas de medición. Sin embargo, el sistema es caro y la instalación no debe ofrecer peligro alguno de contaminación radiactiva siendo necesario señalar debidamente las áreas donde están instalados los instrumentos y realizar inspecciones periódicas de seguridad.

3.2.2.3 Selección. Además de las diferentes variables requeridas para la medición de nivel, tales como masa, volumen, densidad, temperatura, viscosidad, existen otra serie de parámetros que deben ser tenidos en cuenta para la selección del medidor adecuado, como se indican a continuación. En la Tabla 3.3 se presenta los parámetros y características de los instrumentos de medición de nivel analizados. Las variaciones en las condiciones de proceso así como las condiciones ambientales, han dado lugar a la aparición de múltiples tecnologías para la medición de nivel.

El éxito en la medición de nivel, en la mayoría de los casos reside en la elección de la tecnología más adecuada para la aplicación. Cada tecnología tiene características y prestaciones que deben ser tomadas en cuenta antes de realizar la selección. Los dos parámetros que tienen mayor influencia en la selección de la tecnología para la medición de nivel son la presión y temperatura, pero existen otros factores a tener en cuenta:

- Variable requerida en el proceso: El sistema de control y monitoreo de nivel, para el circuito de reciclaje de agua, esta comprendido en la optimización del líquido para el proceso de perforación, tanto en la medición de nivel de agua en la tina de acumulación, antes de entrar a la perforación, como también en la medición de nivel de la tina del agua reciclada, de tal manera que se garantice el control sobre los elementos actuadores del sistema.
- Precisión en la medida: La diversidad de instrumentos en el mercado, brindan una amplia gama de variación en los dispositivos de medición, con las cuales vamos a integrar a nuestro proceso. Específicamente, en lo correspondiente a la medición de nivel de las tinas del proceso de reciclaje de agua, debemos considerar que la precisión en la medida no es tan crítica, de tal manera que se puede considerar un instrumento cuyo porcentaje de precisión sea moderado pero que cumpla con el resto de características requeridas.
- Características del depósito: La primera fase del proceso de perforación esta conformada por la acumulación del líquido, para lo cual se utiliza dos tinas metálicas de 500 litros de capacidad cada una, colocada una sobre la otra. La primera tina acumula el agua que viene desde la vertiente, mientras que en la segunda tina se dosifica los floculantes que van a actuar en la perforación. Un bypass con una válvula de accionamiento manual esta instalada en la primera tina de tal manera que cuando se alcanza la capacidad de este depósito el excedente del líquido regresa hacia la vertiente causando el menor impacto posible a la zona de perforación. Para la segunda fase, que corresponde al tratamiento del líquido de la perforación, la tina utilizada para el reciclaje del agua tratada es de polietileno, su estructura es cónica, con una capacidad de 2210 litros.

- Condiciones ambientales y características de la variable en el sistema: El proceso se lo realiza a la intemperie, con una temperatura promedio de 20 grados centígrados. El líquido utilizado no sufre drásticos cambios de temperatura al ser transportado y pasar por las bombas centrífugas. El factor que se debe tomar en cuenta para la selección del instrumento de medición de nivel, es el cambio químico que sufre el agua al utilizar polímeros, floculantes y los sólidos en suspensión que pueden estar contenidos en el proceso.

Tabla 3.3. Comparación de los parámetros y características de los sensores de nivel

Instrumento	Campo de medida	Precisión	Presión max. [bar]	Temp max. del fluido [°C]	Precio	Observación
Flotador	0- 10 m	±1-2%	400	250	Bajo	Independiente de la naturaleza del líquido
Manométrico	Altura del tanque	±1%	1	60	Bajo	Utilización en fluidos limpios
Burbujeo	Altura del tanque	±1%	400	200	Bajo	Mantenimiento y contaminación del líquido
Presión Diferencial	0.3 m	±0.15 a 0.5%	150	200	Alto	Para interfase con líquidos
Desplazamiento	0 – 25 m	±0.5%	100	170	Bajo	Expuesto a corrosión
Conductivo	limitado	-	80	200	Bajo	Aplicación en líquidos conductores
Capacitivo	0.6 m	±1%	80 -250	200 - 400	Alto	Resistencia a la corrosión
Ultrasónico	0.3 m	±1%	400	200	Alto	Sensible a la densidad
Radiación	0- 2.5 m	±0.5%	-	170	Muy alto	Uso de fuente radiactiva

Para el caso del diseño en maqueta del circuito, se utiliza interruptores de nivel de montaje vertical adaptados para actuar sobre dos niveles en las distintas tinas del circuito. Estos interruptores trabajan hasta una temperatura máxima de 105°C, presión máxima de 10 Bares y en diferentes tipos de líquidos debido a que su material de construcción es Tereftalato de Polibutileno en el cuerpo del interruptor y una aleación de Buna-N con Epóxica en el flotador. Los parámetros de funcionamiento y datos específicos de este instrumento están descritos en las hojas técnicas correspondientes al interruptor de nivel WE Anderson F7- BT.

3.3 ELEMENTOS FINALES DE CONTROL

Los elementos finales de control son los dispositivos encargados de transformar una señal de control en un flujo de masa o energía (variable manipulada). Es esta variable manipulada la que incide en el proceso causando cambios de la variable controlada. Lo más común en procesos es que la manipulación sea un caudal. Para ajustar el flujo de fluidos en una línea existen primariamente dos mecanismos:

- Modificar la energía entregada al fluido (bombas y ventiladores de velocidad variable)
- Modificar la resistencia al paso del fluido (válvulas, registros en ductos de gases)

3.3.1 Válvulas de control

3.3.1.1 Características. La válvula de control es básicamente un orificio variable por efecto de un actuador. Constituye el elemento final de control en más del 90 % de las aplicaciones industriales. Estos elementos utilizan una señal externa que puede ser neumática o eléctrica y posteriormente transformada en una de tipo mecánica que incide en el dispositivo de control de la válvula, como se muestra en la Figura 3.17. Estos elementos los podemos considerar constituidos por dos partes:

- **Actuador:** recibe la señal de controlador y la transforma en un desplazamiento (lineal o rotacional) merced a un cambio en la presión ejercida sobre el diafragma.
- **Cuerpo:** el diafragma está ligado a un vástago o eje que hace que la sección de pasaje

del fluido cambie y con ésta el caudal.

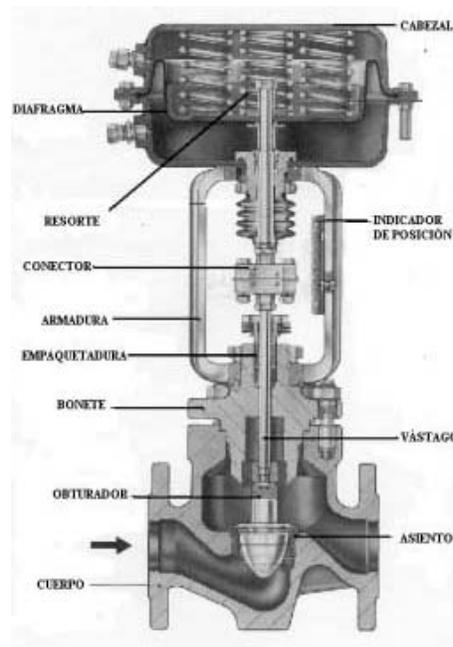


Figura 3.17. Partes de una válvula de control

Con un diagrama en bloques, como se ilustra en la Figura 3.18, se puede representar a la válvula como un sistema en serie.

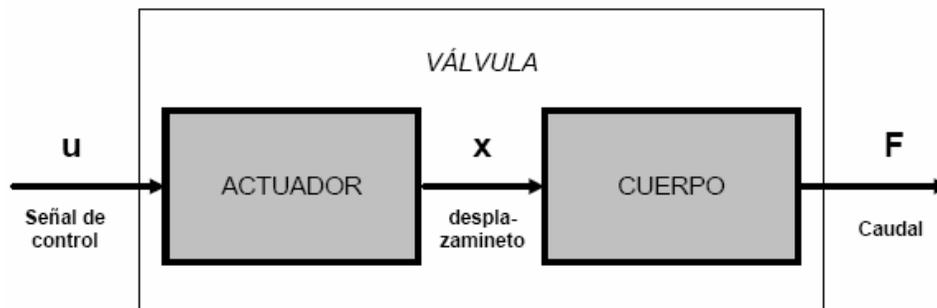


Figura 3.18. Representación en diagrama de bloques de una válvula de control

Desde el punto de vista estático el actuador es moderadamente lineal y la dinámica más significativa es la de llenado del cabezal con una constante de tiempo del orden de los

segundos. El cuerpo carece de retardo y la ganancia viene determinada por la característica de flujo.

3.3.1.2 Especificación de válvulas. Especificar una válvula de control implica determinar las siguientes características:

- **Cuerpo e internos.** indicando el tipo, material y serie que se fija de acuerdo al servicio que debe prestar. También hay que indicar el diámetro que está relacionado con la capacidad y a esto se lo denomina dimensionamiento. Por último, algunos tipos de válvula permiten elegir la característica de flujo, como se analizó en el caso de los elementos de medición de flujo al calcular el número de Reynolds.
- **Actuador.** una vez conocidos los detalles del cuerpo se debe elegir el tipo de motor (neumático de cabezal o pistón, eléctrico, etc.), la acción ante falla y el tamaño.
- **Accesorios.** corresponde a elementos adicionales como transductores I/P o V/P, volante para accionamiento manual y posicionador.

3.3.1.3 Funcionamiento. Existen diversos tipos de cuerpos, que se adaptan a la aplicación según el diseño y movimiento del obturador, considerándose por estas características válvulas de movimiento lineal y de movimiento rotatorio.

Válvula tipo globo. Este elemento se caracteriza por su alto costo en relación al coeficiente de flujo de la válvula, su aplicación está limitada para fluidos con partículas en suspensión y sus diámetros llegan hasta las 24 pulgadas. Esta disponible en diversos modelos como simple y doble asiento, guiado en caja, entre otras. Las de simple asiento requieren de un actuador de mayor tamaño de tal modo que el obturador cierre en contra de la presión diferencial del proceso, como se ilustra en la Figura 3.19. Estas se utilizan cuando la presión del fluido es baja y se necesita que las fugas en cierre sean bajas. Las válvulas de doble asiento se utilizan cuando se precise alta presión diferencial en el fluido. Existen tipos especiales para aplicaciones criogénicas, para vaporización o procesos específicos, su rangeabilidad es de 35:1 a 50:1 y existe una amplia disponibilidad según las características de flujo.

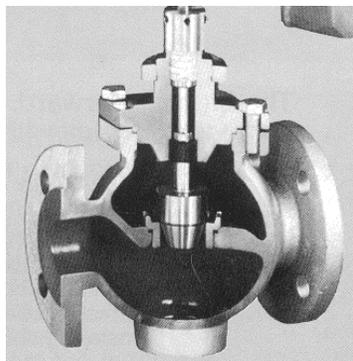


Figura 3.19. Válvula tipo globo

Válvula tipo mariposa. Este elemento tiene un cuerpo en forma de anillo cilíndrico y en su interior gira un disco circular, cuyo eje de giro es controlado por un servomotor, como muestra la Figura 3.20. Existe una buena disponibilidad para diferentes diámetros desde 2 hasta 150". Tiene un bajo costo en relación al coeficiente de flujo de la válvula. Las desventajas de estos elementos son su susceptibilidad a cavitación³, ruido y el cierre hermético requiere de recubrimientos especiales. Su ventaja es la baja pérdida de carga dentro del proceso.

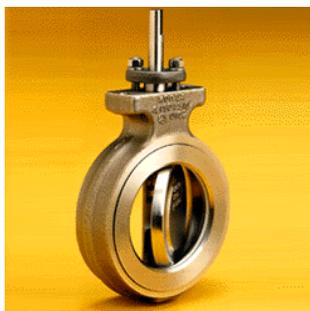


Figura 3.20. Válvula tipo mariposa

Válvula tipo esférica. Este tipo de elemento tiene cuerpo esférico que alberga un obturador en forma de esfera, cuyo corte gira transversalmente bajo la acción de un servomotor, como se observa en la Figura 3.21. Esta válvula es apta para el manejo de suspensiones muy viscosas o con fibras y sólidos y utilizada por lo común en control todo o nada, su rangeabilidad típica es de 50:1 y su desventaja es que necesita ser extraída de la línea del proceso para su mantenimiento.

³ Efecto Hidrodinámico producido cuando el fluido pasa a gran velocidad por una arista afilada, generando descompresión del mismo

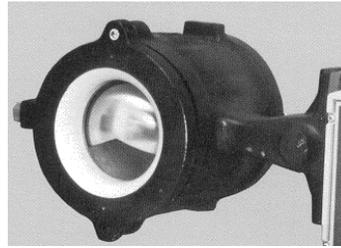


Figura 3.21. Válvula tipo esférica

Válvula tipo tapón. Este tipo de elemento efectúa su movimiento de obturación con un disco plano, que se mueve verticalmente al flujo del fluido como se ilustra en la Figura 3.22. Requiere de motores de gran tamaño y de posicionadores para su funcionamiento y por su disposición es generalmente adecuada para control todo o nada porque en posiciones intermedias tiende a bloquearse. Su rangeabilidad también se encuentra en 50:1.

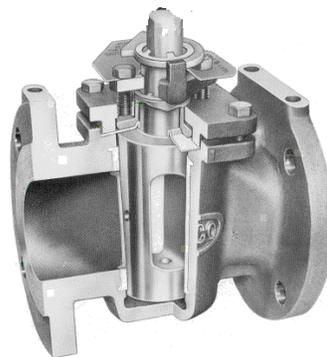


Figura 3.22. Válvula tipo tapón

Válvula tipo Saunders. Este elemento es ampliamente usado para el manejo de fluidos corrosivos o erosivos. Su construcción es simple y consiste en un diafragma que mueve un pistón, contiene un cierre hermético y las partes móviles no tienen contacto con el fluido, como se muestra en la Figura 3.23. Su rango está limitado para presiones y temperaturas de trabajo elevadas y su rangeabilidad se encuentra entre 3:1 a 15:1.

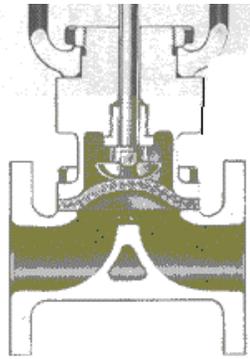


Figura 3.23. Válvula tipo Sauer

3.3.1.4 Selección. Dimensionamiento de válvulas de control. Por dimensionamiento se entiende la determinación del tamaño de la válvula, que viene dado por su diámetro. Es evidente que hay razones económicas que hacen que esta tarea sea importante, por consiguiente hay que tratar que este dispositivo tenga el tamaño adecuado y por lo tanto el costo adecuado. Pero también hay razones técnicas, ya que válvulas sobre dimensionadas pueden llegar a tener un pobre desempeño cuando trabajan en un lazo de control. El método más aceptado para el dimensionamiento es conocido como el procedimiento de cálculo de coeficiente de flujo, C_v y depende del tipo, diámetro y grado de apertura de este dispositivo.

Para dimensionar una válvula de control que se utiliza en líquidos mediante este procedimiento se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q = C_v \sqrt{\frac{\Delta P_v}{\gamma}} = C_v \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\gamma}} \quad \text{Ecuación 3.10}$$

Donde: Q representa el caudal para líquidos [gal/min]

ΔP_v representa la pérdida de carga en la válvula [psig]

P_1 representa la presión aguas arriba [psia]

P_2 representa la presión aguas abajo [psia]

γ representa la densidad relativa del líquido respecto del agua a la temperatura que fluye

Esto sólo se aplica cuando el régimen de flujo es subcrítico y turbulento. Además, para líquidos hay que verificar que no se produzca cavitación. Cuando hay vaporización parcial del líquido, el régimen es crítico y se tiene en cuenta con una ecuación de dimensionamiento distinta con un coeficiente adicional. Para un tipo determinado de válvula, el coeficiente C_v es proporcionado por el fabricante y depende del diámetro (d) y de la apertura (x):

$$C_v = C_v(d,x)$$

Válvula cerrada	$x = 0$	$C_v = C_{vmin}$	$Q = Q_{min}$
Válvula totalmente abierta	$x = 1$	$C_v = C_{vmax}$	$Q = Q_{max}$

Los datos que se precisan para dimensionar una válvula son:

- **Presión aguas arriba y abajo de la válvula:** Si la válvula se va a instalar en una línea existente, esto se puede conocer, ya que existe el mecanismo de movimiento del fluido (bombas, altura gravimétrica, colector de alta y baja presión). Si se está proyectando la línea en la que se instala la válvula, se debe adoptar una pérdida de carga razonable. La experiencia sugiere que la pérdida de carga ΔP_v sea aproximadamente la tercera parte de la pérdida de carga total (incluida la válvula).
- **Rango de caudales de trabajo:** Se deben conocer entre que valores de flujos trabajará en estado estacionario la válvula. Esto implica fijar el caudal de estado estacionario mínimo y caudal de estado estacionario máximo. Para estos dos caudales habrá que calcular los respectivos C_v (C_{vNmin} , C_{vNmax}), de las tablas proporcionadas por los fabricantes se puede calcular la apertura en el rango de operación. Se debe escoger el diámetro de modo que la válvula trabaje en el término medio de su carrera (30 al 70 % de apertura), preferentemente lo más próximo al límite superior. Una práctica recomendada es evaluar también el caudal máximo que pasará en condiciones de máxima apertura.

3.3.1.5 Característica del Flujo. La relación entre el flujo que pasa por una válvula y su apertura se denomina Característica de Flujo. Los fabricantes proveen lo que se denomina *Característica Inherente de Flujo*, que es la relación caudal apertura para pérdida de carga constante, es decir la relación de C_v con la apertura, su comportamiento se puede observar en la Figura 3.24. Esta es una propiedad intrínseca de la válvula. Existen características inherentes ampliamente difundidas entre los fabricantes las cuales se presentan a continuación en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4. Características inherentes del flujo

TIPO	FORMULA TEORICA
Igual porcentaje	$C_v(x) = C_{v_{min}} \cdot a^x$ $C_{v_{min}}$: es el coeficiente para $x = 0$ a : es el parámetro que depende de la amplitud de caudales que puede manejar la válvula
Parabólica	$C_v(x) = x^2 \cdot C_{v_{Max}}$ $C_{v_{Max}}$: es el coeficiente para $x = 1$
Lineal	$C_v(x) = x \cdot C_{v_{Max}}$ $C_{v_{Max}}$: es el coeficiente para $x = 1$
Apertura rápida	No esta descrita por una fórmula de aceptación generalizada.

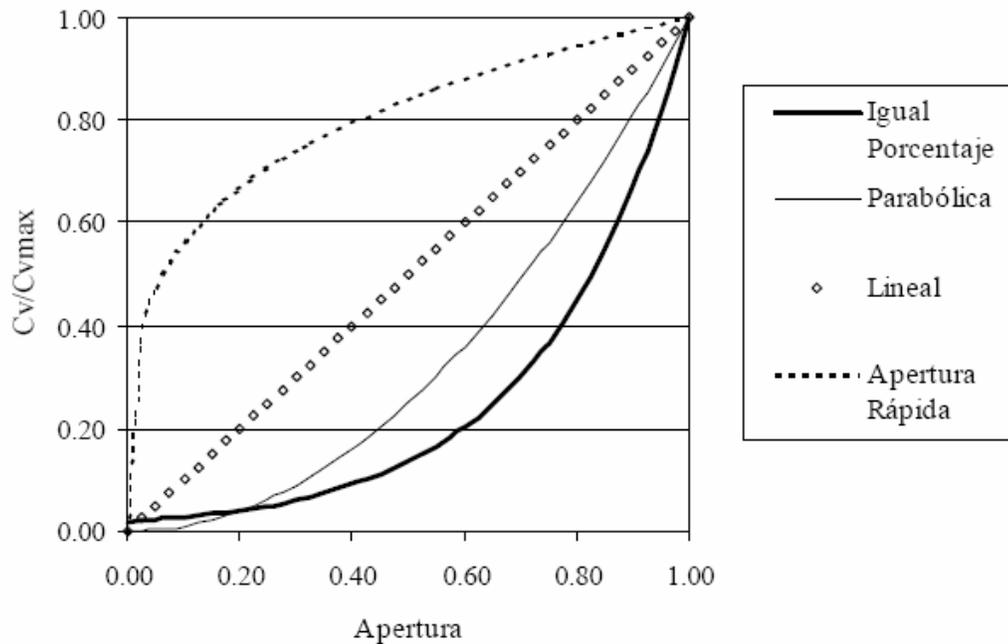


Figura 3.24. Comportamiento de las características inherentes de flujo

La Característica de Flujo Instalada es la relación flujo apertura de la válvula en la línea en las condiciones de trabajo. Cuando una válvula de control se instala en una planta de proceso, su característica de flujo depende de la Característica Inherente y del resto del sistema. El flujo a través de la válvula está sujeto a resistencia por fricción en la propia válvula y en el resto de la línea como a continuación se muestra en la Figura 3.25.

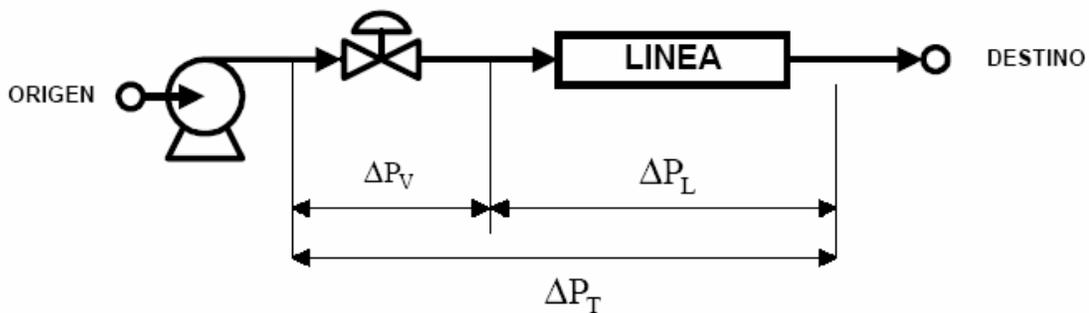


Figura 3.25. Característica de Flujo Instalada

En la Figura 3.26 se puede apreciar como cambia la pérdida de carga en la válvula (ΔP_V) y la de la línea (ΔP_L) según el caudal que circula.

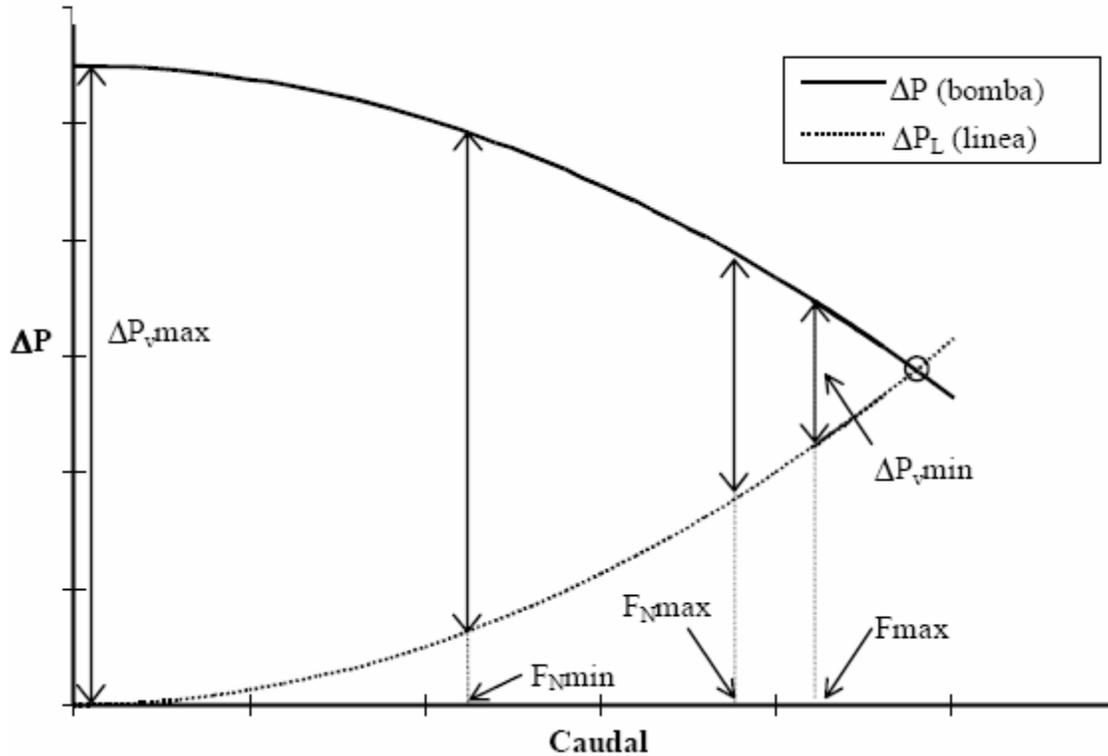


Figura 3.26. Pérdida de carga en la válvula Vs. Caudal

Para medir la influencia que ejerce la instalación en la característica de flujo de la válvula se define el coeficiente:

$$\alpha = \frac{\Delta P_V \text{ (válvula completamente abierta)}}{\Delta P_V \text{ (válvula en la menor apertura)}} = \frac{\Delta P_V \text{ min}}{\Delta P_V \text{ max}} \quad \text{Ecuación 3.11}$$

Y como:

$$\Delta P_T = \Delta P_V + \Delta P_L = \Delta P_V \text{ max}$$

Entonces si α es igual a 1, significa que toda la pérdida de carga se concentra en la válvula independientemente del flujo que circule y por lo tanto la línea no tiene ninguna influencia en la característica de flujo. Valores decrecientes de α indicaran una creciente incidencia de la instalación. Entonces es evidente que la instalación puede tener una

influencia sustancial la característica de flujo instalada produciendo en algunos casos importantes distorsiones respecto de la inherente.

La característica de flujo instalada es crucial ya que determina la ganancia de estado estacionario del cuerpo de la válvula, y esta puede tener grandes cambios dependiendo del punto particular de trabajo. La elección de la característica más apropiada deberá hacerse según el criterio de escoger la característica que asegure una ganancia global del lazo lo más constante dentro del rango de trabajo.

3.3.2 Bombas de Accionamiento Eléctrico

Una bomba es un dispositivo constituido por un conjunto de paletas rotatorias perfectamente encajadas dentro de una cubierta metálica, de manera que son capaces de impulsar al líquido que esté contenido dentro de la cubierta, gracias a la fuerza centrífuga que se genera cuando giran las paletas. En los últimos años, gracias a las facilidades que se han venido dando en el suministro de la energía eléctrica, el uso de las bombas se ha extendido de gran manera. Dado que la mayoría de las bombas son impulsadas con motores eléctricos, esta mejora en el flujo de la electricidad sobre el mecanismo, permitido que los diseñadores y fabricantes de motores eléctricos puedan proveer diseños poderosos y confiables. Existen bombas capaces de alcanzar de forma estable velocidades tan altas como 10.000 rpm y de bombear contra alturas mayores de 100 metros impulsando hasta dos millones de litros por minuto. Las bombas centrifugas tienen cientos de aplicaciones, estos dispositivos son empleados en usos que van desde el simple desagüe de sótanos hasta la alimentación de aguas blancas para una ciudad entera.

3.3.2.1 Características. Los elementos de que consta una instalación en la que se utilice una bomba son:

- **Una tubería de aspiración.** Que concluye prácticamente en la brida de aspiración.

- **El impulsor o rodete.** Formado por un conjunto de álabes⁴ que pueden adoptar diversas formas, según la misión a que vaya a ser destinada la bomba, los cuales giran dentro de una carcasa circular. El rodete es accionado por un motor, y va unido solidariamente al eje, siendo la parte móvil de la bomba. El líquido penetra axialmente por la tubería de aspiración hasta la entrada del rodete, experimentando un cambio de dirección brusco, pasando a radial, en las bombas centrífugas, o permaneciendo axial, en las axiales, acelerándose y absorbiendo un trabajo. Los álabes del rodete someten a las partículas de líquido a un movimiento de rotación muy rápido, siendo proyectadas hacia el exterior por la fuerza centrífuga, creando una altura dinámica de forma que abandonan el rodete hacia la voluta a gran velocidad, aumentando también su presión en el impulsor según la distancia al eje. La elevación del líquido se produce por la reacción entre éste y el rodete sometido al movimiento de rotación.
- **La voluta.** Es un órgano fijo que está dispuesta en forma de caracol alrededor del rodete, a su salida, de tal manera que la separación entre ella y el rodete es mínima en la parte superior, y va aumentando hasta que las partículas líquidas se encuentran frente a la abertura de impulsión. Su misión es la de recoger el líquido que abandona el rodete a gran velocidad, cambiar la dirección de su movimiento y encaminarle hacia la brida de impulsión de la bomba. La voluta es también un transformador de energía, ya que frena la velocidad del líquido, transformando parte de la energía dinámica creada en el rodete en energía de presión, que crece a medida que el espacio entre el rodete y la carcasa aumenta, presión que se suma a la alcanzada por el líquido en el rodete.
- **Una tubería de impulsión.** Instalada a la salida de la voluta, por la que el líquido es evacuado a la presión y velocidad creadas en la bomba.

3.3.2.2 Motor Eléctrico. Estos motores son máquinas eléctricas que convierten la energía eléctrica de alimentación del motor en energía mecánica que es entregada en su eje. Los motores de las bombas son generalmente de tipo asíncrono, y más concretamente de jaula de ardilla. El principio de funcionamiento de los motores asíncronos está basado en la producción de un campo magnético giratorio. Estos motores eléctricos están formados por un rotor, que

⁴ Cada una de las paletas curvas o perfiles aerodinámicos de una turbina

corresponde a la parte móvil y un estator, que es la parte fija del motor. El deslizamiento es la diferencia de velocidad que se produce entre el rotor y el campo del estator.

La velocidad de sincronismo no se ve modificada con la variación de tensión. En un motor en carga un aumento de la tensión conlleva una disminución del deslizamiento y por lo tanto aumenta la velocidad del rotor. Por el contrario si la tensión de alimentación decrece, aumenta el deslizamiento y la velocidad de rotor disminuye. En estos motores el par de arranque es proporcional al cuadrado de la tensión, aumenta cuando la tensión es más elevada. La intensidad en el arranque es proporcional a la tensión de alimentación.

La velocidad en los motores asíncronos trifásicos no está influenciada por las variaciones de tensión, siempre que el motor esté en vacío, pero sí es proporcional a la frecuencia e inversamente proporcional al número de polos que constituye el estator.

$$N = \frac{60 \cdot f}{P} \quad \text{Ecuación 3.12}$$

Donde: N Representa la velocidad de sincronismo [r.p.m.]

f Representa la frecuencia [Hz]

P Representa el número de pares de polos

Para las frecuencias industriales de 50 Hz y 60 Hz, las velocidades de rotación del campo giratorio o de sincronismo, en función del número de pares de polos del estator, se representan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Velocidades de rotación del campo giratorio

P	50 Hz	60 Hz
----------	--------------	--------------

1	3.000 r.p.m.	3.600 r.p.m.
2	1.500 r.p.m.	1.800 r.p.m.
3	1.000 r.p.m.	1.200 r.p.m.
4	750 r.p.m.	900 r.p.m.
5	600 r.p.m.	720 r.p.m.
6	500 r.p.m.	600 r.p.m.

En los tipos de arranques del motor se debe considerar de las corrientes de arranque y las condiciones del mismo. De igual modo tender al aprovechamiento y ahorro energético consiguiendo la máxima eficiencia energética de los mismos, a lo que se puede ya adelantar para tener en cuenta en la selección, que el máximo rendimiento se obtiene con el motor trabajando a plena carga. De igual modo tienen mayor rendimiento los motores que giran a velocidades más altas. Por el contrario a mayor velocidad su vida útil es menor. Por otro lado debemos de procurar la máxima eficiencia económica, y ello se consigue con el mayor ahorro energético, directamente relacionado con el concepto de rendimiento; recordando que eficiencia es la capacidad de realizar una acción con el menor gasto de recursos de energía. También habrá que tener en cuenta los gastos de mantenimiento y de adquisición de los equipos. Si tenemos en cuenta el costo que arroja una instalación de bombeo desde la adquisición de los equipos hasta el fin de su vida útil tenemos aproximadamente: gastos de adquisición de equipos 2%, gastos de mantenimiento 5% y gastos de energía: 93%; lo que nos indica que, donde debemos tener una mayor incidencia a la hora de seleccionar los equipos es en la eficiencia energética de los mismos. Es importante considerar que paralelo a estos criterios, se razone la fiabilidad técnica de los elementos, ya que de ella dependerá la calidad y regularidad del suministro.

3.3.2.3 Funcionamiento

Bombas radiales, axiales y diagonales: Se ha considerado como bombas centrífugas desde las propiamente centrífugas o radiales, en las que la energía se cede al líquido esencialmente mediante la acción de la fuerza centrífuga, hasta las axiales, en las que la energía se cede al líquido por la impulsión ejercida por los álabes sobre el mismo. En las bombas centrífugas radiales la corriente líquida se verifica en planos radiales, en las axiales en superficies cilíndricas alrededor del eje de rotación y de flujo mixto en las diagonales radial y axialmente.

El tipo de una bomba que atiende al diseño hidráulico del rodete impulsor, viene caracterizado por su velocidad específica, calculada en el punto de funcionamiento de diseño, es decir, en el punto de máximo rendimiento de la curva característica. El número específico de revoluciones es constante para un impulsor determinado, para cualquier velocidad de giro. Su valor no se modifica al alterar las dimensiones del impulsor, ya que todos los impulsores geoméricamente semejantes con un rendimiento aceptable tienen la misma velocidad específica, aunque pueden admitir ligeras variaciones en el ángulo de salida o la forma del álabe. La velocidad específica del impulsor es un índice de su geometría y proporciona una idea de sus dimensiones principales. La relación entre los diámetros de entrada y salida.

La forma de los álabes en los impulsores de flujo radial es, en general, curvada hacia atrás con respecto al sentido de giro y con superficies de simple curvatura, siendo la generatriz paralela al eje de rotación; en los impulsores helicoidales, los álabes son de doble curvatura y en los axiales tienen, además, un determinado perfil aerodinámico.

Bombas de impulsor abierto, semiabierto y cerrado: Según su diseño mecánico o estructural, se pueden distinguir tres tipos de impulsores como se ilustra en Figura 3.27: de álabes aislados (abiertos), con una pared o disco lateral de apoyo (semiabiertos) o con ambas paredes laterales (cerrados). Esta clasificación es independiente de la anterior, que se refiere al tipo de diseño hidráulico, por lo que en esta nueva clasificación puede haber impulsores centrífugas y de flujo mixto, abiertos, semiabiertos o cerrados.

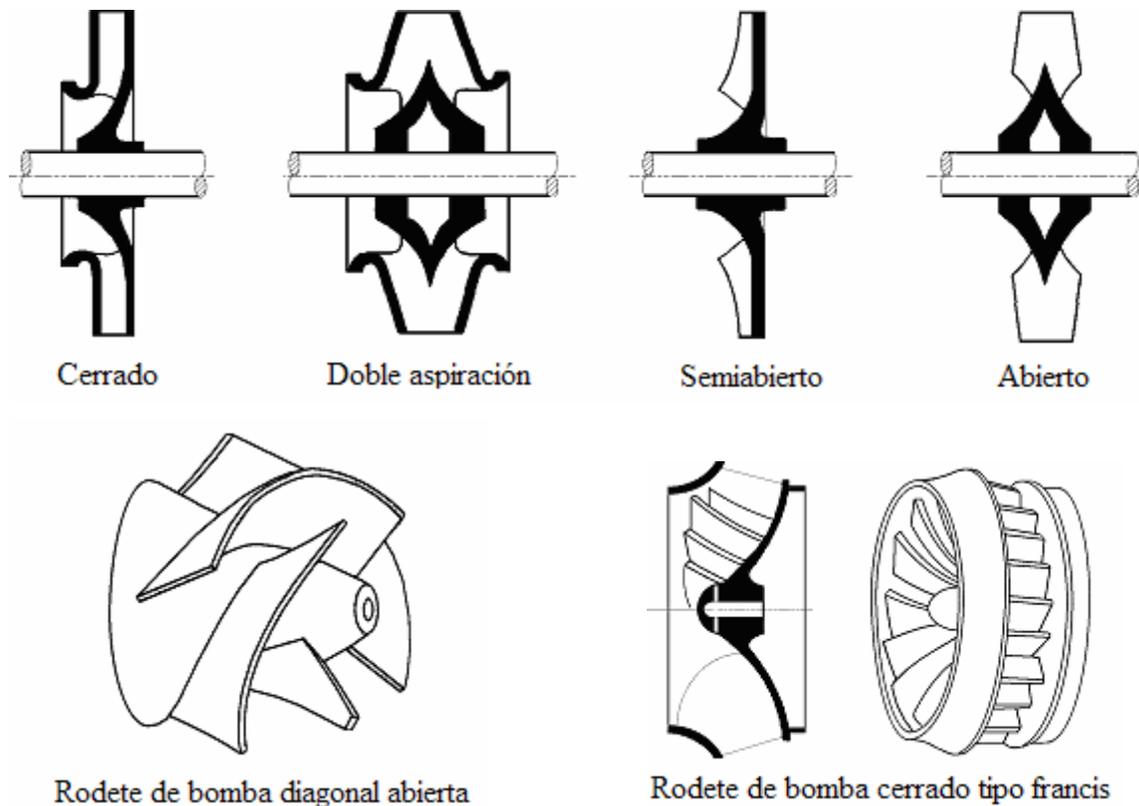


Figura 3.27. Bombas de impulsor abierto, semiabierto y cerrado

Los impulsores axiales, por su misma estructura, sólo pueden ser semiabiertos o cerrados, ya que sus álabes se pueden considerar como apoyados lateralmente en el eje de rotación, que hace las veces de cubo del impulsor, como si fuese la pared posterior de los radiales y diagonales.

Impulsores abiertos. En un impulsor abierto, los álabes desnudos van unidos únicamente al eje de giro y se mueven entre dos paredes laterales fijas pertenecientes a la carcasa de la bomba, con tolerancias laterales lo más estrechas posibles para evitar fugas, como se observa en la Figura 3.28.

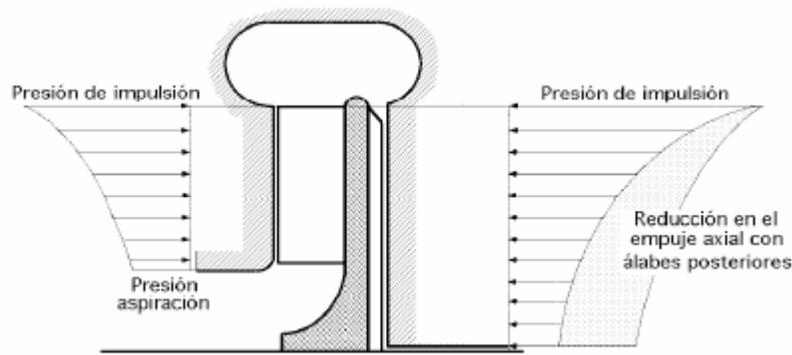


Figura 3.28. Empuje axial en impulsor abierto con álabes posteriores

Esta construcción es mecánicamente débil, por el largo voladizo en que trabajan los álabes, por lo que estos impulsores disponen siempre de una fracción de pared posterior para dar a los álabes la rigidez necesaria. En la práctica no se hace distinción entre impulsores abiertos y semiabiertos, designando a ambos como abiertos, en oposición a los cerrados. Los impulsores abiertos se utilizan en algunas bombas radiales pequeñas y para el bombeo de líquidos abrasivos.

Las ventajas del impulsor abierto son la menor tendencia a obstruirse que le hace adecuado para líquidos sucios; el menor roce hidráulico del disco, al tener sólo una pared girando, de lo que se deduce un buen rendimiento; una mayor accesibilidad de los álabes para el mecanizado, lo que permite conseguir mejores acabados y una mayor facilidad de construcción, con modelos más sencillos, por lo que se puede utilizar una mayor variedad de materiales constructivos con un coste menor de fabricación.

Aunque al principio los impulsores se hacían abiertos, de doble aspiración, hoy en día han caído en desuso por dificultades de ajuste y la mayoría se fabrican de aspiración simple.

Impulsores semiabiertos. Los impulsores con una sola pared lateral, que siempre es la posterior, se emplean con cierta frecuencia, destacando las bombas de flujo mixto y todas las axiales. Al igual que en los abiertos, su buen rendimiento está basado en una tolerancia lateral

muy estrecha, del orden de 0,3 mm, que evita fugas de la periferia al centro y en los canales del impulsor entre sí. Estas fugas son tanto mayores cuanto menos viscoso es el líquido por lo que con líquidos algo viscosos el caudal y la altura pueden aumentar, a pesar de las mayores pérdidas por rozamiento, lo que les hace más apropiados que los abiertos para trabajar con líquidos a altas temperaturas.

El desgaste del impulsor es proporcional a la velocidad relativa del líquido y no es radialmente uniforme, sino algo mayor en la periferia; cuando el juego lateral se hace grande por el desgaste, hay que cambiar el impulsor. Para el servicio con líquidos abrasivos algunas veces se disponen placas laterales de desgaste de fácil intercambio, construidas con materiales especiales como el acero inoxidable que tiene mayor dureza, que no resulta costoso, ya que la carcasa de la bomba sigue siendo de fundición.

La escasa tolerancia lateral del impulsor hace que una posible desviación del eje pueda tener graves consecuencias, al igual que las dilataciones o contracciones anormales, que en esta situación tienen mucha mayor importancia que en los impulsores cerrados. El empuje axial en los impulsores abiertos es mayor que en los cerrados, pues la parte anterior está sometida a una presión media menor; para eliminar este defecto se les provee de álabes posteriores, que disminuyen en gran manera la presión media en la cara posterior. También sirven para evitar que el líquido quede estancado cerca del eje y empaquetaduras, ya que si el líquido fuese abrasivo podría resultar muy perjudicial.

Impulsores cerrados. Los impulsores cerrados tienen los álabes colocados entre dos paredes laterales, anterior o de aspiración y posterior, como se ilustra en la Figura 3.29. El estrecho margen de tolerancias existente para evitar fugas de retroceso entre la impulsión y la aspiración suele ser axial y está constituida por unas superficies anulares muy próximas, situadas alrededor del orificio de aspiración (oído del impulsor) y formadas por los aros de cierre, uno montado en la carcasa y el otro que gira montado en el impulsor.

La principal ventaja de esta solución es que los aros de cierre se pueden cambiar fácilmente cuando se desgastan, recuperando la tolerancia primitiva, evitando así fugas mayores. Respecto al desgaste, se pueden hacer de materiales especiales para condiciones de funcionamiento y servicio particularmente duras. A menudo, en vez de estos aros dobles se utiliza sólo un aro montado en la carcasa, de forma que la superficie rozante móvil pertenece al propio impulsor; en estos casos, en el impulsor se deja material suficiente para poder rectificar su superficie desgastada, si procede, cambiando el aro de la carcasa por uno nuevo de diámetro ligeramente diferente, de forma que deje el juego conveniente con el impulsor.

Los impulsores de doble aspiración llevan aros de cierre en los dos oídos; sus ventajas son, ausencia de empuje axial y una mayor capacidad de aspiración. Se pueden considerar como dos impulsores de aspiración simple, opuestos y en paralelo.

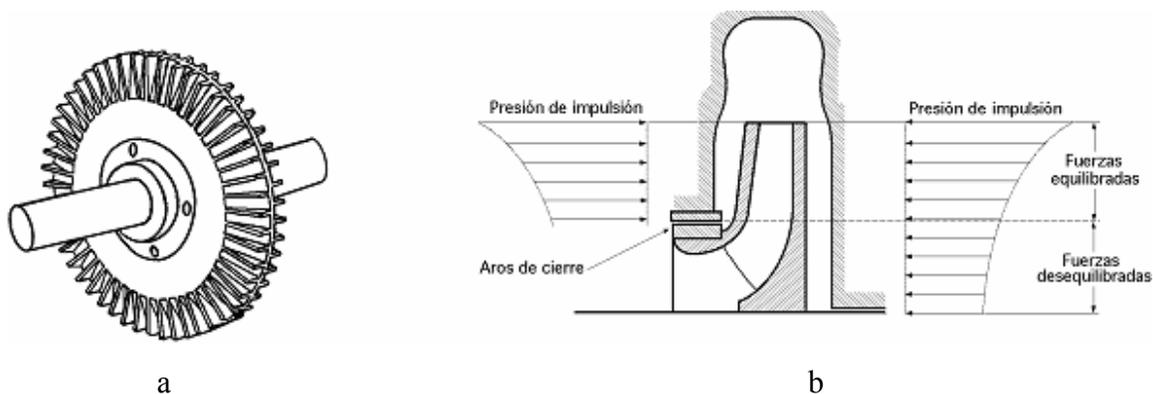


Figura 3.29. a) Impulsor con álabes radiales. **b)** Empuje axial de impulsor cerrado

Los impulsores de simple aspiración, cuando están provistos en la parte posterior de una cámara de equilibrado del empuje hidráulico axial en comunicación con la aspiración a través de los agujeros de equilibrio, sólo tienen aros a ambos lados, lo que implica una desventaja para el equilibrado que, hidráulicamente, es bastante eficaz. Los impulsores cerrados pueden resistir mucho mejor cualquier flexión del eje, o contracciones y dilataciones mayores de las previstas, por lo que son más adecuados para servicios de altas temperaturas.

Tienen la desventaja de que sus canales son normalmente inaccesibles para cualquier tipo de mecanizado, lo que exige métodos constructivos especiales más difíciles que en los abiertos. Hidráulicamente, el rozamiento de disco al tener el impulsor dos paredes, es doble que en los abiertos, pero las pérdidas volumétricas son menores. La posibilidad de obstrucción con líquidos sucios es mayor y para ello se diseñan impulsores especiales con oído de gran área, canales lo más amplios posibles, pequeño número de álabes, 2 ó 3, y éstos con los bordes de entrada redondeados.

3.3.2.4 Selección. Para la selección de una bomba debemos conocer el conjunto de parámetros que permiten dimensionar a este elemento.

Caudal de impulsión de la bomba. Es el volumen útil suministrado por la bomba en la unidad de tiempo en m^3/s o m^3/h . El líquido de compensación así como el de goteo no están contenidos en el caudal de la bomba, es decir, no han de tenerse en cuenta al seleccionarla.

Altura de impulsión de la bomba. Es el trabajo mecánico utilizable transmitido por la bomba al líquido que impulsa, relacionado con el peso del mismo, expresado en metros.

Dicha altura es independiente de la densidad del producto bombeado, es decir, una bomba centrífuga impulsa el líquido que bombea a una misma altura H , cualquiera que sea la densidad de éste. La densidad ρ determina la presión en la bomba e interviene en la potencia absorbida por la misma.

Altura de impulsión de la instalación. La altura manométrica de la instalación H_A en la práctica esta determinada por la siguiente fórmula.

$$H_A = H_{geo} + \sum H_v$$

Donde: H_{geo} representa la altura geodésica de impulsión y es igual diferencia de altura entre los niveles del líquido en aspiración e impulsión. Si la tubería de impulsión vierte por encima del nivel del líquido, esta altura geodésica estará referida al eje horizontal de la salida.

$\sum H_v$ representa la de suma de todas las pérdidas de carga del sistema (Resistencias en la tubería, válvulas y demás accesorios, tanto en la línea de aspiración como en la impulsión).

Elección del tamaño de bomba. Se conocen los datos necesarios, caudal y altura de impulsión, del punto de servicio deseado, así como la frecuencia de la red. Con ellos el tamaño de bomba y su velocidad de entre el campo de curvas disponibles, denominado también diagrama de conjunto. Después se obtendrán las magnitudes restantes de la bomba elegida como rendimiento o eficiencia η , potencia absorbida P , etc. En tanto no exista otra razón especial en la elección, se tratará de que el punto de trabajo quede situado tan próximo como sea posible al de rendimiento óptimo de la bomba.

Potencia absorbida por la bomba. La potencia absorbida por una bomba centrífuga es la requerida por esta en su acoplamiento o al eje de la máquina de accionamiento, potencia mecánica que se obtiene mediante la ecuación 3.13:

$$P = \frac{\rho \cdot Q \cdot H}{367 \cdot \eta} [KW] \quad \text{Ecuación 3.13}$$

Donde: ρ Representa la densidad [Kg/dm^3]

Q Representa el caudal [m^3/h]

H Representa la altura de impulsión de la bomba [m]

La potencia absorbida por la bomba P puede obtenerse también, con bastante exactitud, de la curva característica de la bomba para una densidad $\rho = 1.0 \text{ Kg.}/\text{dm}^3$. Si la densidad ρ fuera otra, se modifica la potencia resultante de la curva.

Determinación de la potencia del motor: Debido a las fluctuaciones de flujo previsible en la instalación, fluctúa también el punto de trabajo de la bomba que, en determinadas circunstancias implica el aumento de la potencia absorbida por la bomba, en la práctica y salvo

que existan otras prescripciones por parte del cliente, al seleccionar la potencia nominal del motor se prevén los incrementos siguientes:

- Hasta 7,5 Kw., aproximadamente 20%
- Desde 7,5 hasta 40 Kw., aproximadamente 15%
- Desde 40 Kw., aproximadamente 10% incremento de potencia

Ante la posibilidad de extremas variaciones de volumen, ha de elegirse la potencia del motor con arreglo al caudal máximo posible de la curva, teniendo en cuenta:

- El diámetro de rodete necesario
- El valor permisible por el soporte cojinete

Para la impulsión de líquidos con alto contenido de sólidos así como de medios espesos, es necesario recurrir a bombas especiales, con rodets también especiales.

Para la simulación del proceso en la maqueta, se utiliza cuatro bombas; tres que corresponden al control de nivel en las tinas del circuito y la cuarta que corresponde al control de flujo que ingresa a la perforación. En lo que concierne al control del nivel, las bombas que controlan el paso de líquido desde la tina de acumulación hacia la tina de dosificación y la bomba que activa el flujo del líquido hacia el bypass (retorno a la vertiente), actúan en servicio de descarga para tubería de media pulgada, con una potencia de 18W y un caudal máximo de 237GPH. En el caso del control del nivel para la tina del líquido reciclado, se utiliza una bomba sumergible en servicio de descarga, en cuyo caso alcanza una altura máxima de 1.6 metros para tubería de media pulgada, con una potencia de 28W y un caudal máximo de 317GPH. Las especificaciones técnicas de estos elementos están en las hojas técnicas correspondientes a las bombas Springbrunnen modelos FP12V-18 y FP12V-28.

Para el control de flujo hacia la perforación, se utiliza una bomba sumergible en servicio de descarga, para tubería de media pulgada, con una potencia de 30W y un caudal de 360GPH. Las especificaciones técnicas del elemento se encuentra en las hojas técnicas

correspondientes a la bomba sumergible de la marca Rule Industries modelo para uso marino Rule360.

CAPÍTULO 4

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

Al llevar a cabo la función de control, el controlador automático usa la diferencia entre el valor de consigna y las señales de medición para obtener la señal de salida hacia el elemento de control. La precisión y capacidad de respuesta de estas señales es la limitación básica en la habilidad del sistema para controlar correctamente la medición. Si el sensor/transmisor no envía una señal precisa, o si existe un retraso en la medición de la señal, la destreza del controlador para manipular el proceso será degradada. Al mismo tiempo, el controlador debe recibir una señal de valor de consigna precisa conocida comúnmente como setpoint. En controladores que usan señales de valor de consigna eléctrica y se generan dentro del controlador, una falla de calibración del transmisor resultará necesariamente en que la unidad de control automático llevará a la medición un valor erróneo.

Para que un sistema de control sea calificado como funcional, se debe considerar los siguientes criterios para su diseño:

- **Estabilidad.** Debe ser estable indefectiblemente, considerando que un sistema es estable cuando para una entrada suficientemente acotada la salida es también acotada, es decir, para control de procesos la única condición aceptable es la que no tiene defecto. La indiferente debe ser tratada como inestable, pues no deja margen de seguridad.
- **Precisión.** La precisión es un valor estadístico y no es equivalente a la exactitud. Exactitud es el grado de correspondencia con un valor verdadero, que se supone que existe y su valor es absoluto. Precisión es el resultado de una sucesión de ensayos bajo las mismas condiciones, misma entrada, y se lo pondera mediante una curva que ilustra la dispersión de los resultados en base a su variancia y por esta razón, su valor es estadístico. Para los sistemas de control de procesos, excepto que

se trate de variables que representen en forma directa el control de calidad, como es el caso de variables llamadas analíticas, lo importante es tener precisión en el sistema de control. Se completa este concepto, con otro criterio a tomarse en cuenta, la repetibilidad. Este concepto es la permanencia de la precisión en el tiempo. La precisión se verifica en ensayos repetidos en una sucesión, en tal interpretación, conlleva verificar la vigencia de esa característica luego de semanas o meses de uso normal en planta. Para demandar precisión a un sistema de control y lograr que haya poca dispersión de sus valores, el producto de todas las ganancias estáticas de los componentes del lazo debe ser alto, lo que define una mayor acción para pequeñas entradas.

- **Velocidad de respuesta.** Es la velocidad con la que el sistema se recupera del efecto de una perturbación. De este concepto surge que si se busca mayor velocidad de retorno a la condición en que estaba antes de ser perturbado, se debe aplicar acciones correctivas más fuertes. La búsqueda de ese tipo de soluciones es la técnica fundamental del éxito de un sistema de control.
- **Rapidez del sistema controlador frente al sistema controlado.** Se establece como el tiempo que requiere el sistema controlador, desde que detecta un cambio en la variable directamente controlada, hasta que actúa mediante el elemento de control; debe ser despreciable frente al tiempo necesario para que esta acción se aprecie en la salida del proceso. Para esta condición se puede decir que afortunadamente, el proceso del agua utilizada para la perforación se cumple con relativa facilidad.
- **Sensibilidad.** Este criterio explica la dependencia de una variable con respecto a otra, puesto que en un sistema existen variables manipuladas, otras controladas y otras perturbadoras, es inevitable que la acción de una repercuta sobre las otras, por ello la necesidad de conocer e identificar cada variable a fin de conocer su naturaleza antes mencionada.

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO

4.1.1 Selección de la acción del controlador

Dependiendo de la acción en el elemento final de control, un incremento en la variable medida puede requerir incrementos o disminuciones del valor de salida para el control del proceso. Todos los controladores pueden ser conmutados entre una acción directa o inversa; la acción directa significa que cuando el controlador ve un incremento de señal desde el transmisor, su salida se incrementa; mientras que la acción inversa significa que un incremento en las señales de medición hacen que la señal de salida disminuya. Para determinar cuál de estas salidas es la correcta, debe ser llevado a cabo un análisis en los lazos de control del proceso.

El primer paso es determinar las acciones de los elementos de control, en la tina de acumulación en el circuito del agua para la perforación. Por razones de seguridad en la perforación y para certificar el flujo continuo del líquido en el proceso debido a su criticidad en el uso del agua, el sistema debe garantizar la existencia del líquido en el circuito, si existe un fallo en la instrumentación o en el funcionamiento del elemento de control; por lo tanto, el diseño comprenderá válvulas de accionamiento manual para proveer de líquido al proceso. En el segundo paso, se considera el efecto de un cambio en la medición del flujo dentro del proceso. Si es necesario incrementar el caudal del líquido hacia el sistema de inyección de agua, debido a la existencia de infiltración de líquido en la perforación, la medición indicará la disminución de flujo del líquido que sale del rig hacia la tina de tratamiento de reciclaje, por tanto, la señal del controlador automático hacia la bomba debe aumentar, es decir el controlador requiere acción inversa.

4.1.2 Variaciones

Cualquiera de los siguientes eventos podría ocurrir requiriendo un caudal diferente para el proceso de perforación. Primero, si la posición de la válvula manual fuera cerrada ligeramente, entonces un flujo menor del requerido afectaría al sistema, haciendo que el proceso caiga. Este es un cambio bajo demanda, y para restaurar el balance, la bomba de

control con accionamiento eléctrico, el sensor/transmisor y la válvula manual deberán ser colocadas correctamente para proveer el ingreso efectivo del líquido. Un segundo tipo de condición de desbalance sería un cambio en el valor de consigna o setpoint y el tercer tipo de variación sería un cambio en el suministro de agua, si la presión de salida de la bomba que lleva el líquido desde la vertiente se incrementara, aún si la bombas de control en las tinas de acumulación se mantuvieran en su caudal, el incremento de presión causaría un mayor flujo de líquido, haciendo que el nivel en la tina comience a elevarse a mayor rapidez, por lo que se debe considerar esta variación repentina con un controlador rápido que garantice el control de nivel en el sistema.

4.1.3 Características del proceso y controlabilidad

El controlador automático usa cambios en la posición del actuador final para controlar la señal de medición, moviendo el actuador para oponerse a cualquier cambio que observe en la señal de medición. La controlabilidad de cualquier proceso es función de lo bien que una señal de medición responde a éstos cambios en la salida del controlador; para un buen control la medición debería comenzar a responde en forma rápida, pero luego no cambiar rápidamente. Todos los procesos pueden ser descritos por una relación entre las entradas y las salidas. Por lo general, en los procesos no hay una respuesta inmediata en la indicación de la variable al inicio del sistema de control, luego la respuesta comienza a cambiar, se eleva rápidamente y se aproxima al final a un nivel constante. El proceso puede ser caracterizado por dos elementos de su respuesta, el primero es el tiempo muerto, o sea el tiempo antes de que la medición comience a responder. El tiempo muerto es una función de las dimensiones físicas de un proceso y parámetros tales como las velocidades de respuesta de los instrumentos y de sus regímenes de trabajo. El segundo elemento de respuesta que caracteriza en la capacidad de un proceso es el material o energía que debe ingresar o abandonar el proceso para cambiar las mediciones, por ejemplo, el volumen de agua necesario para cambiar el nivel; la medición de una capacidad es su respuesta para un paso de entrada. Específicamente, el tamaño de una capacidad es medida por una constante de tiempo, que es definido como el necesario para completar el 63% de su respuesta total.

La constante de tiempo es una función del tamaño del proceso y del régimen de transferencia de material o energía. Para el caso del sistema de este proyecto, cuanto más

grande sea la tina de acumulación y menor el caudal de agua requerido para el proceso de perforación, mayor será la constante de tiempo. Combinados con el tiempo muerto, los mismos definen cuanto tiempo lleva para que la señal responda a cambios en la posición del elemento de control. Un proceso puede comenzar a responder rápidamente, pero no cambiar muy rápido si su tiempo muerto es pequeño y su capacidad muy grande. En resumen, cuanto mayor sea la constante de tiempo de la capacidad comparada con el tiempo muerto, mejor será la controlabilidad del proceso.

4.1.4 Variables

Se define como variable a todo aquel parámetro físico cuyo valor puede ser medido, controlado y modificado en sus cuantificaciones. En el control de procesos se definen las siguientes variables ilustradas en la Figura 4.1:

- Variable Controlada: Es aquella que se busca mantener constante o con cambios mínimos. Su valor debe seguir al valor de consigna o setpoint.
- Variable Manipulada: A través de esta se debe corregir el efecto de las perturbaciones. Sobre esta se colocará el actuador.
- Variable Perturbadora: Esta dado por los cambios repentinos que sufre el sistema y que provocan inestabilidad.
- Variable Medida: Es toda variable adicional, cuyo valor es necesario registrar y monitorear, pero que no es necesario controlar.

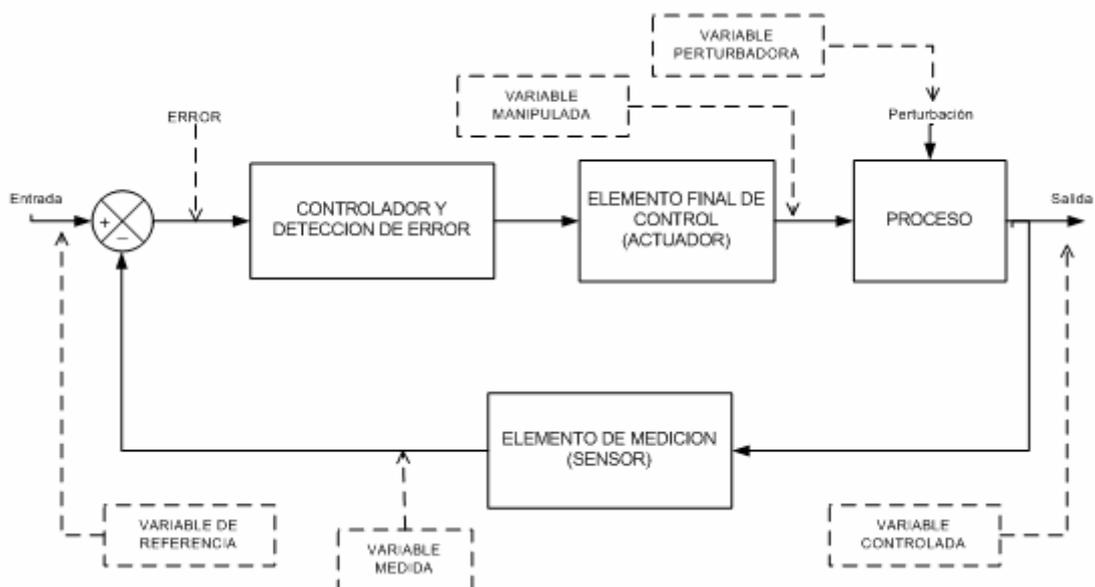


Figura 4.1. Variables en el control automático de procesos

4.1.5 Modelamiento matemático

Existen métodos a través de los cuales los sistemas de control pueden ser representados por medio de funciones matemáticas, esta representación recibe el nombre de modelamiento matemático, este modelo describirá las características dinámicas del sistema a través de ecuaciones diferenciales. El modelamiento puede ser analítico, cuando se aplican las leyes físicas correspondientes a cada componente del sistema, que en conjunto forman una estructura o función matemática; o experimental, que consiste en la identificación de los parámetros, mediante el análisis de datos de entrada y salida, estimando valores posibles que se ajusten al sistema.

A partir del modelamiento matemático, se puede llegar a una función que represente la relación entre la salida y entrada del sistema, esta función se denomina Función de Transferencia. El proceso experimental es denominado Identificación de Sistemas, y corresponde a la planta o proceso que se desea analizar, consiste en recoger datos de la variable de salida con su correspondiente dato de entrada que provocó dicha salida, para luego mediante algoritmos matemáticos aproximar una función de transferencia, la cual debe generar una salida estimada similar a la salida censada, y dependiendo de la diferencia entre ambas, conocida como error, se dará validez a la función obtenida o se tendrá que calcular con nuevos valores en los algoritmos matemáticos de análisis.

El modelamiento matemático que se propone para el sistema del circuito de agua para perforación, es un modelo dinámico correspondiente a tinas en serie con un sistema no interactivo cuyas funciones de transferencia están determinadas por las variables nivel y flujo de los tanques en serie, como se observa en la Figura 4.2. En el proceso las tinas están abiertas a las condiciones atmosféricas y la temperatura varía inapreciablemente sin afectar al proceso.

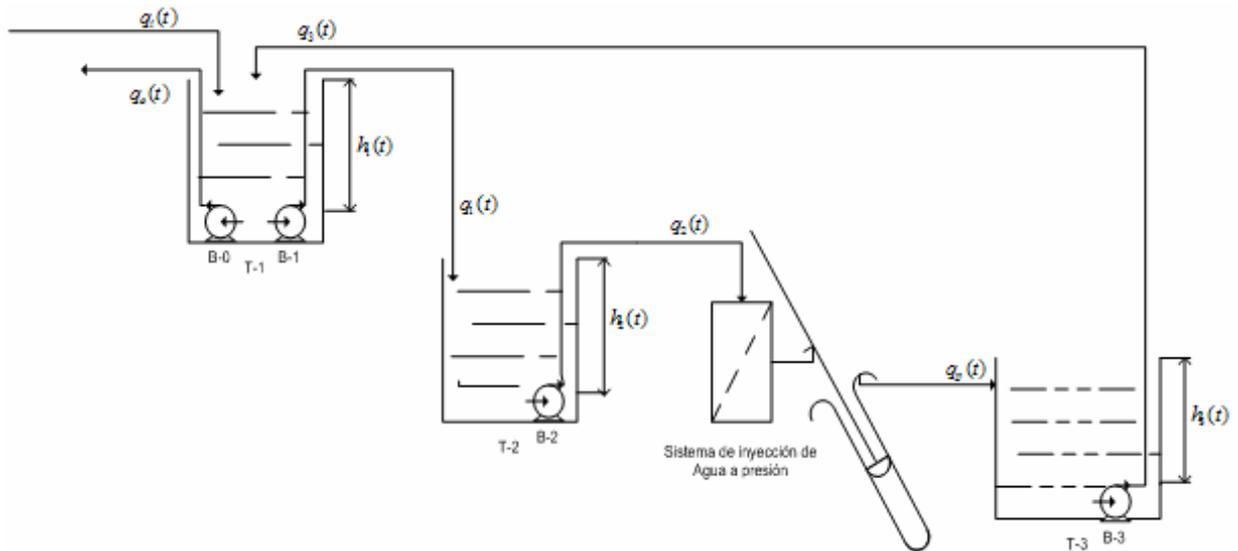


Figura 4.2. Sistema no-interactivo del circuito de agua para la perforación

Utilizando la ecuación de potencia absorbida por la bomba, tanto en servicio de descarga como de succión y considerando que no existen pérdidas en la tubería y accesorios, los flujos a través de las bombas son:

$$q(t) = \frac{367 \cdot P \cdot \eta}{\rho \cdot h(t)} = \frac{D'_B}{h(t)} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde: P representa la potencia de absorción de la bomba

η representa el rendimiento de la bomba

ρ representa la densidad del líquido

D'_B representa la operación de todas las anteriores constantes

$h(t)$ representa la altura de carga y succión de la instalación variable en el tiempo

Considerando el balance de masa de estado dinámico para el primer tanque, se obtiene:

$$\rho \cdot q_i(t) + \rho \cdot q_3(t) - \rho \cdot q_o(t) - \rho \cdot q_1(t) = \rho \cdot A_1 \cdot \frac{dh_1(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

El balance de masa de estado dinámico para el segundo tanque es:

$$\rho \cdot q_1(t) - \rho \cdot q_2(t) = \rho \cdot A_2 \cdot \frac{dh_2(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Y para el tercer tanque, esta dado por:

$$\rho \cdot q_p(t) - \rho \cdot q_3(t) = \rho \cdot A_3 \cdot \frac{dh_3(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Donde: $q_i(t)$ representa el flujo de entrada al circuito

$q_o(t)$ representa el flujo de salida del circuito

$q_p(t)$ representa el flujo de salida de la perforación

$q_1(t)$ representa el flujo en la bomba 1

$q_2(t)$ representa el flujo en la bomba 2

$q_3(t)$ representa el flujo en la bomba 3

$h_1(t)$ representa la altura en el tanque 1

$h_2(t)$ representa la altura en el tanque 2

$h_3(t)$ representa la altura en el tanque 3

ρ representa la densidad del líquido

A_1, A_2 y A_3 representan las áreas transversales de los tanques 1, 2 y 3

De la expresión de la bomba se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$q_1(t) = \frac{D'_{B1}}{h_1(t)} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

$$q_2(t) = \frac{D'_{B2}}{h_2(t)} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

$$q_3(t) = \frac{D'_{B3}}{h_3(t)} \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Substituyendo las ecuaciones 4.5, 4.6 y 4.7 en 4.2, 4.3 y 4.4, se tendrán:

$$q_i(t) + \frac{D'_{B3}}{h_3(t)} - q_o(t) - \frac{D'_{B1}}{h_1(t)} = A_1 \cdot \frac{dh_1(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 4.8}$$

$$\frac{D'_{B1}}{h_1(t)} - \frac{D'_{B2}}{h_2(t)} = A_2 \cdot \frac{dh_2(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 4.9}$$

$$q_p(t) - \frac{D'_{B3}}{h_3(t)} = A_3 \cdot \frac{dh_3(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 4.10}$$

Este grupo de ecuaciones representa al proceso. Debido a que su comportamiento no es lineal y se desea obtener las funciones de transferencia, el procedimiento que se debe

seguir es linealizar las ecuaciones y obtener cada variable de desviación, de lo que se obtiene:

$$Q_i(t) + D_3 \cdot H_3(t) - Q_o(t) - D_1 \cdot H_1(t) = A_1 \cdot \frac{dH_1(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 4.11}$$

$$D_1 \cdot H_1(t) - D_2 \cdot H_2(t) = A_2 \cdot \frac{dH_2(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 4.12}$$

$$Q_p(t) - D_3 \cdot H_3(t) = A_3 \cdot \frac{dH_3(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 4.13}$$

Los coeficientes de las anteriores ecuaciones que son linealizadas, se obtienen de las derivadas parciales con respecto a cada altura variable en el tiempo de los diferentes tanques, donde:

$$D_1 = \left. \frac{\partial q_1(t)}{\partial h_1(t)} \right|_{ss} = \left. \frac{\partial}{\partial h_1(t)} \left(\frac{D'_{B1}}{h_1(t)} \right) \right|_{ss} = -D'_{B1} \cdot (\bar{h}_1)^{-2}$$

$$D_2 = \left. \frac{\partial q_2(t)}{\partial h_2(t)} \right|_{ss} = \left. \frac{\partial}{\partial h_2(t)} \left(\frac{D'_{B2}}{h_2(t)} \right) \right|_{ss} = -D'_{B2} \cdot (\bar{h}_2)^{-2}$$

$$D_3 = \left. \frac{\partial q_3(t)}{\partial h_3(t)} \right|_{ss} = \left. \frac{\partial}{\partial h_3(t)} \left(\frac{D'_{B3}}{h_3(t)} \right) \right|_{ss} = -D'_{B3} \cdot (\bar{h}_3)^{-2}$$

Donde las variables de desviación son:

$$\begin{aligned} Q_i(t) &= q_i(t) - \bar{q}_i \\ Q_o(t) &= q_o(t) - \bar{q}_o \\ Q_p(t) &= q_p(t) - \bar{q}_p \\ H_1(t) &= h_1(t) - \bar{h}_1 \\ H_2(t) &= h_2(t) - \bar{h}_2 \\ H_3(t) &= h_3(t) - \bar{h}_3 \end{aligned}$$

Reordenando la ecuación 4.11 y dividiendo para el coeficiente D1 se obtiene:

$$A_1 \cdot \frac{dH_1(t)}{dt} + D_1 \cdot H_1(t) = Q_i(t) - Q_o(t) + D_2 \cdot H_3(t)$$

$$\frac{A_1}{D_1} \cdot \frac{dH_1(t)}{dt} + H_1(t) = \frac{1}{D_1} \cdot Q_i(t) - \frac{1}{D_1} \cdot Q_o(t) + \frac{D_2}{D_1} \cdot H_3(t)$$

Donde:

$$\frac{A_1}{D_1} = \tau_1$$

$$\frac{1}{D_1} = K_1$$

$$\frac{D_2}{D_1} = K_3$$

$$\tau_1 \cdot \frac{dH_1(t)}{dt} + H_1(t) = K_1 \cdot Q_i(t) - K_1 \cdot Q_o(t) + K_3 \cdot H_3(t)$$

Al encontrar la transformada de Laplace de la ecuación anterior, se tendrá:

$$L\left[\tau_1 \cdot \frac{dH_1(t)}{dt} + H_1(t)\right] = L[K_1 \cdot Q_i(t) - K_1 \cdot Q_o(t) + K_3 \cdot H_3(t)]$$

$$L\left[\tau_1 \cdot \frac{dH_1(t)}{dt}\right] + [H_1(t)] = L[K_1 \cdot Q_i(t)] - L[K_1 \cdot Q_o(t)] + L[K_3 \cdot H_3(t)]$$

$$\tau_1 \cdot s \cdot H_1(s) + H_1(s) = K_1 \cdot Q_i(s) - K_1 \cdot Q_o(s) + K_3 \cdot H_3(s)$$

$$H_1(s) \cdot (\tau_1 \cdot s + 1) = K_1 \cdot Q_i(s) - K_1 \cdot Q_o(s) + K_3 \cdot H_3(s)$$

$$H_1(s) = \frac{K_1}{\tau_1 \cdot s + 1} \cdot Q_i(s) - \frac{K_1}{\tau_1 \cdot s + 1} \cdot Q_o(s) + \frac{K_3}{\tau_1 \cdot s + 1} \cdot H_3(s) \quad \text{Ecuación 4.14}$$

Reordenando la ecuación 4.12 y dividiendo para el coeficiente D2 se obtiene:

$$\frac{A_2}{D_2} \cdot \frac{dH_2(t)}{dt} + H_2(t) = \frac{D_1}{D_2} \cdot H_1(t)$$

Donde:

$$\frac{A_2}{D_2} = \tau_2$$

$$\frac{D_1}{D_2} = K_2$$

$$\tau_2 \cdot \frac{dH_2(t)}{dt} + H_2(t) = K_2 \cdot H_1(t)$$

$$L\left[\tau_2 \cdot \frac{dH_2(t)}{dt}\right] + L[H_2(t)] = L[K_2 \cdot H_1(t)]$$

$$\tau_2 \cdot s \cdot H_2(s) + H_2(s) = K_2 \cdot H_1(s)$$

$$H_2(s) \cdot (\tau_2 \cdot s + 1) = K_2 \cdot H_1(s)$$

$$H_2(s) = \frac{K_2}{\tau_2 \cdot s + 1} \cdot H_1(s)$$

Ecuación 4.15

Reordenando la ecuación **4.13** y dividiendo para el coeficiente **D3** se obtiene:

$$\frac{A_3}{D_3} \cdot \frac{dH_3(t)}{dt} + H_3(t) = \frac{1}{D_3} \cdot Q_p(t)$$

Donde:

$$\frac{A_3}{D_3} = \tau_3$$

$$\frac{1}{D_3} = K_4$$

$$\tau_3 \cdot \frac{dH_3(t)}{dt} + H_3(t) = K_4 \cdot Q_p(t)$$

$$L\left[\tau_3 \cdot \frac{dH_3(t)}{dt}\right] + L[H_3(t)] = L[K_4 \cdot Q_p(t)]$$

$$\tau_3 \cdot s \cdot H_3(s) + H_3(s) = K_4 \cdot Q_p(s)$$

$$H_3(s) \cdot (\tau_3 \cdot s + 1) = K_4 \cdot Q_p(s)$$

$$H_3(s) = \frac{K_4}{\tau_3 s + 1} \cdot Q_p(s)$$

Ecuación 4.16

Como se puede observar la función de transferencia de la *ecuación 4.14*, relaciona el nivel del primer tanque con el flujo de entrada al circuito, el flujo de salida y el nivel del

tercer tanque que realimenta el flujo del agua tratada luego de la perforación. La función de transferencia de la ecuación 4.15 relaciona el nivel del segundo tanque con respecto del primero y finalmente la función de transferencia de la ecuación 4.16 relaciona el nivel del tercer tanque con el flujo de agua que ha salido de la perforación.

Una vez obtenidas las funciones de transferencia se pueden encontrar las ecuaciones individuales que se representan en función del flujo de entrada $q_i(t)$, del flujo de salida del circuito de agua $q_o(t)$ y del flujo de agua que sale de la perforación $q_p(t)$.

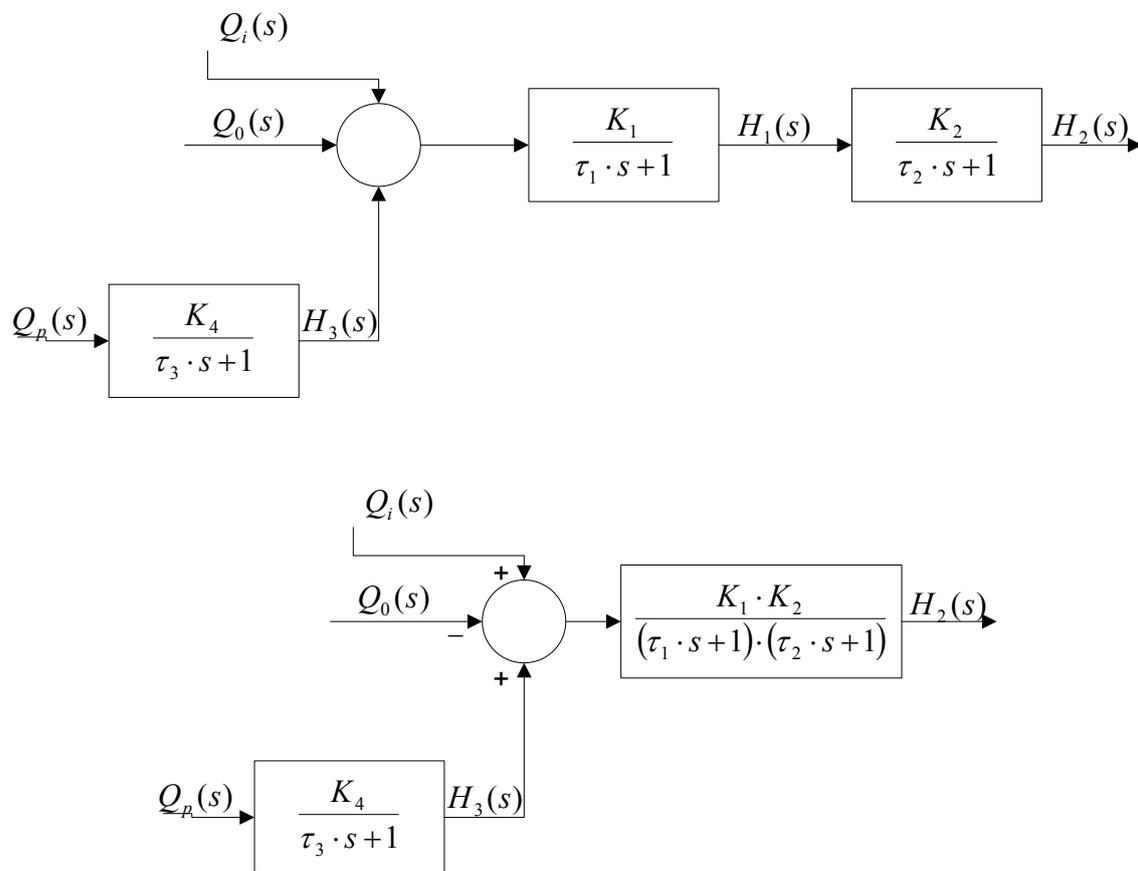


Figura 4.3. Modelamiento matemático: Diagrama de bloques del circuito de agua de perforación

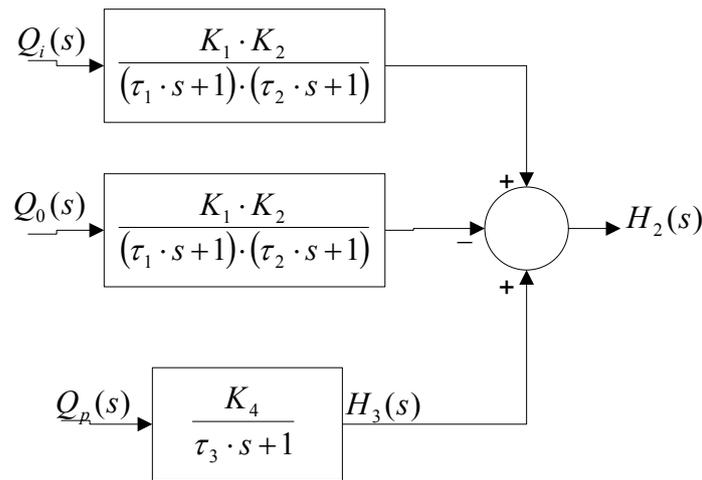


Figura 4.3. Modelamiento matemático: Diagrama de bloques del circuito de agua de perforación

4.2 MÉTODOS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL

Los sistemas de control pueden ser clasificados basándose en diferentes criterios, así pues, podemos tener las siguientes clasificaciones.

Según su dimensión:

- **Sistemas de parámetros concentrados.** Son aquellos que pueden ser descritos por ecuaciones diferenciales ordinarias. También son conocidos como sistemas de dimensión finita.
- **Sistemas de parámetros distribuidos.** Son aquellos que requieren ecuaciones en diferencia (ecuaciones diferenciales con derivadas parciales). También son conocidos como sistemas de dimensión infinita.

Según el conocimiento de sus parámetros:

- **Sistemas determinísticos.** En estos sistemas se conocen exactamente el valor que corresponde a los parámetros. Por ejemplo un circuito RLC encargado de suministrar tensión a un equipo.
- **Sistemas estocásticos.** En este caso, la forma de conocer algunos o todos los valores de los parámetros, es por medio de métodos probabilísticas. Por ejemplo un

horno o caldero que ha a acumulado sarro y otras impurezas, las cuales no tienen una función matemática conocida que puedan identificar al proceso.

Según el carácter de transmisión en el tiempo:

- **Sistemas continuos.** Son aquellos descritos mediante ecuaciones diferenciales, donde las variables poseen un valor para todo tiempo posible dentro de un intervalo de tiempo finito. Está referido a las señales analógicas y su comportamiento matemático es similar a una onda continua. Por ejemplo un proceso de llenado de balones de gas.
- **Sistemas discretos.** Son aquellos descritos mediante ecuaciones diferenciales y poseen valores solo para determinados instantes de tiempo, separados por intervalos dados por un período constante. Está referido a las señales digitales y su comportamiento matemático es similar a un tren de pulsos. Por ejemplo el encendido y apagado de un selector que acciona una alarma.

Según la presencia de linealidad:

- **Sistemas lineales.** Son aquellos cuyo comportamiento está definido por medio de ecuaciones diferenciales lineales, es decir, los coeficientes son constantes o funciones de la variable independiente. Deben cumplir con el principio de superposición. Por ejemplo un amplificador de señales.
- **Sistemas no lineales.** En caso de que una o más de las ecuaciones diferenciales no sean lineales, todo el sistema será no lineal. También se considerará como sistema no lineal a aquellos para los cuales el principio de superposición no sea válido. Por ejemplo el calentamiento de un horno.

Según el comportamiento en el tiempo:

- **Sistemas invariantes en el tiempo.** Ocurre cuando todos sus parámetros son constantes, por tanto se mantiene en un estado estacionario permanentemente. Se define por ecuaciones diferenciales cuyos coeficientes son constantes. Por ejemplo la mezcla de sustancias dentro de un tanque que siempre contiene la misma cantidad y tipo de elementos.

- **Sistemas variantes en el tiempo.** Ocurre cuando uno o más de sus parámetros varían en el tiempo, por lo tanto, no se mantiene en estado estacionario. Se define por ecuaciones diferenciales cuyos coeficientes son funciones del tiempo. Por ejemplo para un motor de un vehículo de carrera, la masa del vehículo va a variar por acción del consumo de combustible.

Según sus aplicaciones:

- **Sistemas servomecanismos.** Son aquellos en donde la variable controlada es la posición o el incremento de la posición con respecto al tiempo. Por ejemplo un mecanismo de control de velocidad o un brazo robótico.
- **Sistemas secuenciales.** Son aquellos en donde un conjunto de operaciones preestablecidas es ejecutada en un orden dado. Por ejemplo el arranque y parada de un motor o la conmutación delta-estrella de un motor.
- **Sistemas numéricos.** Esta referido a sistemas de control que almacenan información numérica, la cual incluye algunas variables del proceso codificadas por medio de instrucciones. Por ejemplo tornos, taladros, esmeriles, los cuales almacenan información referente a posición, dirección y velocidad.

En base a su principio de funcionamiento, los sistemas de control pueden emplear o no información acerca de la planta a fin de elaborar estrategias de supervisión y control. Se cuenta con dos métodos para el control de los sistemas, en lazo abierto y en lazo cerrado. El diseño de este proyecto se lo realiza con un sistema de control en lazo cerrado, donde se tiene la información del nivel y flujo del proceso, y mediante estos se toman las correspondientes acciones de control y monitoreo.

Un sistema de control de lazo abierto es aquel en el cual no existe retroalimentación del proceso al controlador. Su principal ventaja consiste en su facilidad para implementar, además son económicos, simples y de fácil mantenimiento. Sus desventajas consisten en que no son exactos, no corrigen los errores que se presentan y por consiguiente su desempeño depende de la calibración inicial.

4.2.1 Sistemas de control por retroalimentación

Un sistema de control se dice que funciona en lazo cerrado cuando recibe información del proceso por medio de las señales de los sensores/transmisores, y en función del valor de éstas, decide el valor de los actuadores; la utilización de información del proceso actualizada permite al sistema de control corregir sus acciones para compensar cualquier suceso imprevisto.

En un sistema de control con retroalimentación negativa, esta señal se resta de la señal de entrada, generando un error, el cual debe ser corregido por accionamiento del controlador. Este es el caso común utilizado en el campo del control de procesos industriales y su configuración se ilustra en la Figura 4.4.

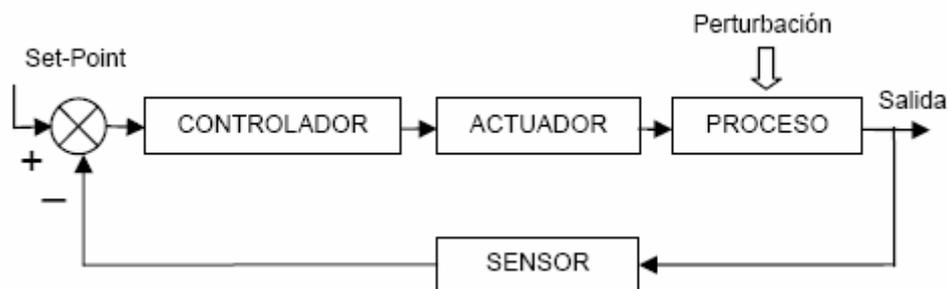


Figura 4.4. Sistema de control en lazo cerrado

El término lazo se refiere al hecho de que una vez introducida una señal de error al sistema, esta viaja por el lazo hasta que se reestablece el equilibrio. El propósito fundamental de un proceso de control automático a lazo cerrado es mantener la variable controlada igual a su valor de referencia. Por supuesto, el sistema de control automático empieza a trabajar una vez que aparece una señal de error. Esta se puede originar por una de tres siguientes causas posibles:

1. Cambios en el valor de referencia.
2. Cambios inesperados en el proceso.
3. Cambios en la carga.

Las causas 1 y 3 se refieren a acciones ejecutadas voluntariamente por el operador del sistema. La causa 2 es el resultado de factores propios del proceso y no necesariamente

causado por los operadores. Como quiera que sea, un buen diseño de un sistema de control automático debe ser capaz de devolver el estado de equilibrio al proceso que se desea controlar cada vez que ocurran cambios en él.

Cuando se genera una señal de error en un sistema de control automático, el controlador empieza a trabajar para restablecer el equilibrio; este llegará a reestablecerse un tiempo más tarde. Al tiempo de respuesta de un sistema de control automático, o al tiempo que tarda en reestablecer el equilibrio, se le llama respuesta dinámica. Algunos de los factores que retardan la respuesta dinámica son los siguientes:

1. El tiempo de respuesta de los instrumentos que constituyen el lazo de control, conocido comúnmente como *time lag*.
2. El tiempo que tarda la señal en viajar de un instrumento a otro.
3. La inercia de la variable controlada a cambiar su valor, conocido comúnmente como *pure lag*.
4. El tiempo que transcurre desde el momento en que la variable controlada sufre un cambio hasta que se inicia una acción correctiva, que se le denomina *dead time*.

4.2.1.1 Control de Encendido/Apagado o Control On/Off

Su funcionamiento se muestra en la Figura 4.5, donde se observa la señal sensada y la señal del controlador.

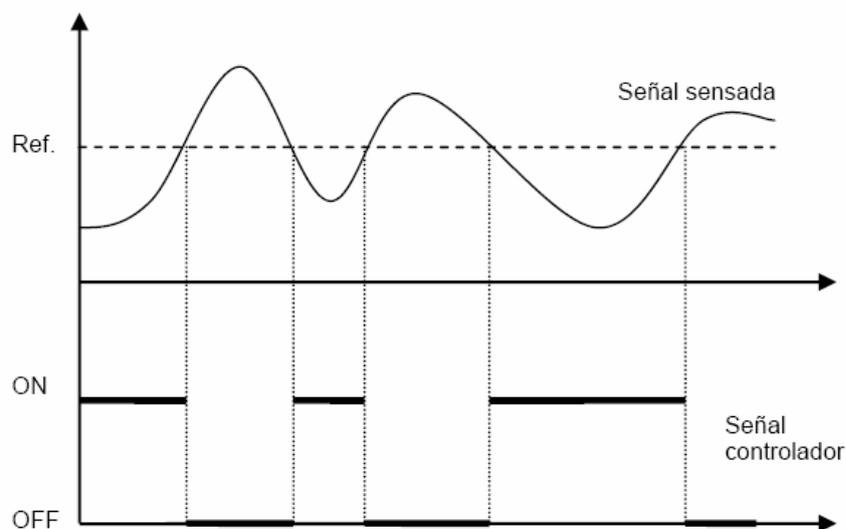


Figura 4.5. Funcionamiento del Control On/Off

Este tipo de sistema de control de dos posiciones se maneja con actuadores que tienen dos posiciones fijas, lo que significa que se controla la conexión y desconexión. Este tipo de controlador es bastante económico y simple, por esta razón su campo de aplicación es extenso dentro de los sistemas de control industrial. Si consideramos que $u(t)$ es la señal de salida del controlador y $e(t)$ la señal de error, en el controlador de encendido/apagado, la señal $u(t)$ permanece en un valor máximo o mínimo, como se ilustra en la Figura 4.6, según sea la señal de error positiva o negativa; de manera que:

$$u(t) = U_1 \quad \text{Para } e(t) > 0$$

$$u(t) = U_2 \quad \text{Para } e(t) < 0$$

Donde U_1 y U_2 son constantes.

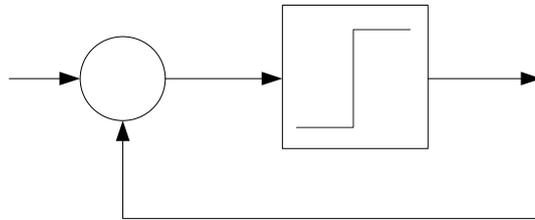


Figura 4.6. Diagrama de bloques del controlador On/Off

Existe una variación de este controlador, en donde la señal de error varía en un rango determinado antes de que se produzca la conmutación, se lo conoce como control On/Off con histéresis o de brecha diferencial. Dicha brecha hace que la salida del controlador mantenga su valor hasta que la señal de error haya rebasado ligeramente el valor de referencia, como se observa en la Figura 4.7. En algunos casos la brecha diferencial es el resultado de una fricción no intencional o movimiento perdido; sin embargo, su función es impedir la frecuente acción del elemento final de control o actuador, causando menos desgaste en el elemento y alargando su vida útil.

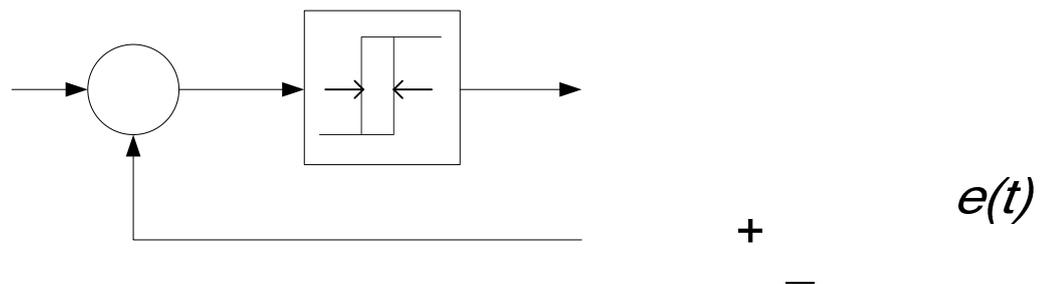


Figura 4.7. Diagrama de bloques del controlador On/Off con histéresis

4.2.1.2 Controlador proporcional (P)

Es un control que se basa en la ganancia aplicada al sistema, se fundamenta en el principio de que la respuesta del controlador deber ser proporcional a la magnitud del error. No corrige ni elimina perturbaciones, únicamente atenúa o aumenta la señal de error, como se observa en la Figura 4.8. Se representa a través del parámetro K_p y define la fuerza o potencia con que el controlador reacciona frente a un error.

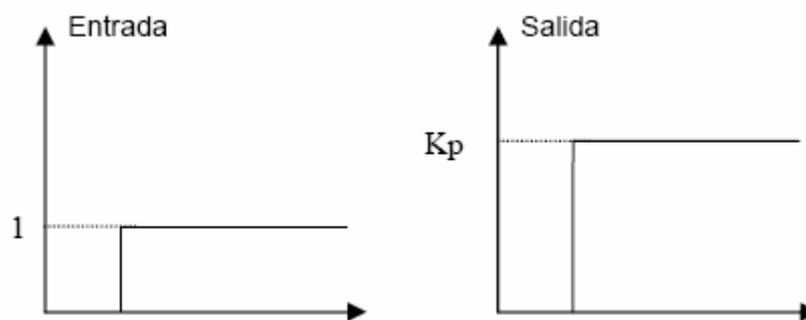


Figura 4.8. Funcionamiento del Control Proporcional

La ecuación que describe su funcionamiento es:

$$m(t) = \bar{m} + K_c \cdot e(t) \quad \text{Ecuación 4.17}$$

Donde: $m(t)$ representa la salida del controlador.

\bar{m} representa el valor de la salida del controlador cuando el error es cero.

K_c representa la ganancia del controlador.

$e(t)$ representa la señal de error y es la diferencia entre el valor de consigna y la variable que se controla, es decir, $e(t) = r(t) - c(t)$.

La ventaja de este tipo de controlador es que su único parámetro de ajuste es el valor de K_c , sin embargo, estos operaran con un error en estado estacionario o desviación causado por el ajuste de este parámetro; mientras mayor es el valor de K_c menor es su desviación pero a la vez la respuesta del proceso se hace mas oscilatoria e inestable. Su función de transferencia es la siguiente:

$$C_p(s) = K_c \quad \text{Ecuación 4.18}$$

Donde Kc es una ganancia proporcional ajustable. El controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (offset).

4.2.1.3 Controlador integral (I)

Es también conocido como reset. Este tipo de controlador anula errores y corrige perturbaciones, mediante la búsqueda de la señal de referencia, necesita de un tiempo Ti para localizar dicha señal, como se observa en la Figura 4.9. Se representa mediante el término Ki que es el coeficiente de acción integral y es igual a $1/Ti$

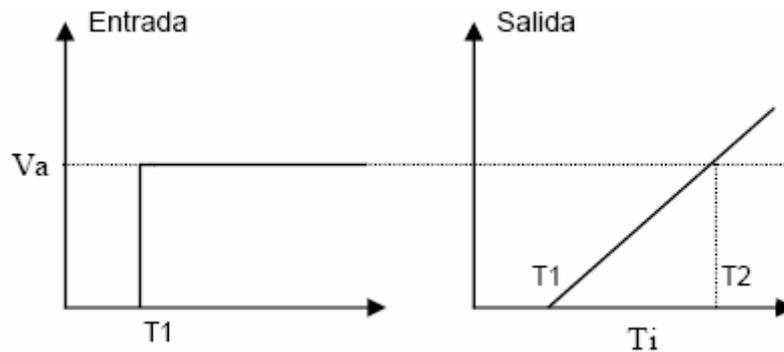


Figura 4.9. Funcionamiento del Integral

La ecuación que representa este controlador es la siguiente:

$$u(t) = Ki \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt \quad \text{Ecuación 4.19}$$

La función de transferencia del controlador es:

$$Ci(s) = \frac{Ki}{s} \quad \text{Ecuación 4.20}$$

La señal de control $u(t)$ tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error $e(t)$ es cero; por lo que se concluye, que dada una referencia constante o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero.

4.2.1.4 Controlador derivativo (D)

Conocido también como rate. Este controlador por sí solo no es utilizado, necesita estar junto al proporcional y al integral. Sirve para darle rapidez o aceleración a la acción de control. Necesita de una diferencial de tiempo Td para alcanzar la señal de referencia, como se ilustra en la Figura 4.10. Se representa mediante el término Kd que es el coeficiente de acción derivativa y es igual a $1/Td$.

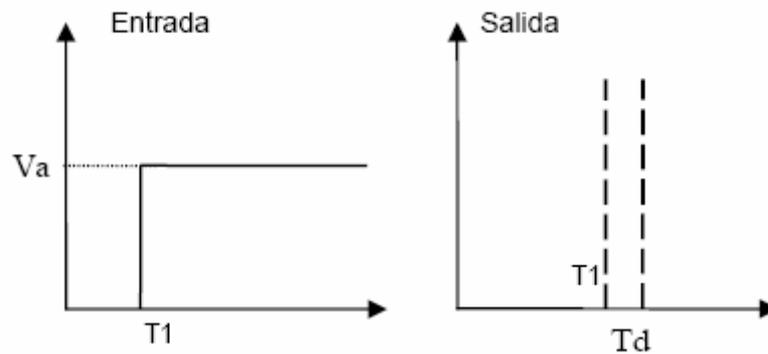


Figura 4.10. Funcionamiento del Control derivativo

4.2.1.5 Controlador proporcional-integral (PI)

Actúa en forma rápida, tiene una ganancia y corrige el error, no experimenta un offset en estado estacionario. Cuando los procesos no son controlables con la acción proporcional, es decir, exigen control en un punto determinado, este tipo de controlador elimina dicha desviación, agregando inteligencia al controlador proporcional gracias al reajuste en su función. Su ecuación de modelado esta descrita de la siguiente forma:

$$m(t) = \bar{m} + K_c \cdot e(t) + \frac{K_c}{\tau_1} \cdot \int e(t) \cdot dt \quad \text{Ecuación 4.21}$$

Donde: τ_1 representa el tiempo de integración o de reajuste.

Del análisis de la ecuación anterior podemos concluir que τ_1 es el tiempo que toma al controlador repetir la acción proporcional, por tanto, mientras menor es el valor de τ_1 , la respuesta del controlador se torna más rápida. La función de transferencia de este controlador es:

$$C_{PI}(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) \quad \text{Ecuación 4.22}$$

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero; con acción integral, un error pequeño positivo siempre nos dará una acción de control creciente, y si fuera negativo la señal de control será decreciente. Este razonamiento nos muestra que el error en régimen permanente será siempre cero; se puede demostrar que un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden, lo que puede ejecutarse mediante un ensayo al escalón.

4.2.1.6 Controlador proporcional-derivativo (PD)

Es estable y reduce los retardos, es decir, su acción es más fulminante. Este tipo de controladores se utilizan en los procesos que tienen la posibilidad de ser solucionados con la acción proporcional, pero el parámetro derivativo le agrega cierta cantidad de anticipación. Se describe mediante la siguiente ecuación:

$$m(t) = \bar{m} + K_c \cdot e(t) + K_c \cdot \tau_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 4.23}$$

Donde: τ_D representa la constante de tiempo de derivación

La desventaja de este controlador es que opera con una desviación en la variable que controla. Dicha desviación se puede corregir únicamente con la acción de integración, pero por otro lado, el controlador PD soporta mayor ganancia, lo que causa menor desviación comparado con un controlador que solo tiene acción proporcional. La función de transferencia de este controlador es la siguiente:

$$C_{PD}(s) = K_c + s \cdot K_c \cdot T_d \quad \text{Ecuación 4.24}$$

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Aunque el control derivativo no afecta en forma directa al error en estado estacionario, añade amortiguamiento al sistema y, por tanto, permite un

valor más grande que la ganancia K , lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable.

4.2.1.7 Controlador proporcional integral derivativo (PID)

Este controlador es el más completo y complejo, tiene una respuesta más rápida y estable siempre que este bien sintonizado. Este tipo de controlador tiene por objeto, el anticipar hacia donde se dirige el proceso, utilizando para ello la observación de la rapidez para el cambio del error. Su ecuación característica es la siguiente:

$$m(t) = \bar{m} + K_c \cdot e(t) + \frac{K_c}{\tau_i} \cdot \int e(t) \cdot dt + K_c \cdot \tau_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 4.25}$$

La función de transferencia de este controlador es la siguiente:

$$C_{PID}(s) = K_c \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) \quad \text{Ecuación 4.26}$$

Resumiendo se puede decir que; el control proporcional actúa sobre el tamaño del error, El control integral rige el tiempo para corregir el error y el control derivativo le brinda la rapidez a la actuación, volviéndolo anticipativo.

4.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL Y FLUJO DEL PROCESO

Un procedimiento básico para el diseño del sistema de control en tiempo real posee las siguientes etapas:

- Generación de especificaciones
- Diseño arquitectural
- Diseño de componentes
- Síntesis del diseño
- Pruebas

Para el desarrollo del procedimiento de diseño se tuvieron en cuenta varias consideraciones, las cuales están relacionadas con las plataformas de integración de la interface y los lenguajes de diseño y especificación. Para el caso del lenguaje de programación, se implementó el diseño del proyecto, con el uso del paquete TWIDOSoft; software de desarrollo gráfico para la creación, configuración y administración de aplicaciones para los controladores. Este sistema de programación esta basado en un ambiente de desarrollo amigable, brindando ventanas de programación, barras de herramientas, menús, ayuda de contexto, entre otras funciones que facilitan la programación según requerimientos.

Además la versatilidad de usar convenientemente programación basada en lógica de contactos o lista de instrucciones y compatibilidad con distintos protocolos de comunicación. En lo correspondiente a la plataforma de elaboración del HMI, se desarrolló el proyecto utilizando el software Intouch de la firma Wonderware. Este programa es extensible con capacidades gráficas que proveen flexibilidad para el diseño de aplicaciones con conectividad al más amplio rango de sistemas y dispositivos de automatización de la industria.

La arquitectura propuesta para el diseño y el desarrollo del HMI comprende tres niveles, como se muestra en la Figura 4.11:

- **Interface de usuario.** Las aplicaciones en este nivel se implementan en una computadora personal, utilizando la plataforma Intouch y sus paquetes de servicios en el sistema operativo Windows XP Profesional con Service Pack 2.
- **Protocolo de comunicaciones.** Para interconectar el controlador del sistema con la interfase HMI se selecciono el protocolo de comunicación MODBUS RTU, con el cual se logran retardos variables en la transmisión pero acotados y su comunicación es robusta y confiable.
- **Módulos de bajo nivel.** En este nivel se realizan las funciones de medición, y cálculo de acción de control y actuación. Para su implementación se integran el diseño de hardware-software que corresponde al acondicionamiento de las señales obtenidas por los sensores y las señales entregadas por el controlador a los elementos finales de control. La implementación de estas funciones se realiza sobre

el dispositivo lógico programable, de tal forma que garantice su robustez en el funcionamiento.

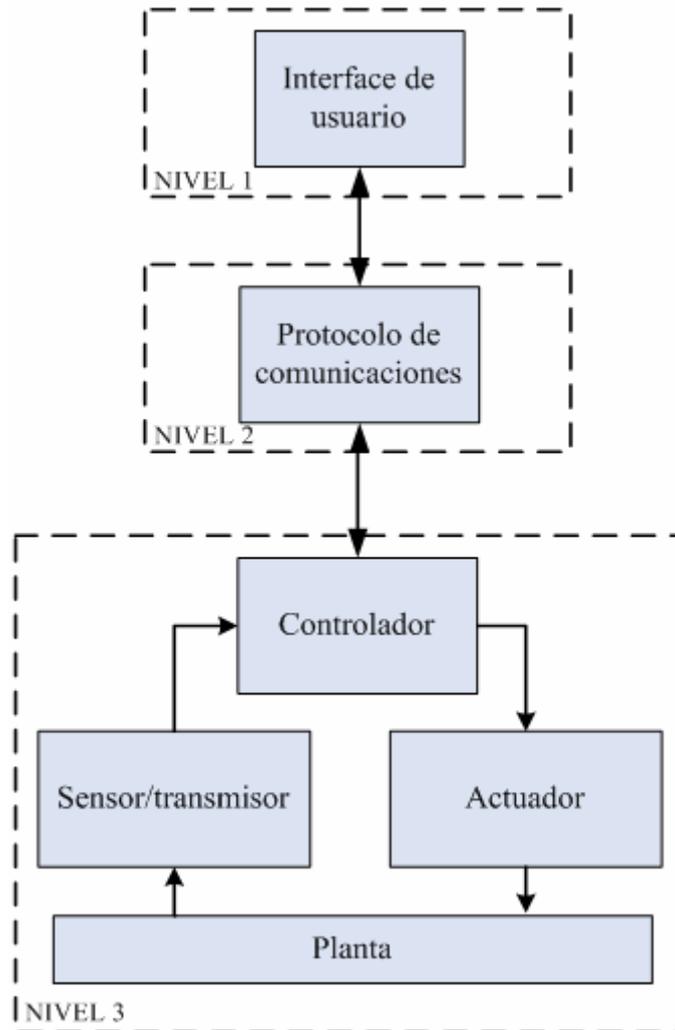


Figura 4.11. Arquitectura del sistema de control

4.3.1 Diseño del Sistema de Control de Nivel de Líquido

4.3.1.1 Consideraciones de diseño

El diseño del sistema de control de líquido para el circuito de agua de perforación, esta comprendido por dos etapas. La primera etapa corresponde al control de nivel en las tinas de acumulación de líquido para la perforación y la segunda etapa corresponde al control de nivel en la tina del líquido reciclado, que se ha sido previamente tratado y puede reutilizarse para el proceso de perforación.

La primera etapa comprende dos tinas de acumulación conectadas en serie, no interactivas, en donde el líquido proveniente de la vertiente natural es alojado en la primera tina, cuyo propósito es el de proveer agua constantemente hacia el sistema. Esta tina esta sensada por interruptores de nivel y la acción de control se la realiza a una bomba en servicio de descarga, que habilita el desalojo del líquido excedente en dicha tina, nuevamente hacia la vertiente de agua de donde se toma el líquido para el proceso. El control se lo realiza sobre esta bomba de desalojo de líquido, y no sobre una válvula que permita el ingreso del líquido hacia la tina desde la vertiente, debido al requerimiento del sistema, que utiliza una bomba de accionamiento mecánico mediante un motor de combustión para transportar el agua desde la vertiente hacia la primera tina de acumulación, en cuyo caso, al usar una válvula que controle el ingreso del líquido, la acción de obturación en dicho elemento causará problemas en el funcionamiento de la bomba que se encuentra permanentemente encendida, ocasionando calentamiento en el sistema y desgaste en los acoplamientos, lo que significa la reducción de la vida útil de este elemento. Por otra parte, la conveniencia de usar una bomba que trabaje sobre el excedente de agua, mejora y facilita el desempeño del circuito al no influir la presión excesiva en el dimensionamiento de los elementos de control.

La segunda tina de la etapa de acumulación del líquido, corresponde a la de dosificación de polímeros, floculantes y materiales para la lubricación y control dentro de la perforación. Al ser un sistema de tinas en serie no interactivo, el accionamiento de la bomba que controla el nivel en esta tina, no mezcla el líquido dosificado con el líquido de la anterior. En esta tina se censa el nivel mediante interruptores y su acción de control es llevada a cabo por una bomba en servicio de descarga, acoplada en el flujo de líquido que proviene de la primera tina.

La segunda etapa del circuito comprende el tratamiento de agua que se ha utilizado para la perforación y esta formado por un conjunto de tinas en serie, que aprovechan la topografía del terreno para el transporte del líquido de una tina hacia otra. El agua del proceso llega a una tina final de líquido tratado, el cuál puede ser realimentado hacia la primera tina para cumplir un nuevo ciclo dentro del proceso. Esta tina, al igual que en los dos casos anteriores, es sensada mediante interruptores de nivel y la acción de control es

realizada sobre una bomba de accionamiento eléctrico sumergible, en servicio de descarga, que transporta el líquido desde esta tina de agua tratada hacia la primera tina del circuito de agua de perforación.

De esta manera, el sistema de control de nivel de líquido esta formado por tres lazos de control, el primero que controla el nivel de líquido en la primera tina de acumulación y actúa sobre la bomba de desalojo; el segundo que controla el nivel de líquido en la tina de dosificación, que pertenece a la etapa de acumulación y actúa sobre la bomba que conecta al proceso entre estas dos tinas y finalmente, el tercer lazo de control que corresponde a la tina de agua tratada y actúa sobre la bomba que realimenta al circuito.

La operación del sistema de control de nivel de líquido se la realizará en dos modos, manual y automática, los cuales operaran sobre cada uno de los lazos de control y sus respectivos elementos finales antes mencionados. En el primer tanque de acumulación, el segundo tanque de dosificación y en el tanque del líquido reciclado de perforación se utilizará dos interruptores de nivel, respectivamente en cada tanque, que indican el nivel de líquido alto y nivel de líquido bajo.

Para el caso del control de líquido en el primer tanque en la operación manual, se considera que la bomba de desalojo no se active mientras no exista un nivel determinado de líquido en el tanque, por tanto, su operación podrá ser agilizada siempre y cuando el interruptor de nivel bajo en el tanque este activado. La consideración que se toma en cuenta, para la operación manual del control de líquido en el segundo tanque es que la bomba que activa el ingreso del líquido hacia este, no se ejecute mientras el interruptor de nivel bajo del primer tanque no este activado. De esta manera se garantiza que la bomba no actúe en vano y tenga los requerimientos mínimos necesarios para el funcionamiento en servicio de descarga.

La consideración que se toma en cuenta, en el caso del control del tanque de líquido reciclado en operación manual es que la bomba que realimenta al circuito no arranque, mientras el interruptor de nivel bajo en este tanque no se encuentre activado, de esta forma,

se garantiza el funcionamiento del elemento final de control únicamente cuando exista líquido en el tanque para la retroalimentación en el sistema.

En la operación automática del sistema de control de líquido, la consideración principal a tomar en cuenta es la actuación excesiva de los elementos finales de control, que resultan en el desgaste de su mecanismo y por ende, reducción de la vida útil del elemento. Por tanto, este diseño reduce dicho desgaste, manteniendo eficazmente el control en el sistema y reutilizando el líquido del proceso eficientemente. En lo que comprende al funcionamiento automático, el control del nivel en el primer tanque activa la bomba de desalojo, una vez que se haya encendido el interruptor de nivel alto y apaga la bomba de control cuando se desactive el interruptor de nivel bajo. Para el segundo tanque, la acción de control automático arranca cuando exista líquido en el primer tanque, es decir, el interruptor de nivel bajo del primer tanque este activado; si el nivel alto en el segundo tanque es activado, la bomba se apagará automáticamente hasta que el nivel bajo del segundo tanque sea desactivado. Para el tanque de líquido reciclado, la bomba de realimentación arranca, una vez que el interruptor de nivel alto de este tanque se active y se detiene cuando el interruptor de nivel bajo del tanque de líquido reciclado se desactive.

4.3.2 Diseño del Sistema de Control de Flujo de Líquido

4.3.2.1 Consideraciones de diseño

Este sistema de control, garantiza un flujo constante sobre el proceso dentro del sistema, que permite lubricar la herramienta de perforación, enfriar la corona de la herramienta y eliminar los detritos que se obtienen en la perforación. El sistema requiere un control de flujo con una tolerancia de hasta el 1%, caracterizado por los parámetros del elemento de medición y del elemento final de control. Un sensor de flujo cuya operación esta basada en la variación de temperatura, esta acoplado a la tubería que alimenta el sistema de inyección de agua de la maquina de perforación. La señal de control actúa sobre una bomba sumergible, localizada en el segundo tanque del circuito y su funcionamiento permite el flujo controlado del líquido hacia el rig de perforación. Con las condiciones planteadas, el controlador que se utiliza para el diseño es uno de tipo PI, para

lo cuál, se obtuvo el comportamiento del sistema y con estos datos se consiguió la sintonización del controlador.

El método de ajuste de las ganancias del controlador PI utilizado es el de Ziegler y Nichols y esta basado en la curva de reacción o método de respuesta al escalón como se muestra en la Figura 4.12; y se resume en ensayar al sistema un lazo abierto con un escalón unitario, en donde se calculan los parámetros, como la máxima pendiente de la curva y el retardo, y con ellos establecemos las ganancias del controlador. Este método es experimental y se lo obtiene mediante el siguiente procedimiento:

1. Con el sistema en lazo abierto, se lleva a la planta a un punto de operación normal, es decir que la salida de la planta se estabiliza en $y(t) = y_0$ para una entrada constante $u(t) = u_0$.
2. En el instante inicial t_0 , se aplica un cambio en la entrada escalón, desde u_0 a u_∞ , en un rango de 10 al 20% de rango completo.
3. Se registra la salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación. Esta curva se la denomina de reacción del proceso. Se calcula los parámetros del modelo de la siguiente forma:

$$K_0 = \frac{y_\infty - y_0}{y_\infty - u_0}; \quad \tau_0 = t_1 - t_0; \quad \nu_0 = t_2 - t_1$$

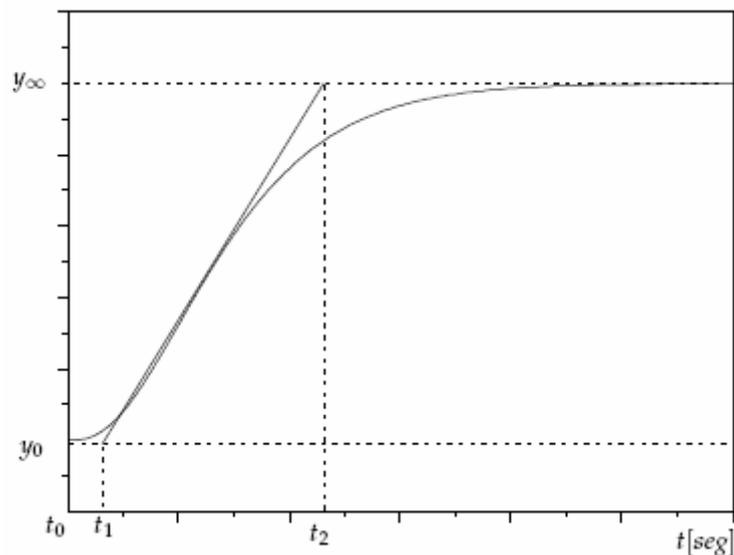


Figura 4.12. Parámetros de la respuesta al escalón de una planta

El modelo obtenido puede ser utilizado para varios métodos de ajuste de controladores PID. El propuesto para el controlador es el de Ziegler - Nichols y el objetivo del diseño es alcanzar un amortiguamiento tal que exista una relación de 4:1 para el primer y segundo pico de la respuesta a una referencia escalón.

Para la obtención de los datos con los que se trata el proceso de desarrollo del controlador, se utiliza las herramientas Historical Trend de Intouch V 9.5, el cual nos brinda la posibilidad de adquirir los datos mediante la aplicación HistData e importarlos hacia EXCEL para su tratamiento. El comportamiento de curva basada en este método experimental de sintonización es el que se indica en la Figura 4.13.

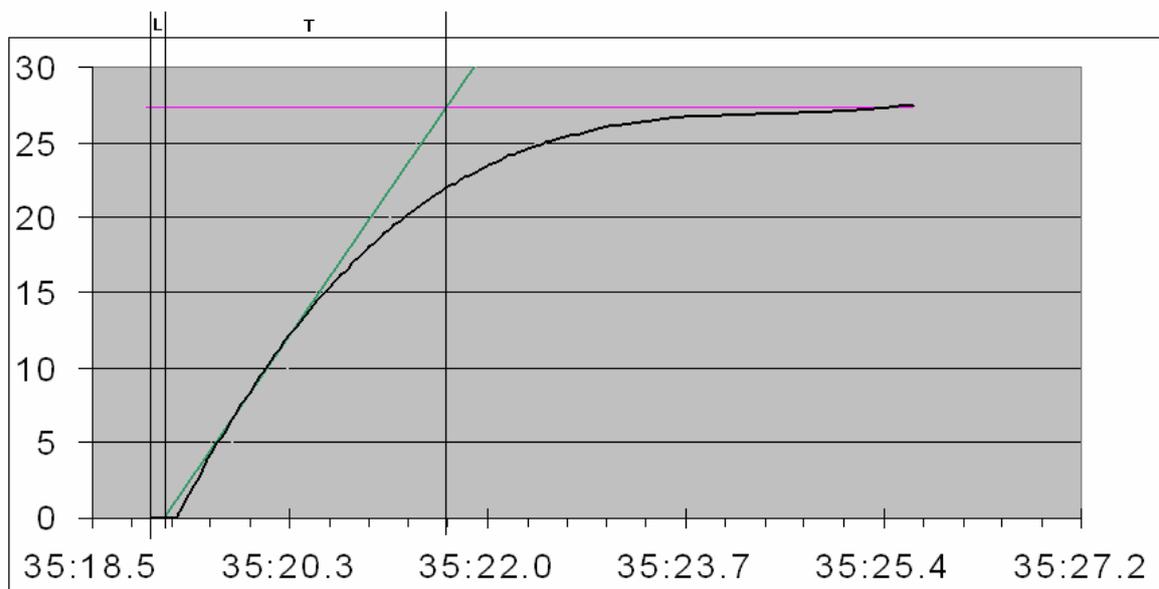


Figura 4.13. Comportamiento de la planta mediante método Ziegler y Nichols

De donde se obtiene los valores que corresponden al retardo y la constante de tiempo, al trazar una tangente al punto de inflexión de la curva.

$$L = 0.18 \text{ s}$$

$$T = 2.52 \text{ s}$$

Reemplazando estos valores para la obtención de los parámetros de sintonización del controlador se obtiene:

$$K_p = 0.9 \left(\frac{T}{L} \right) \quad \text{Ecuación 4.27}$$

$$K_i = \frac{0.3}{L} \quad \text{Ecuación 4.28}$$

$$K_p = 0.9 \left(\frac{2.52}{0.18} \right) = 1.26 \approx 1.3$$

$$K_i = \frac{0.3}{0.18} = 1.67$$

$$T_i = \frac{1}{K_i} = 0.95 \approx 1$$

4.4 DIAGRAMA DE INSTRUMENTACION Y PROCESO

ANEXO 5

CAPÍTULO 5

EL CONTROLADOR PROGRAMABLE

5.1 SELECCIÓN DEL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE PARA EL SISTEMA

Las funciones del controlador para las que ha sido diseñado el Sistema de Control de Nivel y Flujo de líquido, deben cumplir con las siguientes características básicas:

- Detección y lectura de las señales que envían los sensores-transmisores
- Desarrollo del funcionamiento del algoritmo de control y envío de las acciones de mando y control al sistema, a través de los actuadores y preactuadores mediante el acondicionamiento de las distintas señales.
- Conservación de un diálogo con los operarios, informando el estado del proceso y detectando fallas posibles en el sistema
- Capacidad de ser reprogramado con un nuevo algoritmo de supervisión y control

De igual manera, el conjunto de elementos que conforman el sistema automatizado deben interactuar y desempeñar funciones de carácter general para todo el sistema, estas son:

- Establecer comunicaciones entre las diversas partes del sistema, así como la comunicación con otros sistemas
- Realizar tareas de supervisión y detección de fallas
- Controlar tanto procesos continuos, como procesos discretos
- A través de un bus de campo o interfaz de comunicación, deben recoger la información de procesos remotos

Con estos criterios de funcionamiento, se encuentra en el mercado una gran gama de dispositivos que cumplen con las características especificadas. Podemos contar con

soluciones basadas en diseños propios con microcontroladores y el acondicionamiento de sus periféricos, pasando por sistemas basados en Controladores Lógicos Programables hasta soluciones con Controladores de Automatización Programables (PACs). La selección del dispositivo se la realiza a través del análisis de los factores de dimensionamiento requerido para el sistema, las características del proceso en su ambiente de desarrollo, funciones requeridas para las acciones de control y el presupuesto asignado para el desarrollo del proyecto.

Partiendo de este análisis, se descarta las soluciones de control basados en diseños propios con microcontroladores por las siguientes razones:

- Garantizar al Sistema de Control la robustez y confiabilidad para su desempeño en un ambiente hostil de trabajo, considerando las condiciones ambientales y físicas del proceso
- El tiempo requerido en probar y acondicionar el diseño para que cumpla todas las características de funcionamiento

En lo que corresponde a Controladores mas avanzados como los PACs, se descarta su utilización por las siguientes razones:

- Sus características de funcionamiento son de gama alta, y en general su funcionalidad esta sobredimensionada para el sistema de control planteado para el proceso
- El precio de este controlador no justificaría su inversión, frente a otras tecnologías que resuelven el criterio de control planteado
- El acceso a la adquisición, manejo y mantenimiento de estos dispositivos aún es limitado en el mercado local

Uno de los autómatas que se adapta a los parámetros planteados para el sistema es un Controlador Lógico Programable de la familia TELEMECANIQUE, modelo TWIDO, bajo los siguientes factores.

5.1.1 Factores Cuantitativos. Toma en consideración factores numéricos y de cantidad.

- **Entradas y Salidas:** Se debe determinar la cantidad de señales de entrada y salida que existan en el sistema y que merezcan conectarse al controlador, luego se debe determinar si las entradas/salidas son de tipo analógico o de tipo discreto. Conocida la cantidad, a este total se le debe agregar entre 10 y 20% adicional (reserva para futuras ampliaciones). Dependiendo de la ubicación de los elementos que van conectados al controlador, puede darse el caso que se encuentren lejanos por lo que se presentará problemas de atenuación y ruido en el cableado; frente a esto se puede optar por el control distribuido, es decir, colocar varios controladores en distintos puntos de las instalaciones, y cada sistema manejará un determinado número de entradas/salidas. Para el Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo se utiliza 26 entradas/salidas conformadas de la siguiente manera:
 - 14 entradas discretas a 24VDC: 8 para los dispositivos de control del panel en el proceso y 6 para los interruptores de nivel de los tanques.
 - 10 salidas discretas para relay a 2A: 3 para las bombas que realizan el Control de Nivel del líquido del Sistema y 7 para las luces indicadoras de los controles y alarmas.
 - 1 entrada analógica con señal de transmisión de corriente de 4 a 20mA: que se transmite desde el sensor de flujo del sistema que toma los datos del líquido que proviene de la perforación.
 - 1 salida analógica de 0 a 10VDC: que se envía al preactuador para el control de flujo de la bomba que libera el líquido hacia la perforación.
- **Memoria:** Se debe considerar la memoria del sistema y la memoria lógica. La cantidad de memoria del sistema esta directamente ligado al número de entradas y salidas y al tipo de estas, así tenemos que una entrada/salida digital ocupa 1 bit de información, mientras que una entrada/salida analógica ocupa 16 bits. La memoria lógica esta referida a la cantidad de información que se debe de almacenar a raíz del algoritmo de control, cada instrucción va a sumar 1 ó 2 bytes, pero los comandos de mayor jerarquía (timers, contadores, sumadores, conversores, etc.) necesitarán más memoria.
- **Alimentación:** Dependiendo de la cantidad de módulos de entrada/salida que se tenga que gestionar, el autómatas requerirá mayor nivel de amperaje a un voltaje constante, por cuanto la fuente de alimentación debe estar planificada para soportar dicho requerimiento de corriente.

- **Periféricos:** Hay que considerar que el autómata puede conectarse a dispositivos externos, para lo cual debe contar con los puertos necesarios para la conexión. La flexibilidad de este autómata permite conectar impresoras, monitores, unidades de memoria, visualizadores, módems, módulos de comunicación e interfaces.

5.1.2 Factores Cualitativos. Toma en consideración factores de calidad, calidad, desempeño y modo de trabajo.

- **Condiciones físicas y ambientales:** El ambiente de trabajo en donde debe operar el autómata es determinante cuando se debe elegir la confiabilidad y robustez del equipo, puesto que un componente de mayor calidad es más costoso, la planificación debe considerar no sobreestimar las condiciones del ambiente (polvo, humedad, temperatura) y requerir un equipo de mucha mayor robustez al realmente necesitado. En general los fabricantes realizan una serie de pruebas cuyos resultados se reflejan en las características técnicas de los equipos como rango de temperatura de trabajo y almacenaje, vibración soportada, nivel de interferencia, humedad, tipo de carcasa, entre otros.
- **Tipo de control:** Determinar el tipo de control a emplear es una función de las estrategias de control y dependerá de la complejidad del proceso, así como de la necesidad de contar con backups. El autómata TWIDO cuenta con bloques de funciones especiales para el control de las variables, tales como contadores rápidos, funciones PWM, funciones especiales de entradas/salidas, bloques de operación PID.
- **Comunicaciones:** Tomando en cuenta la gran gama de dispositivos de hardware, software y protocolos de transferencia, se busca un entorno orientado al control supervisado y adquisición de datos, que permita la comunicación entre diferentes dispositivos pero a la vez que se garantice un diálogo robusto y transparente. Twido maneja tres distintas comunicaciones: Modbus, ASCII y Remote Link. En las comunicaciones basadas en Modbus este autómata brinda la posibilidad de manejo bajo el protocolo serial Modbus RTU o bajo Modbus TCP/IP.
- **Servicios adicionales:** Esta dado por las ventajas adicionales con las que cuenta un equipo en relación a otro. Twido cuenta con un software de programación más amigable, comprensible, con un entorno gráfico y ayudas interactivas; ciertos equipos pueden dar una mayor garantía, que cubre más situaciones de operación o

simplemente cubren por un mayor lapso de tiempo. El trato del suministrador también es importante a la hora de decidirse por un equipo u otro, además los proveedores pueden brindar recursos gratuitos de capacitación para el personal a cargo, asistencia técnica y mantenimiento permanente; disponibilidad en stock dentro del país en el producto así como de los componentes internos (repuestos, en caso sea necesario una reparación).

- **Compatibilidad:** En algunos casos se preferirá equipos de tipo estándar, mientras que en otros casos será necesario equipos de tipo propietario. La elección del equipo en cuanto a su compatibilidad estará ligada a los demás equipos involucrados dentro de la planta.

Los autómatas son unidades de control, conformadas por dispositivos eléctricos y electrónicos, los cuales cuentan con cableado interno independiente del proceso a controlar (hardware). Mediante algoritmos y funciones programadas se define la estrategia a seguir para controlar un proceso (software). Estos equipos son conectados hacia los dispositivos de medida de las variables que se involucran en el proceso y hacia los dispositivos encargados de realizar las acciones de control.

Una vez que el autómata está provisto de un algoritmo en su memoria, y que además cuenta con las conexiones respectivas hacia los equipos de la planta, se convierte en el cerebro del sistema, teniendo a su cargo el desempeño y funcionamiento del proceso; los operarios deberán supervisar que este se comporte tal como se había planificado en el diseño y conforme a la lógica ideada por el programador.

5.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y FUNCIONAMIENTO

5.2.1 Información General. El controlador TWIDO que cumple con los requerimientos para el proyecto es el modelo compacto TWD LCAA 24DRF de 24 entradas/salidas, que además puede extenderse con módulos adicionales. Para el caso del diseño, se utilizará un módulo de entradas/salidas analógicas que se manipula en la entrada del sensor de flujo que transmite una señal de 4 a 20 mA o 0 a 10VDC; y para una salida al preactuador de la bomba que admite una señal de 0 a 10 VDC.

Las Bases Compactas son alimentadas a 100/240 VAC y suministran la tensión de 24 VDC necesaria para alimentar las entradas y sensores. En la parte frontal se puede instalar un visualizador numérico, disponen de un slot para instalar un cartucho de memoria EEPROM de 32 Kb o un reloj calendario y un slot para añadir un segundo puerto serie RS 232C / RS 485. La Base Compacta de 24 E/S puede ampliarse con módulos de entradas/salidas discretas y analógicas, con un número máximo de 4 módulos.

Las características técnicas y de funcionamiento del autómeta TWIDO se encuentran en su totalidad especificadas en las hojas técnicas correspondientes a este dispositivo.

5.3 CONFIGURACIÓN DEL CONTROLADOR

La configuración del controlador TWD LCAA 24DRF y del módulo de entradas/salidas analógicas TWD AMM 6HT se encuentra especificada en las hojas técnicas del dispositivo en el apartado de configuración del controlador.

5.4 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN TWIDO SUITE

TwidoSuite es un entorno de desarrollo gráfico, con funciones para crear, configurar y mantener aplicaciones de automatización para los controladores programables Twido de Telemecanique. TwidoSuite permite crear programas con distintos tipos de lenguaje, después de transferir la aplicación para que se ejecute en un autómeta. TwidoSuite es un programa basado en Windows de 32 bits para un ordenador personal, que se ejecuta en los sistemas operativos Microsoft Windows 2000, XP Professional o Vista.

Las principales funciones del software TwidoSuite son:

- Interface de usuario intuitiva y orientada a proyectos
- Diseño de software sin menús. Las tareas y funciones del paso seleccionado de un proyecto siempre se encuentran visibles
- Soporte de programación y configuración

- Comunicación con el autómata
- Ayuda de primera mano acerca del nivel de tareas que ofrece enlaces relevantes a la ayuda en línea

5.4.1 Configuración mínima

La configuración mínima necesaria para utilizar TwidoSuite es la siguiente:

- Se recomienda un equipo compatible con PC y procesador Pentium a 466 MHz o superior
- Se recomiendan 128 MB de RAM o más
- 100 MB de espacio libre en el disco duro
- Sistema operativo: Windows 2000, Windows XP o Windows Vista
- Evite el uso de los parches 834707-SP1 (corregido por el parche 890175) y 896358 que producen problemas de visualización en la ayuda en línea
- Se recomienda Service Pack 2 o superior

Un autómata programable lee entradas, escribe salidas y resuelve lógica basada en un programa de control. La creación de un programa de control para un autómata Twido consiste en escribir una serie de instrucciones en uno de los lenguajes de programación

Para crear programas de control Twido pueden utilizarse los siguientes lenguajes de programación:

- Lenguaje Instruction List o Lista de instrucciones: Un programa Lista de instrucciones o IL se compone de una serie de expresiones lógicas escritas como una secuencia de instrucciones booleanas.
- Ladder Diagrams o Diagramas de contactos: Un diagrama Ladder es una forma gráfica de mostrar una expresión lógica, basada en contactos y bobinas.
- Lenguaje Grafcet: El lenguaje Grafcet está compuesto por una sucesión de pasos y transiciones. Twido admite las instrucciones de lista Grafcet, pero no Grafcet gráfico.

Se puede utilizar un ordenador personal (PC) para crear y editar programas de control Twido mediante estos lenguajes de programación. La función de reversibilidad de Lista/Ladder Logic permite pasar un programa de Lista a Ladder y viceversa, según convenga.

Las descripciones técnicas y de funcionamiento correspondientes a la programación en el Lenguaje TwidoSuite, se encuentran detalladas en la porción de Especificaciones de Software en las hojas técnicas del autómata Twido.

5.5 PROGRAMACIÓN BASADA EN LÓGICA DE ESCALERA

Los diagramas Ladder o Escalera son similares a los diagramas lógicos de relee que representan circuitos de control de relee. Las principales diferencias entre los dos son las funciones de la programación de la lógica de escalera, en donde, todas las entradas están representadas por símbolos de contactos, todas las salida están representadas por símbolos de bobinas y las operaciones numéricas están incluidas en el conjunto de instrucciones de lógica gráficas.

Un programa en lenguaje de diagrama ladder está formado por "escalones", que representan el conjunto de instrucciones gráficas y aparecen entre dos barras verticales. El controlador ejecuta los escalones de forma secuencial y el conjunto de instrucciones gráficas representa las funciones Entradas/salidas del controlador (botones de comando, sensores, relees, luces pilotos), funciones del controlador (temporizadores, contadores, PID), operaciones lógicas y matemáticas (adición, división, AND, XOR), Operadores de comparación y variables internas del controlador.

5.5.1 Reticulado de programación

Estas instrucciones gráficas se organizan con conexiones horizontales y verticales que conducen a una o varias salidas o acciones. Los escalones no admiten más de un grupo de instrucciones vinculadas. Cada escalón de Ladder se compone de un reticulado de siete

filas por once columnas organizadas en dos áreas como se muestra en la siguiente ilustración de la Figura 5.1.

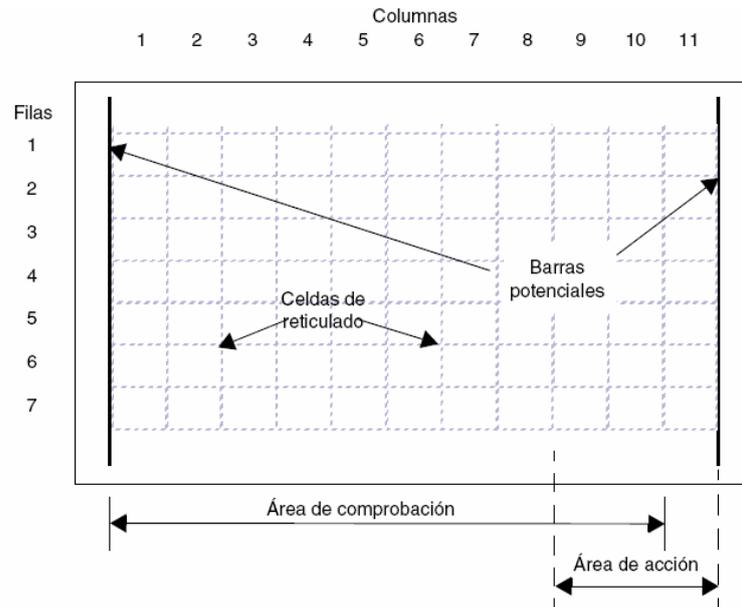


Figura 5.1. Reticulado para la programación Ladder

El reticulado de programación del diagrama Ladder está dividido en dos áreas:

- Área de comprobación: Contiene las condiciones que se prueban para realizar acciones. Se compone de las columnas de 1 a 10 y contiene contactos, bloques de función y bloques de comparación.
- Área de acción: Contiene la salida u operación que será realizada según sean los resultados de las pruebas llevadas a cabo en el área de comprobación. Se compone de las columnas de 8 a 11 y contiene bobinas y bloques de operación.

La programación consiste en introducir instrucciones en las celdas del reticulado. Las funciones, comparaciones e instrucciones de prueba se introducen en celdas en el área de comprobación y se alinean a la izquierda. La lógica de prueba proporciona continuidad al área de actividad donde se introducen bobinas, operaciones numéricas e instrucciones de flujo del programa y se justifican a la derecha. El escalón se soluciona o ejecuta (pruebas realizadas y salidas asignadas) dentro del reticulado de arriba a abajo y de izquierda a derecha.

5.5.1.1 Secciones y subrutinas. Cada sección/subrutina se compone de un encabezado de sección con un número de sección (que el programa asigna automáticamente), etiqueta de sección/subrutina, un título de sección/subrutina definido por el usuario y cuatro líneas de comentarios del usuario. Además de una secuencia de escalones debajo del encabezado de sección/subrutina.

5.5.1.2 Cabeceras de escalón. Además del escalón, una cabecera de escalón aparece directamente por encima del escalón. La cabecera de escalón se utiliza para documentar el propósito lógico del escalón y contiene la siguiente información:

- Número de escalón
- Etiquetas (%Li)
- Título de escalón
- Comentarios de escalón

5.5.1.3 Bloques de diagramas Ladder. Los diagramas Ladder están compuestos por bloques que representan el flujo de programas y las funciones, conteniendo los siguientes elementos:

- Contactos
- Bobinas
- Instrucciones de flujo de programas
- Bloques de función
- Bloques de comparación
- Bloques de operación

5.5.1.4 Contactos, bobinas y flujo de programas. Las instrucciones contactos, bobinas y flujo de programas (saltar y llamadas) ocupan una única celda en el reticulado de programación de Ladder. Los bloques de función, comparación y operación ocupan varias.

5.5.1.5 Bloques de función. Los bloques de función están ubicados en el área de comprobación del reticulado de programación. El bloque debe aparecer en la primera fila; no deberían aparecer instrucciones Ladder ni líneas de continuidad por encima ni por debajo del bloque de función. Las instrucciones de prueba Ladder llevan al lateral de

entrada del bloque y las instrucciones de prueba o acción llevan al lateral de salida del bloque. Los bloques de función están colocados en vertical y ocupan dos columnas en cuatro filas del reticulado de programación.

5.5.1.6 Bloques de comparación. Los bloques de comparación están ubicados en el área de comprobación del reticulado de programación. El bloque puede aparecer en cualquier fila o columna del área de comprobación siempre que la longitud completa de la instrucción esté en esta área. Los bloques de comparación están colocados en horizontal y ocupan dos columnas en una fila del reticulado de programación.

5.5.1.7 Bloques de operación. Los bloques de operación están ubicados en el área de acción del reticulado de programación. El bloque puede aparecer en cualquier fila del área de acción. La instrucción está justificada a la derecha; aparece en la derecha y termina en la última columna. Los bloques de operación están colocados en horizontal y ocupan cuatro columnas en una fila del reticulado de programación.

5.6 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN MODBUS MASTER/SLAVE RTU/ASCII

Twido ofrece un puerto serie para las comunicaciones con autómatas de E/S remotas, autómatas Peer o dispositivos generales. Cualquier puerto, si hay más de uno, puede utilizarse para cualquier servicio, excepto la comunicación con TwidoSuite, que sólo puede realizarse mediante el primer puerto. Cada autómata Twido admite tres protocolos base distintos: conexión remota, ASCII o Modbus (master de Modbus o slave de Modbus). Asimismo, los autómatas tienen la opción de usar el módulo de comunicación Ethernet RJ45; este admite el protocolo cliente/servidor TCP/IP de Modbus para comunicaciones peer-to-peer entre autómatas de la red Ethernet.

Modbus es un protocolo en configuraciones master/slave, que permite a un master, y sólo a uno, solicitar respuestas de los slaves o actuar dependiendo de la solicitud. El master puede dirigirse a los slaves individuales o iniciar un mensaje de difusión para todos los slaves. Los slaves devuelven un mensaje (respuesta) a las solicitudes que se les envían individualmente. No se devuelven respuestas a las solicitudes de difusión del master. En

una red RS485 puede haber un máximo de 32 equipos sin repetidores (1 master y hasta 31 slaves) y sus direcciones pueden estar comprendidas entre 1 y 247.

Master de Modbus. El modo master de Modbus permite al autómatas Twido enviar una solicitud Modbus a un slave y esperar su respuesta. El modo master de Modbus sólo se admite a través de la instrucción "EXCH". El modo master de Modbus admite ASCII Modbus y RTU Modbus.

Slave de Modbus. El modo slave de Modbus permite al autómatas Twido responder a solicitudes Modbus realizadas desde un master de Modbus y es, además, el modo de comunicaciones predeterminado si no se ha configurado otro tipo de comunicación. El autómatas Twido admite los datos Modbus y las funciones de control estándar y las ampliaciones de servicio para el acceso a objetos. El modo slave de Modbus admite ASCII Modbus y RTU Modbus.

Cada autómatas Twido tiene un puerto terminal EIA RS485 integrado, con su propia fuente de alimentación interna, en el puerto 1. El puerto EIA RS232C del PC se puede conectar al puerto 1 del autómatas Twido con el cable TSX PCX1031. Este cable convierte las señales comprendidas entre EIA RS232 y EIA RS485. El cable TSX PCX1031 incorpora un conmutador rotativo de cuatro posiciones para seleccionar distintos modos de funcionamiento. El conmutador designa las cuatro posiciones como "0-3" y el ajuste apropiado de TwidoSuite para el autómatas Twido es la posición 2. La configuración del protocolo de comunicación se ilustra en la Figura 5.2.

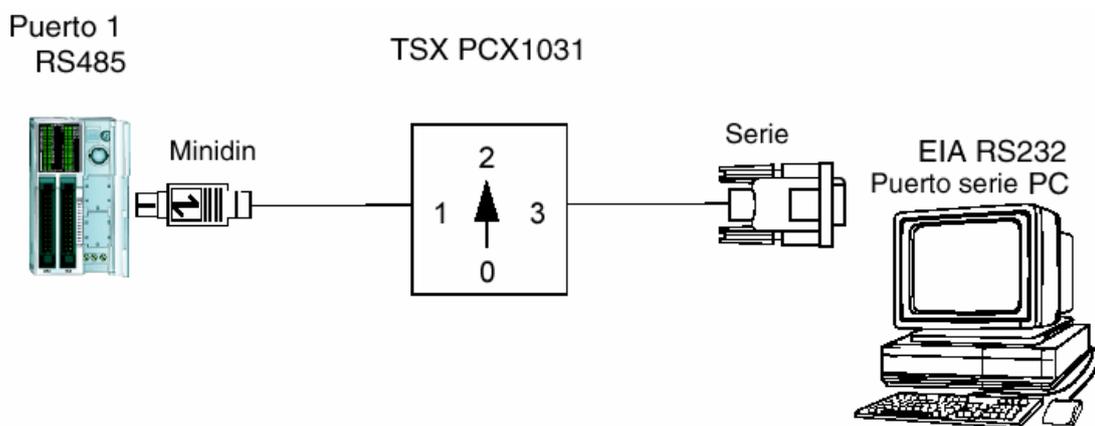


Figura 5.2. Comunicación autómatas/PC mediante cable de transmisión serial

5.6.1 Comunicaciones ASCII

El protocolo ASCII proporciona a los autómatas Twido un protocolo de modo de caracteres semidúplex simple que permite transferir o recibir datos mediante un simple dispositivo. Este protocolo se admite mediante la instrucción EXCHx y se controla mediante el bloque de función %MSGx. Pueden utilizarse los tres tipos de comunicaciones siguientes con el protocolo ASCII:

- Sólo transmisión
- Transmisión/recepción
- Sólo recepción

El tamaño máximo de las tramas transmitidas o recibidas por medio de la instrucción EXCHx es de 256 bytes. Puede establecerse una conexión ASCII en el puerto EIA RS232 o EIA RS485 y puede ejecutarse en un máximo de dos puertos de comunicación al mismo tiempo. La tabla de palabras asociada a la instrucción EXCHx está formada por tablas de control, de envío y de recepción.

Tabla 5.1. Control, envío y recepción para comunicaciones ASCII

	Byte más significativo	Byte menos significativo
Tabla de control	Comando	Longitud (envío/recepción)
	Reservado (0)	Reservado (0)
Tabla de envío	Byte 1 enviado	Byte 2 enviado
	Byte n enviado
	Byte n+1 enviado	
Tabla de recepción	Byte 1 recibido	Byte 2 recibido
	Byte p recibido
	Byte p+1 recibido	

Tabla de control. El byte de longitud contiene la longitud de la tabla de envío en bytes (250 máx.), sobrescrita por el número de caracteres recibidos al final de la recepción, en

caso de que ésta se solicite. El byte de comando debe contener uno de los siguientes elementos:

- 0: Sólo transmisión
- 1: Envío/recepción
- 2: Sólo recepción

Tablas de envío / recepción. En el modo de sólo envío, las tablas de control y de envío se completarán antes de la ejecución de la instrucción EXCHx y pueden ser de tipo %KW o %MW. No se necesita ningún espacio para recibir los caracteres en el modo de sólo envío. Una vez que se han enviado todos los bytes, %MSGx.D se establece en 1 y se puede ejecutar una nueva instrucción EXCHx.

En el modo de envío o recepción, las tablas de control y de envío se completarán antes de la ejecución de la instrucción EXCHx y deben ser de tipo %MW. Se necesita espacio para un máximo de 256 bytes de recepción al final de la tabla de envío. Una vez que se han enviado todo los bytes, el autómata Twido cambia al modo de recepción y está preparado para recibir bytes.

En el modo de sólo recepción, la tabla de control se completará antes de la ejecución de la instrucción EXCHx y debe ser de tipo %MW. Se necesita espacio para un máximo de 256 bytes de recepción al final de la tabla de control. El autómata Twido pasa inmediatamente al modo de recepción y está preparado para recibir bytes.

La recepción finaliza una vez que se recibe el último byte utilizado para la trama o se llena la tabla de recepción. En este caso, aparece un error de desbordamiento en la tabla de recepción en la palabra %SW63 y %SW64. Si se configura un timeout diferente a cero, la recepción finaliza cuando termina el timeout. Si selecciona un timeout de valor cero, no habrá ningún timeout de recepción. Por lo tanto, para detener la recepción, deberá activar la entrada %MSGx.R.

5.6.2 Comunicaciones Modbus

Modbus es un protocolo master/slave que permite a un único master solicitar respuestas de los slaves o realizar acciones dependiendo de las solicitudes. El master puede dirigirse a los slaves individuales o iniciar un mensaje de difusión para todos los slaves. Los slaves devuelven una respuesta a las solicitudes que se les envían individualmente. No se devuelven respuestas a las solicitudes de difusión desde el master.

Configuración de Hardware. Puede establecerse una conexión Modbus en el puerto EIA RS232 o EIA RS485 y puede ejecutarse, como máximo, en dos puertos de comunicación al mismo tiempo. A cada uno de estos puertos se le puede asignar su propia dirección Modbus, mediante el bit de sistema %S101 y las palabras de sistema %SW101 y %SW102.

Cableado nominal. A continuación se ilustran en la Figura 5.3, las conexiones de un cable nominal para los tipos EIA RS232 y EIA RS485.

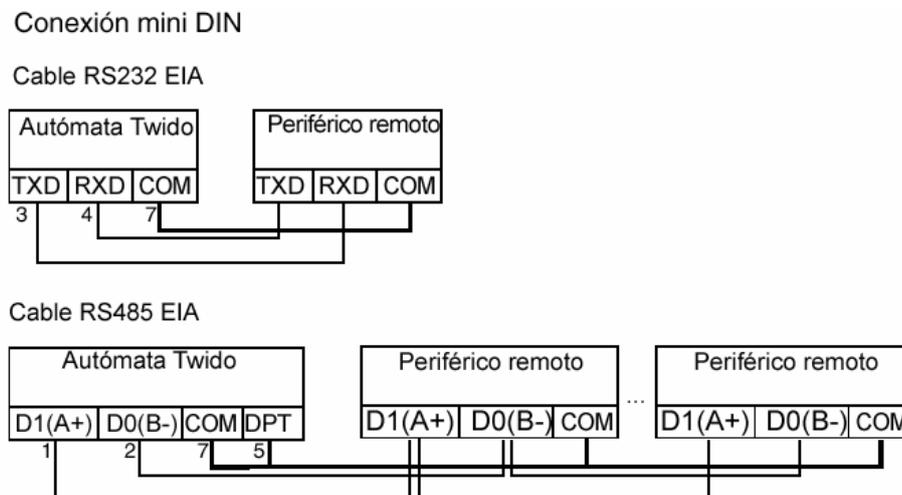


Figura 5.3. Conexiones de cable nominal para EIA RS232 y EIA RS485

Configuración del Puerto. Un autómata Twido puede utilizar su puerto 1 primario o un puerto 2 configurado de forma opcional para utilizar el protocolo Modbus, como se indica en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Configuración del puerto de Twido para comunicación Modbus

Paso	Acción
1	Definir todos los módulos o adaptadores de comunicación adicionales configurados en la base
2	Declarar la red Modbus en el paso Describir de TwidoSuite
3	Seleccionar Puerto 1 (o Puerto 2, si está instalado) para configurar la ventana Describir
4	Para configurar el elemento Modbus, utilizar uno de estos dos métodos: <ul style="list-style-type: none"> • Hacer clic en el icono Configurar de la barra de herramientas y elegir el elemento Modbus en el gráfico de descripción. • Hacer doble clic en el elemento Modbus en el gráfico de descripción.
5	Para acceder al cuadro de diálogo Función (Configuración de un objeto, Twido, Software de programación TwidoSuite, Ayuda online) asociado a los parámetros de hardware de conexión Modbus, seguir uno de estos dos métodos: <ul style="list-style-type: none"> • Hacer clic en el icono Configurar de la barra de herramientas y elegir la conexión Modbus en el gráfico de descripción. • Hacer doble clic en la conexión Modbus en el gráfico de descripción.
Paso	Acción
6	Configurar el cuadro de diálogo Función <div data-bbox="445 1341 1316 1809" data-label="Image"> </div>

5.6.2.1 Modbus Master

El modo master de Modbus permite al autómatas enviar una solicitud Modbus a un slave y esperar una respuesta. El modo master de Modbus sólo se admite a través de la instrucción EXCHx. El modo master de Modbus admite Modbus ASCII y Modbus RTU. El tamaño máximo de las tramas enviadas o recibidas es de 250 bytes. La tabla de palabras asociada a la instrucción EXCHx está formada por tablas de control, de envío y de recepción, como se indica en la Tabla 5.3

Tabla 5.3. Control, envío y recepción para comunicaciones MODBUS

	Byte más significativo	Byte menos significativo
Tabla de control	Comando	Longitud (envío/recepción)
	Offset de recepción	Offset de envío
Tabla de envío	Byte 1 enviado	Byte 2 enviado
	Byte n enviado
	Byte n+1 enviado	
Tabla de recepción	Byte 1 recibido	Byte 2 recibido
	Byte p recibido
	Byte p+1 recibido	

Tabla de control. El byte de longitud contiene la longitud de la tabla de envío, 250 bytes máximo, que se sobrescribe con el número de caracteres recibidos al final de la recepción, en caso de que ésta se solicite. Este parámetro es la longitud en bytes de la tabla de envío. Si el parámetro de offset del envío es igual a 0, será igual a la longitud de la trama de envío. Si el parámetro de offset del envío no es igual a 0, no se enviará un byte de la tabla de envío y este parámetro será igual a la longitud de la propia trama más 1.

El byte de comando, en caso de que se produzca una solicitud RTU Modbus, excepto para una difusión, debe ser siempre igual a 1, tanto en el envío y la recepción. El byte de offset de envío contiene el rango, 1 para el primer byte, 2 para el segundo byte, etc., dentro de la tabla de envío del byte que se ignorará cuando se envíen los bytes. Se utiliza para gestionar los envíos asociados a los valores de byte/palabra del protocolo Modbus. Por

ejemplo, si este byte es igual a 3, el tercer byte se ignorará, haciendo que el cuarto byte de la tabla sea el tercero en enviarse.

El byte de offset de recepción contiene el rango dentro de la tabla de recepción que se agregará cuando se envíe el paquete. Se utiliza para gestionar los envíos asociados a los valores de byte/palabra del protocolo Modbus. Por ejemplo, si este byte es igual a 3, el tercer byte de la tabla se representará con un cero y el tercer byte recibido se introducirá en la cuarta ubicación de la tabla.

Tablas de emisión/recepción. En uno de los dos modos, Modbus ASCII o Modbus RTU, la tabla de envío se complementa con la solicitud antes de ejecutar la instrucción EXCHx. En el momento de la ejecución, el autómata determina cuál es la capa de enlace de datos y realiza todas las conversiones necesarias para procesar el envío y la respuesta. Los caracteres de inicio, fin y comprobación no se almacenan en las tablas de emisión/recepción.

Una vez enviados todos los bytes, el autómata cambia a modo de recepción y espera a recibir los bytes. La recepción finaliza de una de las formas siguientes:

- Se detecta un timeout en un carácter o en una trama.
- Los caracteres de fin de trama se recibe en modo ASCII.
- La tabla de recepción está llena.

Las entradas de byte X enviado contienen los datos del protocolo Modbus (codificación RTU) que se va a emitir. Si el puerto de comunicación está configurado para Modbus ASCII, los caracteres de trama correctos se agregan al envío. El primer byte contiene la dirección del dispositivo en forma específica o general, el segundo byte contiene el código de función y el resto contiene información asociada al código de función.

Los bytes X recibidos contienen los datos del protocolo Modbus (codificación RTU) que se van a recibir. Si el puerto de comunicación está configurado para Modbus ASCII, los caracteres de trama correctos se eliminan de la respuesta. El primer byte contiene la

dirección del dispositivo, el segundo byte contiene el código de función, o código de respuesta y el resto contiene información asociada al código de función.

5.6.2.2 Modbus Slave

El modo slave Modbus permite al autómatas responder a las solicitudes Modbus estándar procedentes de un master de Modbus. Cuando el cable TSX PCX1031 se conecta al autómatas, las comunicaciones de TwidoSuite se inician en el puerto, inhabilitando temporalmente el modo de comunicación que estaba en ejecución antes de que se conectara el cable.

El protocolo Modbus admite dos formatos de capa de enlace de datos: ASCII y RTU. Cada uno está definido por la implementación de la capa física: ASCII utiliza 7 bits de datos y RTU utiliza 8 bits de datos. Cuando se utiliza el modo Modbus ASCII, cada byte del mensaje se envía como dos caracteres ASCII. La trama Modbus ASCII comienza con un carácter inicial (':') y puede finalizar con dos caracteres finales (CR y LF). El carácter de final de trama es, de forma predeterminada, 0x0A (avance de línea) y el usuario puede modificar el valor de este byte durante la configuración. El valor de comprobación para la trama Modbus ASCII es un complemento de dos de la trama, excluyendo los caracteres inicial y final.

El modo Modbus RTU no vuelve a formatear el mensaje antes de transmitirlo; sin embargo, utiliza un modo de cálculo de suma de control diferente, especificado como CRC.

La capa de enlace de datos de Modbus tiene las limitaciones siguientes:

- Dirección 1-247
- Bits: 128 bits previa solicitud
- Palabras: 125 palabras de 16 bits previa solicitud

5.6.2.3 Características de Transmisión

- Comunicación serial, tasa de transmisión recomendada 9600 bps o 19200bps
- Bits de parada: 1 o 2 bits
- Modo de transmisión para bits de datos:
 - 8 bits para RTU
 - 7 bits para ASCII
- Paridad: Ninguna, par o impar. Ninguna paridad recomendado para Modbus RTU e integración con I/O Server Modbus de HMI
- Tiempo de desconexión variable. Por defecto 5000ms

5.7 DESARROLLO DEL PROGRAMA

La programación de la lógica de control del sistema, se la desarrolla en el software de entorno gráfico para la programación del controlador TWIDO de TELEMECANIQUE TwidoSuite 2.01.6. Al iniciar un proyecto nuevo, se crean en primer lugar, la información del archivo y la información del proyecto, como se indica en la Figura 5.4.

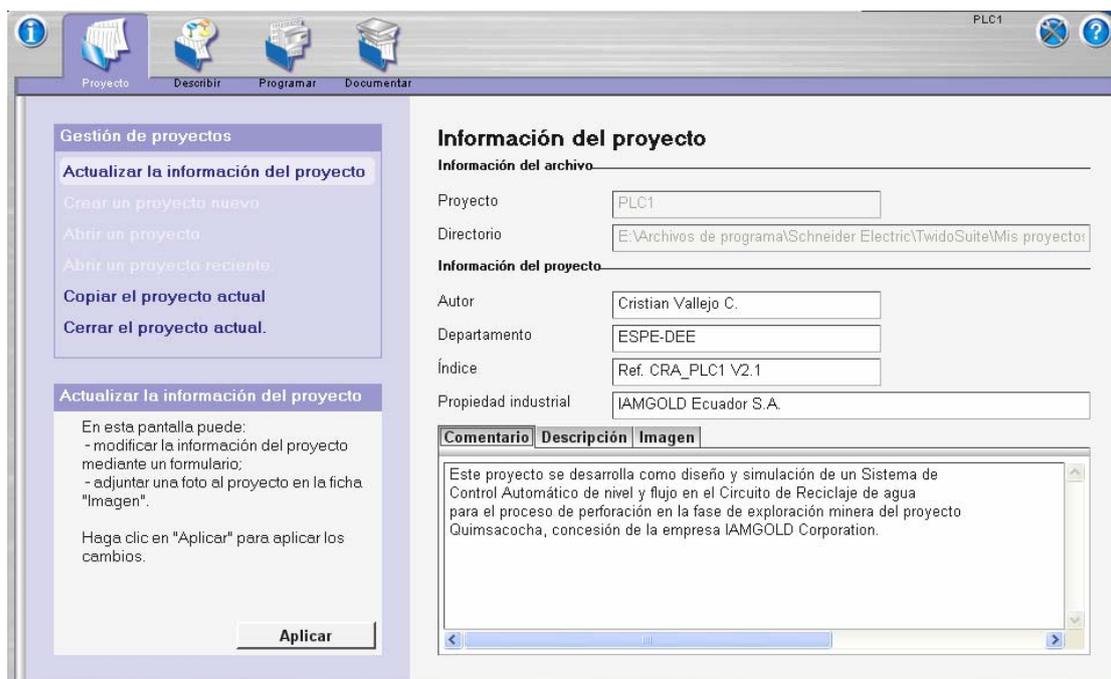


Figura 5.4. Software TwidoSuite para la programación del Controlador Twido

A continuación como se observa en la Figura 5.5, describimos la base con la que vamos a trabajar y con sus módulos, en el caso de utilizar estos. Esta ventana nos brinda un catálogo con los diferentes dispositivos de la gama de TWIDO y una tabla de referencia de los dispositivos utilizados.

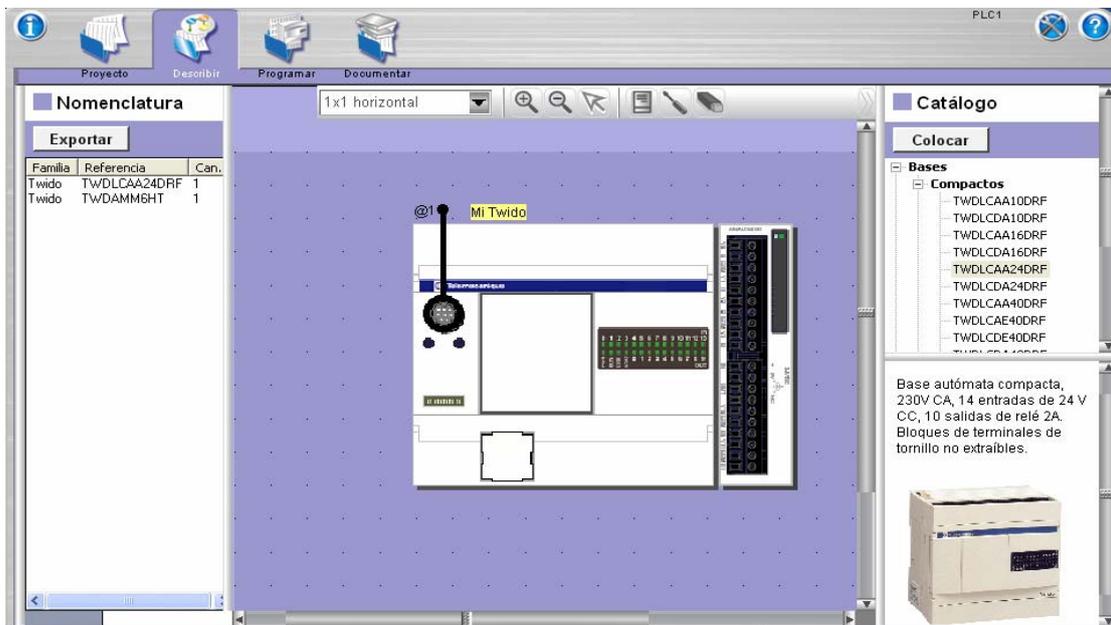


Figura 5.5. Configuración de los dispositivos mediante TwidoSuite

Posteriormente se configura el equipo utilizando direcciones, símbolos, filtrado, eventos, prioridades, funciones especiales, como se muestra en la Figura 5.6. En esta ventana también está disponible la configuración de los datos para la lógica de programación como la definición de objetos simples, bloques funcionales, bloques de entradas/salidas y objetos avanzados como el controlador PID.

Esta ventana contiene la configuración del comportamiento del automático, como sus niveles funcionales, modo de exploración, modo de arranque, almacenamiento automático y además la definición de protecciones con contraseña y de aplicación. A continuación se muestra la ventana de configuración.

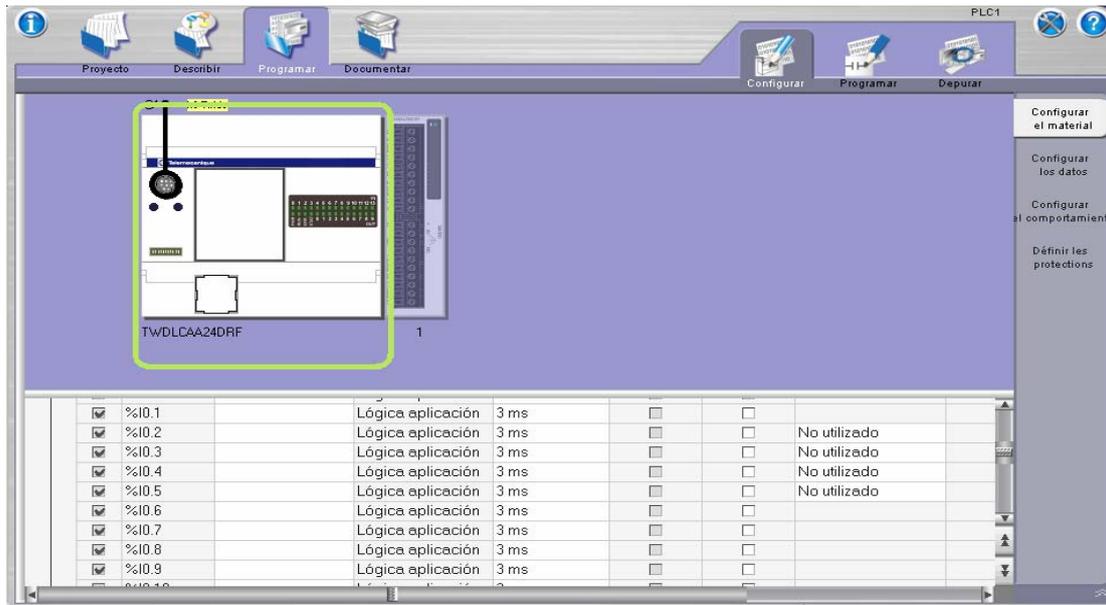


Figura 5.6. Configuración de las E/S, direcciones, datos, operaciones y comportamiento del Twido

En la ventana de programación que se muestra en la Figura 5.7, se desarrolla la aplicación para el Sistema de Control y Monitoreo, utilizando las distintas herramientas que nos brinda TwidoSuite para la programación basada en lógica de escalera.

En la parte izquierda de esta ventana, se pueden acceder a las redes y secciones utilizadas para el tratamiento del programa; y en la parte inferior de la ventana se acceden a las direcciones utilizadas en la aplicación, con la posibilidad de agregar símbolos y comentarios para su identificación.

Utilizando el botón preferencias, editamos los parámetros con los que desarrollamos nuestra aplicación, como el directorio del archivo, almacenamiento automático, niveles funcionales de la aplicación y la gestión de las conexiones del autómat.

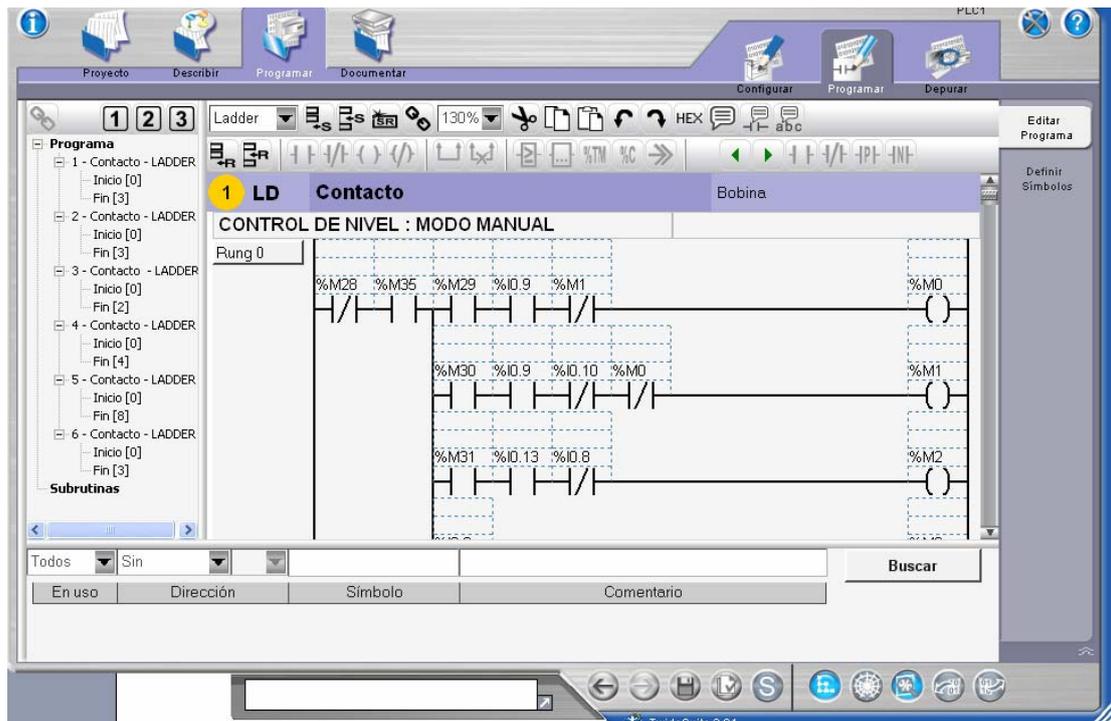


Figura 5.7. Ventana de programación y edición de parámetros de la aplicación

La ventana de depuración nos da la posibilidad de conectar al autómatas con la aplicación desarrollada, utilizando la conexión previamente ajustada, como se observa en la Figura 5.8.

En el caso de nuestra aplicación utilizamos la comunicación serie RS-232, protocolo MODBUS RTU mediante el driver de Schneider Electric para conectar al Twido con la PC; configuración que se ilustra en la Figura 5.9.

Esta ventana permite conectarse directamente al PLC, transferir una aplicación entre PC y PLC o subir una aplicación desde el PLC al PC, pero a demás en modo de vigilancia permite supervisar en modo transparente el funcionamiento del programa.

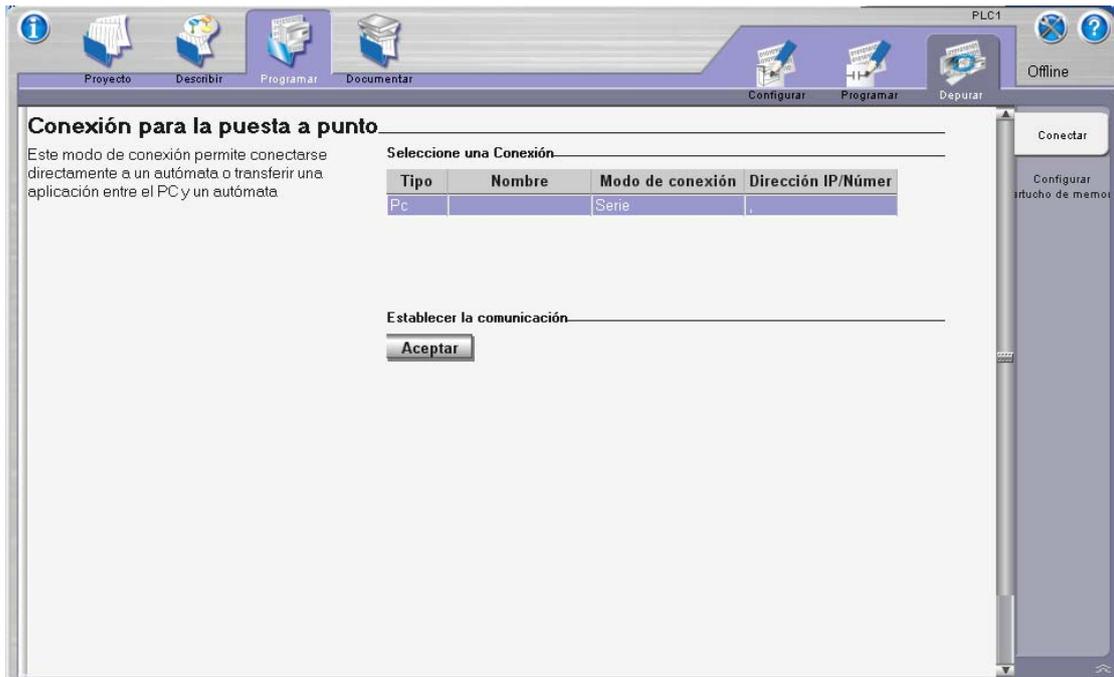


Figura 5.8. Ventana para establecer la conexión con el autómata Twido

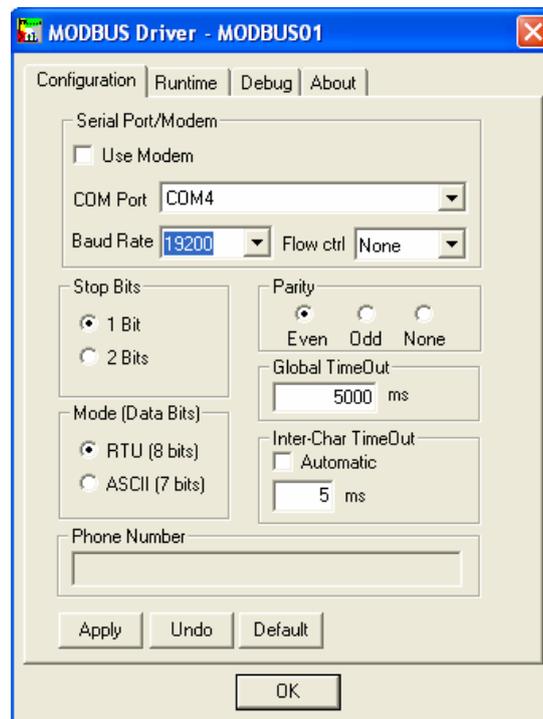


Figura 5.9. Driver de Schneider para comunicación MODBUS

5.7.1 Lógica de Control

En lo correspondiente a la lógica de control del Sistema, basada en programación de escalera o Ladder, se ha utilizado 6 secciones ordenadas de la siguiente forma:

1. Sección 1. Control de Nivel: Modo Manual
2. Sección 2. Control de Nivel: Modo Automático
3. Sección 3. Control de Flujo: Controlador tipo PI
4. Sección 4. Salidas del Controlador
5. Sección 5. Conexiones con Intouch: Entradas
6. Sección 6. Conexiones con Intouch: Salidas

5.7.1.1 Sección 1. Realiza la operación manual del Control de Nivel del Sistema, considerando los parámetros y estrategias desarrollados en el diseño del sistema de control. Cuenta con 4 redes (Rung #) y utiliza 15 contactos y 5 bobinas distribuidos de la siguiente forma:

Contactos:

- %M0: Contacto auxiliar bobina M0
- %M1: Contacto auxiliar bobina M1
- %M2: Contacto auxiliar bobina M2
- %M3: Contacto auxiliar bobina M3
- %M4: Contacto auxiliar bobina M4
- %M28: Contacto auxiliar para switch Manual/Automático
- %M29: Contacto auxiliar para switch bomba 1
- %M30: Contacto auxiliar para switch bomba 2
- %M31: Contacto auxiliar para switch bomba 3
- %M35: Contacto auxiliar parada de emergencia
- %I0.8: Contacto nivel alto T1
- %I0.9: Contacto nivel bajo T1
- %I0.10: Contacto nivel alto T2
- %I0.12: Contacto nivel alto T3
- %I0.13: Contacto nivel bajo T3

Bobinas:

%M0: Bobina auxiliar para encender bomba 1

%M1: Bobina auxiliar para encender bomba 2

%M2: Bobina auxiliar para encender bomba 3

%M3: Bobina auxiliar para encender bomba 1

%M4: Bobina auxiliar para encender bomba 3

%M5: Bobina auxiliar para encender bomba 1

%M6: Bobina auxiliar para encender bomba 2

%M7: Bobina auxiliar para encender bomba 3

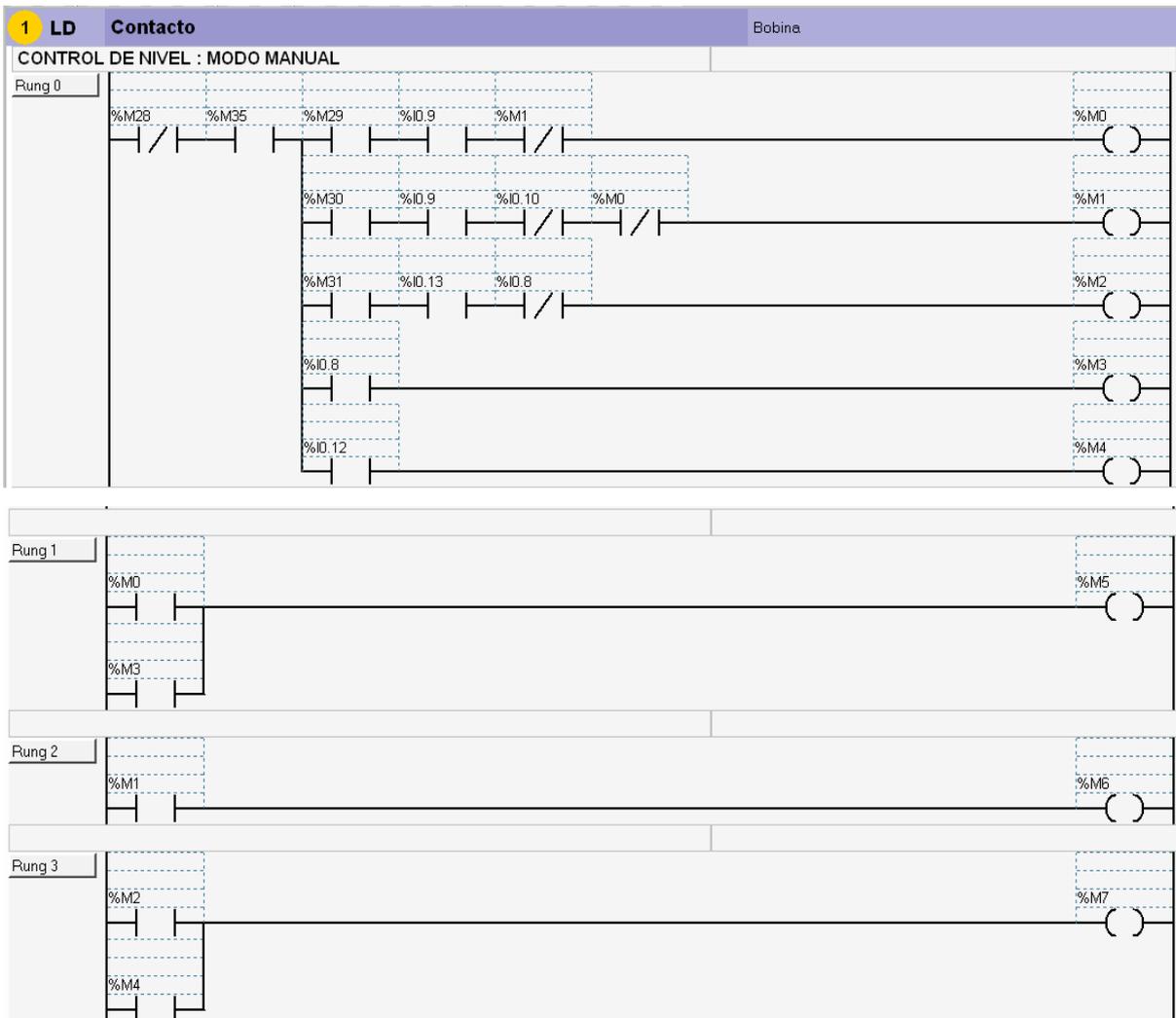


Figura 5.10. Sección 1. Control de Nivel: Modo Manual

5.7.1.2 Sección 2. Realiza la operación de control automático para el nivel de líquido del sistema. Cuenta con 4 redes y utiliza 14 contactos y 4 bobinas distribuidas de la siguiente forma:

Contactos:

%M8: Contacto auxiliar bobina M8

%M9: Contacto auxiliar bobina M9

%M10: Contacto auxiliar bobina M10

%M11: Contacto auxiliar bobina M11

%M28: Contacto auxiliar para switch Manual/Automático

%M32: Contacto auxiliar para encender automático del control de nivel

%M33: Contacto auxiliar para detener automático del control de nivel

%M35: Contacto auxiliar parada de emergencia

%I0.8: Contacto nivel alto T1

%I0.9: Contacto nivel bajo T1

%I0.10: Contacto nivel alto T2

%I0.11: Contacto nivel bajo T2

%I0.12: Contacto nivel alto T3

%I0.13: Contacto nivel bajo T3

Bobinas:

%M8: Bobina auxiliar para enclavar automático

%M9: Bobina auxiliar para encender bomba 1

%M10: Bobina auxiliar para encender bomba 2

%M11: Bobina auxiliar para encender bomba 3

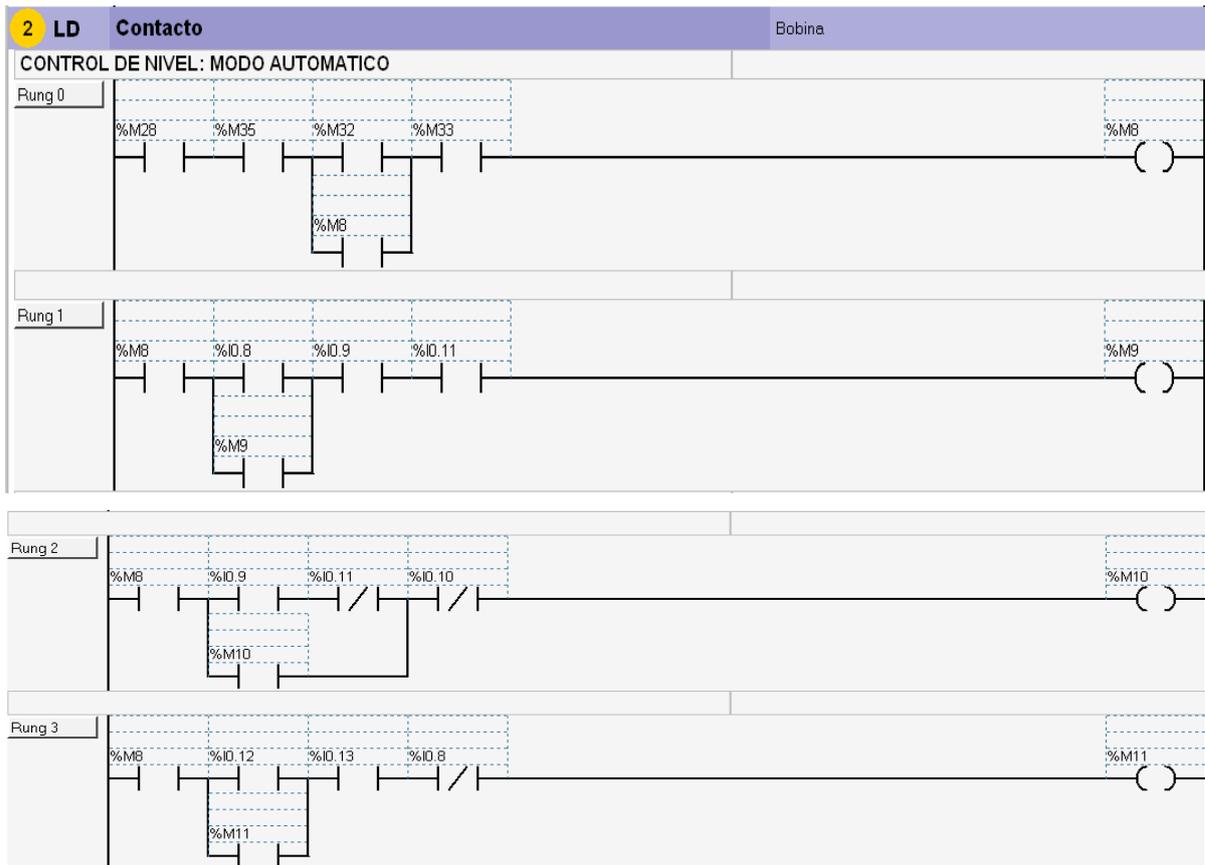


Figura 5.11. Sección 2. Control de Nivel: Modo Automático

5.7.1.3 Sección 3. Realiza la operación de control de flujo del sistema para el proceso de perforación, mediante la utilización de un controlador tipo PI. Cuenta con 3 redes y utiliza 5 contactos, 1 bobina, 8 bloques de operación y un bloque de operación para objetos avanzados que corresponde al controlador PI.

Contactos:

%M12: Contacto auxiliar para bobina M12

%M34: Contacto auxiliar para switch de control de flujo

%M35: Contacto auxiliar para parada de emergencia

%I0.11: Contacto nivel bajo T2

%I0.12: Contacto nivel alto T3

Bobina:

%M12: Bobina auxiliar para control del bloque de operación PI

Bloques de operación:

%MW0: Palabra asociada para control PID: 1 Simple , 2 AT+PID , 3 AT

%MW1: Palabra para consigna (0 - 10000)

%MW2: Parámetro de sintonización. Constante proporcional. $K_p(x 0.01)$

%MW3: Parámetro de sintonización. Constante T_i . $T_i(x 0.1)$

%MW4: Parámetro de sintonización. Constante T_d . $T_d(x 0.1)$

%MW5: Límite de la medida (0 - 10000)

%MW6: Consigna de salida (0 - 10000). Para uso único con AT y AT + PID

SHORT: Bloque de operación especial para conexión directa con alimentación

Bloque de operación para objeto avanzado PI

PID0: Permite el control de flujo hacia el sistema de perforación, mediante la sintonización de sus parámetros. Requiere de la definición de sus objetos, como su direccionamiento para entradas y salidas, tiempo de muestreo, tipo de acción y modo de funcionamiento.

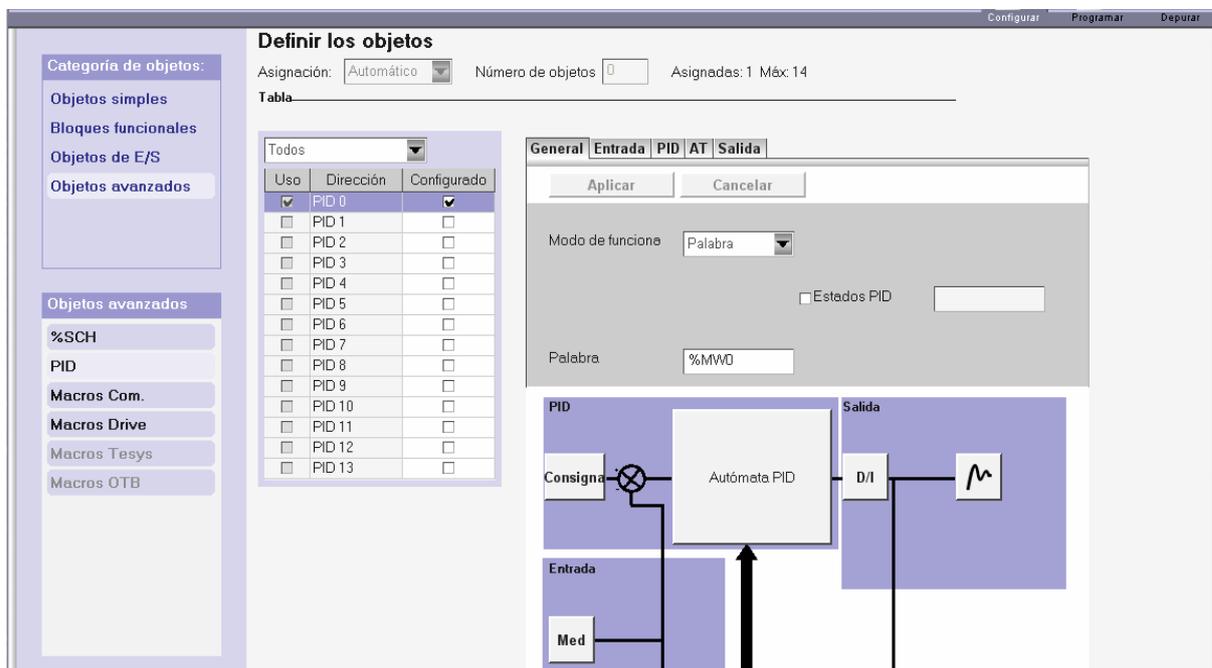


Figura 5.12. Configuración del bloque de operación avanzado PID

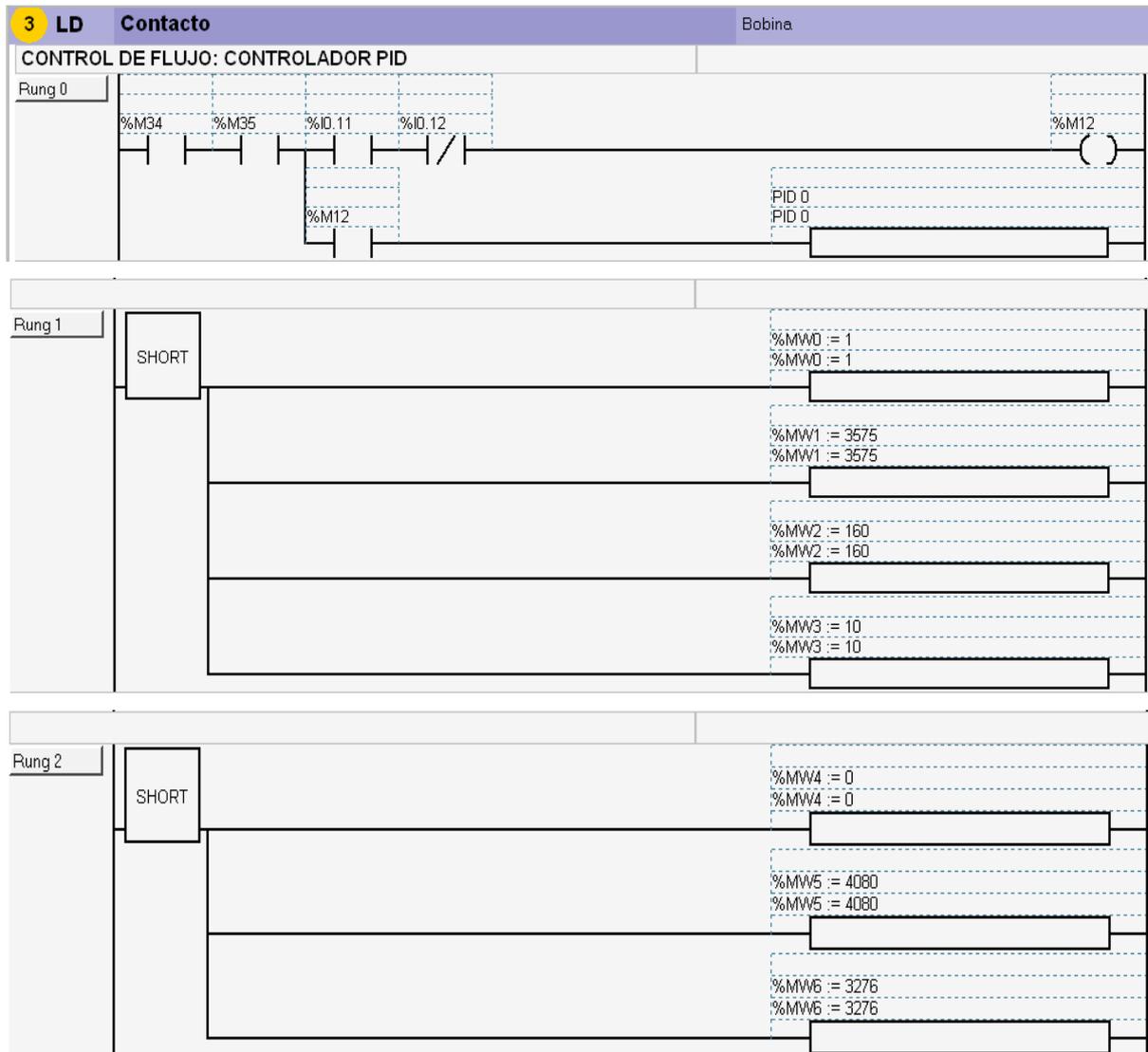


Figura 5.13. Sección 3. Control de Flujo: Controlador tipo PI

5.7.1.4 Sección 4. Pertenece a las salidas del autómatas para el panel de control del Sistema instalado en el proceso. Cuenta con 5 redes y utiliza 14 contactos y 10 bobinas que corresponden a las salidas del TWIDO para las distintas acciones de control y monitoreo.

Contactos:

- %M5: Contacto auxiliar para encender bomba 1 (Operación manual)
- %M6: Contacto auxiliar para encender bomba 2 (Operación manual)
- %M7: Contacto auxiliar para encender bomba 3 (Operación manual)
- %M9: Contacto auxiliar para encender bomba 1 (Operación automática)

%M10: Contacto auxiliar para encender bomba 2 (Operación automática)

%M11: Contacto auxiliar para encender bomba 3 (Operación automática)

%M34: Contacto auxiliar para switch de control de flujo

%M35: Contacto auxiliar para parada de emergencia

%I0.8: Contacto nivel alto T1

%I0.9: Contacto nivel bajo T1

%I0.10: Contacto nivel alto T2

%I0.11: Contacto nivel bajo T2

%I0.12: Contacto nivel alto T3

%I0.13: Contacto nivel bajo T3

Bobinas:

%Q0.0: Enciende bomba 1, luz piloto bomba 1

%Q0.1: Enciende bomba 2, luz piloto bomba 2

%Q0.2: Enciende bomba 3, luz piloto bomba 3

%Q0.3: Luz piloto de control de Flujo

%Q0.4: Luz piloto nivel alto de T1

%Q0.5: Luz piloto nivel bajo de T1

%Q0.6: Luz piloto nivel alto de T2

%Q0.7: Luz piloto nivel bajo de T2

%Q0.8: Luz piloto nivel alto de T3

%Q0.9: Luz piloto nivel bajo de T3

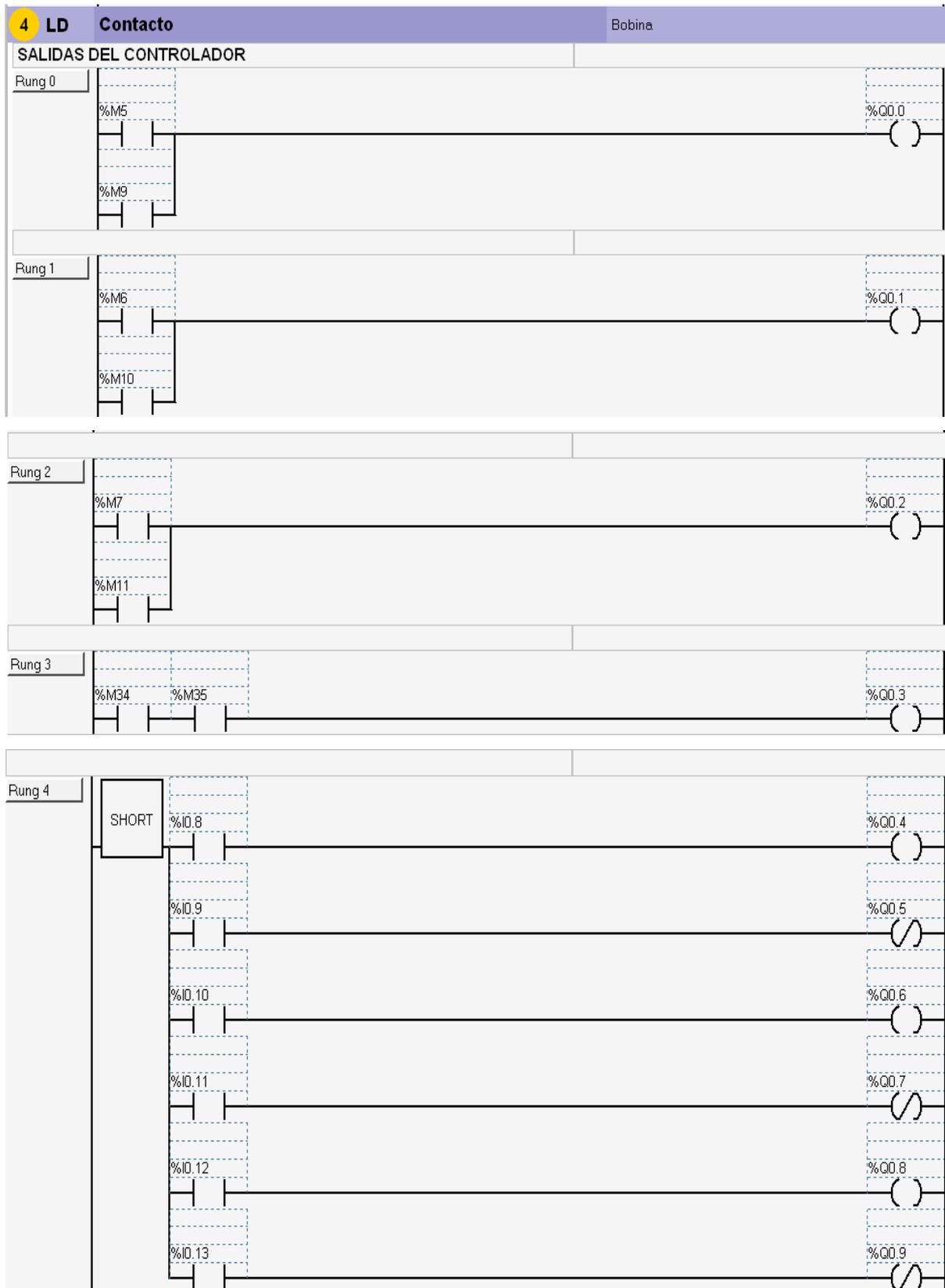


Figura 5.14. Sección 4. Salidas del Controlador

5.7.1.5 Sección 5. Esta sección corresponde a las entradas que se integran para el control del sistema mediante el HMI desarrollado en el software Intouch. Contiene 9 redes y utiliza 17 contactos, 8 bobinas y un bloque de operación.

Contactos:

- %M14: Contacto para seleccionar Manual/Auto (Conexión desde Intouch)
- %M15: Contacto para encender bomba 1 (Conexión desde Intouch)
- %M16: Contacto para encender bomba 2 (Conexión desde Intouch)
- %M17: Contacto para encender bomba 3 (Conexión desde Intouch)
- %M18: Contacto para iniciar Operación Automática de Control Nivel (Conexión desde Intouch)
- %M19: Contacto para detener Operación Automática de Control Nivel (Conexión desde Intouch)
- %M20: Contacto para encender el Control de Flujo (Conexión desde Intouch)
- %M21: Contacto para parada de emergencia (Conexión desde Intouch)
- %M35: Contacto auxiliar para parada de emergencia
- %I0.0: Contacto para seleccionar Manual/Auto (Desde panel de control)
- %I0.1: Contacto para encender bomba 1 (Desde panel de control)
- %I0.2: Contacto para encender bomba 2 (Desde panel de control)
- %I0.3: Contacto para encender bomba 3 (Desde panel de control)
- %I0.4: Contacto para iniciar Operación Automática de Control Nivel (Desde panel de control)
- %I0.5: Contacto para detener Operación Automática de Control Nivel (Desde panel de control)
- %I0.6: Contacto para encender el Control de Flujo (Desde panel de control)
- %I0.7: Contacto para parada de emergencia (Desde panel de control)

Bobinas:

- %M28: Bobina auxiliar para selección de operación Manual/Auto de Control de Nivel
- %M29: Bobina auxiliar para operación bomba 1
- %M30: Bobina auxiliar para operación bomba 2

%M31: Bobina auxiliar para operación bomba 3

%M32: Bobina auxiliar para operación Automática en Control de Nivel

%M33: Bobina auxiliar para operación Automática en Control de Nivel

%M34: Bobina auxiliar para operación del Control de Flujo

%M35: Bobina auxiliar para parada de emergencia

Bloque de operación:

%MW7:= %IW0.1.0: Toma el valor de la variable medida y la pasa a un objeto de palabra para su conexión con el desarrollo de la HMI.

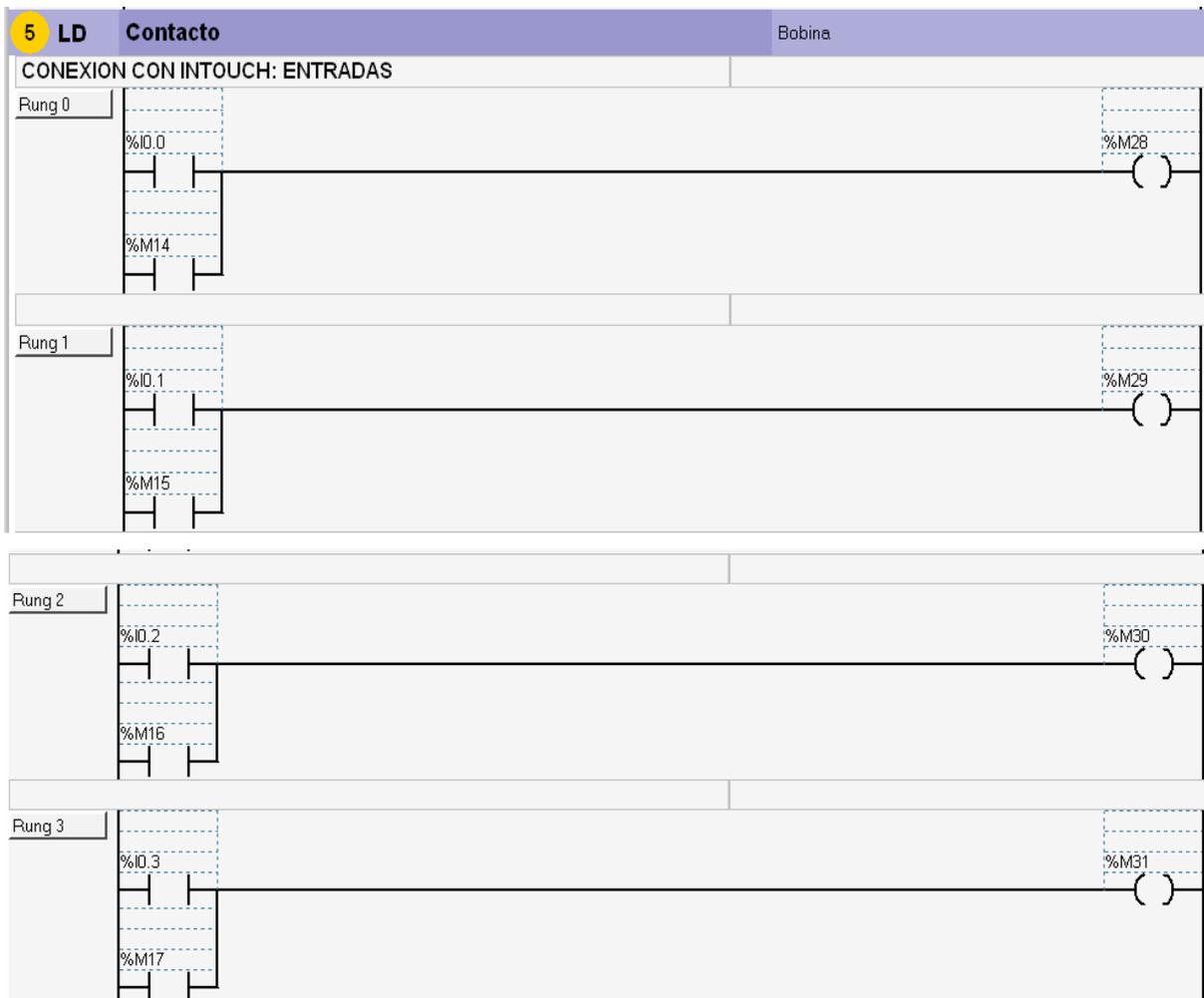


Figura 5.15. Sección 5. Conexiones con Intouch: Entradas

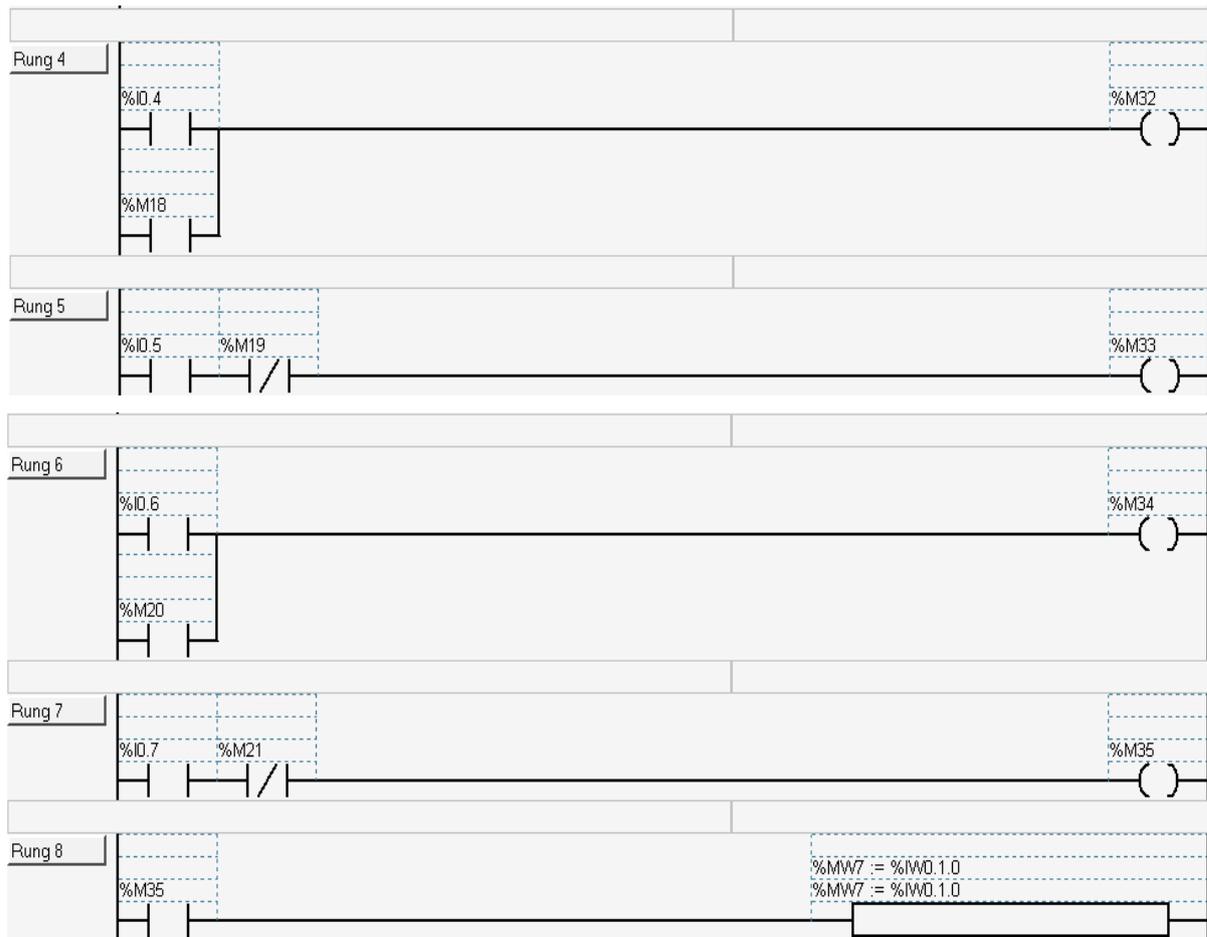


Figura 5.15. Sección 5. Conexiones con Intouch: Entradas

5.7.1.6 Sección 6. Esta sección corresponde a las salidas que se integran para el monitoreo del sistema mediante el HMI desarrollado en el software Intouch. Contiene 4 redes y utiliza 10 contactos, 9 bobinas y un bloque de operación.

Contactos:

- %Q0.0: Contacto auxiliar. Enciende bomba 1, luz piloto bomba 1
- %Q0.1: Contacto auxiliar. Enciende bomba 2, luz piloto bomba 2
- %Q0.2: Contacto auxiliar. Enciende bomba 3, luz piloto bomba 3
- %Q0.4: Contacto auxiliar. Luz piloto nivel alto de T1
- %Q0.5: Contacto auxiliar. Luz piloto nivel bajo de T1
- %Q0.6: Contacto auxiliar. Luz piloto nivel alto de T2
- %Q0.7: Contacto auxiliar. Luz piloto nivel bajo de T2

%Q0.8: Contacto auxiliar. Luz piloto nivel alto de T3

%Q0.9: Contacto auxiliar. Luz piloto nivel bajo de T3

%M35: Contacto auxiliar para parada de emergencia

Bobinas:

%M22: Bobina para nivel alto de T1 (Conexión hacia Intouch)

%M23: Bobina para nivel bajo de T1 (Conexión hacia Intouch)

%M24: Bobina para nivel alto de T2 (Conexión hacia Intouch)

%M25: Bobina para nivel bajo de T2 (Conexión hacia Intouch)

%M26: Bobina para nivel alto de T3 (Conexión hacia Intouch)

%M27: Bobina para nivel bajo de T3 (Conexión hacia Intouch)

%M36: Bobina para operación de bomba 1 (Conexión hacia Intouch)

%M37: Bobina para operación de bomba 2 (Conexión hacia Intouch)

%M38: Bobina para operación de bomba 3 (Conexión hacia Intouch)

Bloque de operación:

%MW8:= %QW0.1.0: Toma el valor de la variable manipulada y la pasa a un objeto de palabra para su conexión con el desarrollo de la HMI.

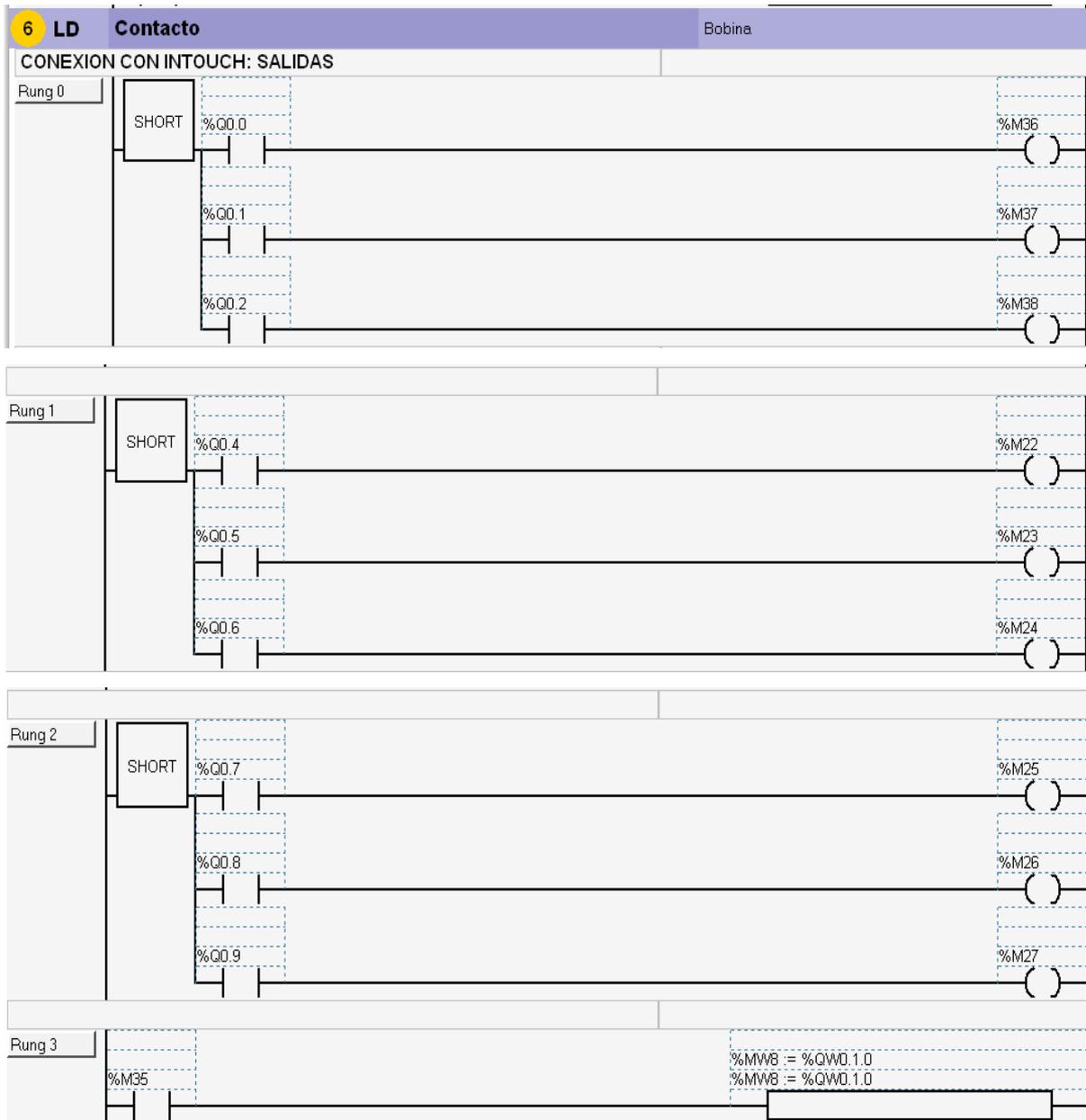


Figura 5.16. Sección 6. Conexiones con Intouch: Salidas

5.8 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

Dentro del proceso de instrumentación para el Sistema de Control y Monitoreo del Circuito de Reciclaje de Agua, el acondicionamiento de las señales proporciona al sistema la confiabilidad de que las entradas/salidas, analógicas o discretas funcionen eficientemente en el proceso de control.

Las consideraciones a tomar en cuenta para el acondicionamiento son todos los parámetros técnicos dados por el fabricante en cada dispositivo de medición, de control y elementos finales o actuadores. Este procedimiento, conocido como acondicionamiento, incluye funciones como amplificación, filtrado, aislamiento eléctrico y multiplexación de la señal. La gran variedad de productos en el mercado oferta flexibilidad para la adquisición de los dispositivos, y basados en este criterio, examinaremos los que más se acomoden en la planta y a la vez requieran de mínimo o ningún acondicionamiento; esto con el objeto de evitar circuitos extra de acondicionamiento que puedan causar fallos en el proceso debido a factores de humedad, temperatura, ambientes de trabajo crítico, ruido, entre otros; y en caso necesario de acondicionamiento utilizar dispositivos que garanticen el funcionamiento en ambientes industriales.

Las entradas discretas que admite el PLC son de voltaje nominal 24VDC hasta un voltaje máximo de 28.8VDC, con impedancias de entrada de 2.1 K Ω y 3.4 K Ω para corrientes de 11mA y 7mA dependiendo del canal de entrada. Los sensores que se utilicen para el control de nivel, deben cumplir las características para ser conectadas directamente en los canales de entrada discretos del PLC TWIDO. Las salidas discretas de carga en el relay admiten voltajes de hasta 240VAC a 2 A y 30VDC a 2A, en cuyo caso el acondicionamiento de estas señales deberá realizarse con las respectivas protecciones de sobrecorriente y sobrevoltaje.

En el caso de las salidas analógicas, se debe considerar que su señal necesita acondicionamiento, debido a que esta es siempre enviada a un preactuador para el manejo del elemento final de control.

Basados en estas consideraciones, los interruptores de nivel utilizados para el diseño y simulación del sistema de control, se conectan directamente a los canales de entrada del PLC. Estos interruptores de la marca AW Anderson serie F7-BT, se alimentan con 24VDC y entregan una corriente máxima de 0.28A. Las salidas discretas del controlador para las bombas 1, 2, 3 y las luces piloto del sistema de simulación son alimentadas con 110VAC, por esta razón, tanto los canales comunes, como los canales de conmutación de los relays están protegidos con fusibles 10x38 mm para corrientes de 2 amperios.

La entrada analógica del sensor de flujo RECHNER, esta programada para entregar una señal de 4 a 20 mA que admite el módulo de E/S analógicas TWDAMM6HT del PLC TWIDO, para una impedancia de 250 K Ω , entrada diferencial y con una resolución de 12 bits.

La salida analógica del controlador es una señal de voltaje (0 – 10 VDC), enviada hacia un preactuador de la marca ASCO serie 8909. El preactuador es alimentado con 12 VDC y la señal de control utilizada es de 0 a 10 VDC; este dispositivo permite la manipulación de la bomba, que simula el sistema de control de flujo hacia la perforación. La unidad de control electrónica proporcional convierte señales de entrada analógica a señales de control para el actuador mediante modulación por ancho de pulso. La documentación correspondiente a los datos técnicos de los dispositivos contiene los parámetros de funcionamiento de esta unidad de control.

CAPÍTULO 6

DESARROLLO DE LA INTERFACE HMI

La Interface Hombre-Máquina es un conjunto de pantallas que muestran una representación de la planta o del equipamiento en forma gráfica. Los datos de los dispositivos, se muestran como dibujos o esquemas en primer plano (foreground) sobre un fondo estático (background). Mientras los datos cambian en campo, el foreground es actualizado. Los datos analógicos se pueden mostrar como números, o gráficamente mediante el uso de herramientas específicas. Además de la adquisición de datos, el desarrollo de la aplicación puede integrar herramientas para acciones de control hacia el proceso. El sistema puede tener varias pantallas, dependiendo de los requerimientos para el control y monitoreo del proceso, y el operador puede seleccionar las más relevantes en cualquier momento.

Para el desarrollo de la interface del sistema de Control y Monitoreo del Circuito de Reciclaje de Agua, se ha utilizado bajo una licencia estudiantil, el software Intouch Versión 9.5 de la firma Wonderware. Este es un paquete de software utilizado para crear aplicaciones de interface hombre-máquina bajo entorno PC. InTouch utiliza como sistema operativo el entorno WINDOWS 2000/2003/XP. El paquete consta básicamente de dos elementos: WINDOWMAKER y WINDOWVIEWER. WINDOWMAKER es el sistema de desarrollo que permite todas las funciones necesarias para crear ventanas animadas interactivas conectadas a sistemas de entradas/salidas externos o a otras aplicaciones basadas en la plataforma de Windows. WINDOWVIEWER es el sistema utilizado para ejecutar las aplicaciones creadas con WINDOWMAKER. Además de estos elementos, Intouch consta con utilidades para manejo de los drivers en los distintos protocolos de comunicación disponibles en los PLCs, conocidos como I/O Servers, herramientas complementarias para intercambio de datos sobre Windows como DDE o SuiteLink, cargados en el elemento FactorySuite y herramientas para el manejo de históricos, alarmas, controles ActiveX, SQL industrial, entre otros.

Requerimientos e Instalación del Sistema

- Cualquier PC compatible IBM con procesador Pentium 2 GHz o superior
- Mínimo 2 Gb de disco duro
- Mínimo 520 Mb RAM
- Adaptador display SVGA (recomendado 2 Mb mínimo)
- Puntero (mouse, trackball, touchscreen)
- Adaptador de red
- Microsoft Windows 2000/2003/XP/

Intouch y sus utilidades disponen de un sencillo programa para su instalación, que muestra el sistema operativo sobre el que va a trabajar y sitúa a un autoarranque cuando ha sido detectado por la unidad. El paquete InTouch viene protegido por una licencia que requiere de una llave para la activación de un determinado número de tags y para el tiempo de manejo de su aplicación.

6.1 DESCRIPCIÓN DE LA INTERFACE

El Sistema de Control y Monitoreo desarrollado en el HMI, esta conformado por nueve ventanas, distribuidas de la siguiente manera:

- Ventana de Inicio
- Ventana de Ingreso de Clave de Acceso
- Ventana Principal
- Ventana de Control de Nivel: Operación Manual
- Ventana de Control de Nivel: Operación Automática
- Ventana de Control de Flujo
- Ventana de la Interface de Ingeniería
- Ventana del Histórico de Flujo del proceso
- Ventana de Alarmas del proceso

Todas las ventanas utilizan el control ActiveX Gif89 para la animación de las presentaciones en los títulos de cada ventana y animaciones de imágenes en algunas de ellas. Para la elaboración de los botones en los menús de las ventanas se ha utilizado el software Gif Animador, mientras que en la elaboración de los temarios de ayuda del sistema se ha utilizado el software FastHelp.

La ventana de Inicio del Sistema está formada por un menú de tres botones:

- **Principal.** Que envía a la ventana principal, previo el ingreso correcto de la clave de acceso.
- **Información.** Que muestra un archivo con extensión *.txt, en donde se indica un resumen del desarrollo del Sistema, con los aspectos esenciales de su funcionamiento, como se ilustra en la Figura 6.1.

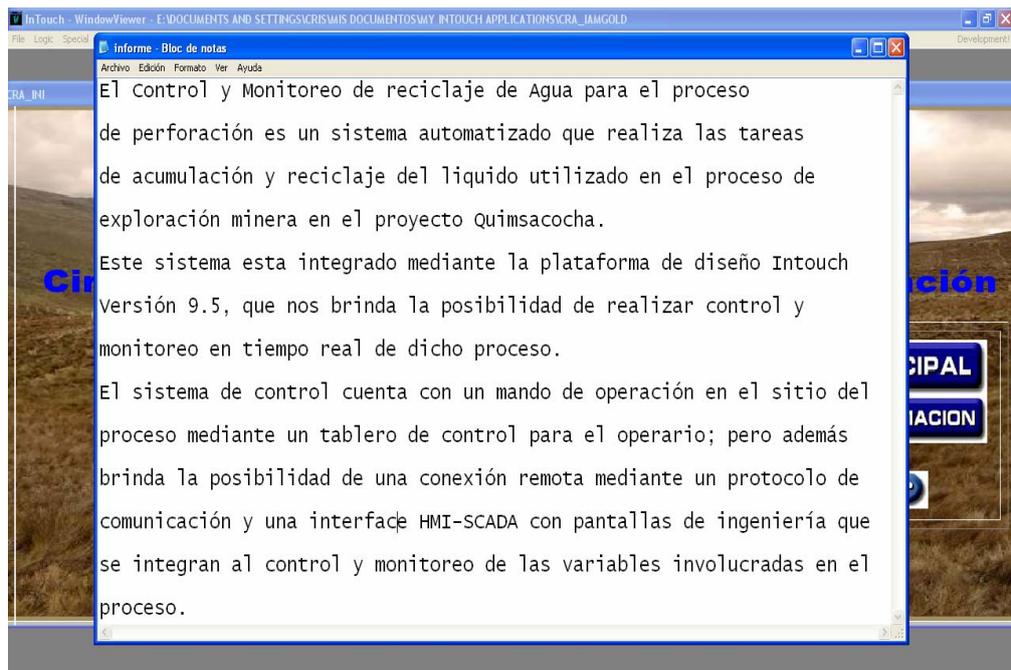


Figura 6.1. Archivo de información en la ventana de inicio del HMI

- **Ayuda (?).** Que muestra el temario de ayudas para el manejo de los diferentes menús, botones, indicadores y herramientas en las ventanas del HMI, como se observa en la Figura 6.2.

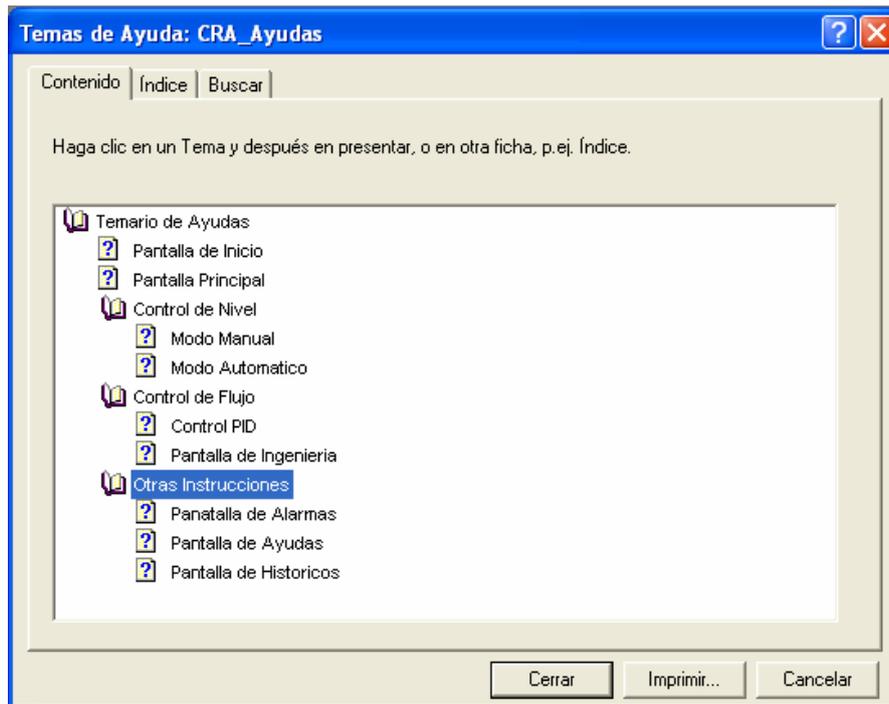


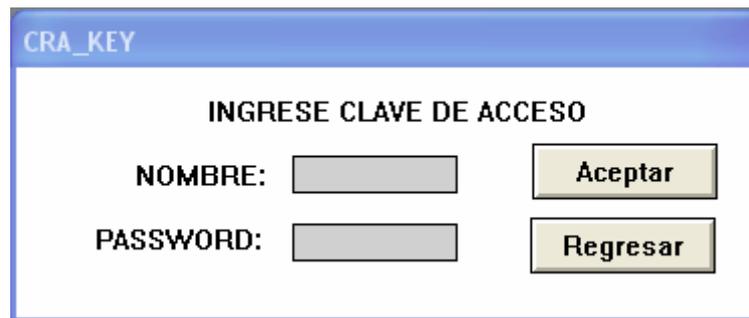
Figura 6.2. Ventana con el temario de ayudas del Sistema de Control y Monitoreo

A continuación en la Figura 6.3, se muestra la apariencia de la ventana de inicio.



Figura 6.3. Ventana de Inicio del Sistema de Control y Monitoreo

Al pulsar el botón PRINCIPAL del menú de la ventana de inicio, se direcciona hacia una ventana de ingreso de clave de acceso como se observa en la Figura 6.4; esto con el objeto de brindar seguridad a las operaciones que se realicen desde la HMI. El nombre del operador es Cristian y la clave de acceso es 8080, mientras no se digiten estos parámetros no se ingresará a la ventana principal. Esta ventana contiene dos botones, Aceptar para validar lo que se ha digitado y Regresar para retornar a la ventana de inicio.



The image shows a screenshot of a login window titled "CRA_KEY". The window has a blue header bar with the text "CRA_KEY" in white. Below the header, the text "INGRESE CLAVE DE ACCESO" is centered. There are two input fields: "NOMBRE:" followed by a text box, and "PASSWORD:" followed by a text box. To the right of the "NOMBRE:" field is a button labeled "Aceptar". To the right of the "PASSWORD:" field is a button labeled "Regresar".

Figura 6.4. Ventana de Ingreso de Clave de Acceso al Sistema

La ventana principal contiene los menús para el Control de Nivel y Control de Flujo del Sistema. Además de estos existe un tercer menú, llamado Otras Instrucciones que nos permite ingresar a la ventana de alarmas del sistema, mediante el botón Alarmas; regresar a la ventana de inicio, mediante el botón Atrás e ingresar al temario de ayudas, mediante el botón de ayuda del sistema. Su apariencia se observa en la Figura 6.5

El menú de Control de Nivel contiene dos botones, Manual que corresponde a la operación Manual del Sistema de Control de Nivel de líquido y Automático que corresponde a la operación automática del mismo. El menú de Control de Flujo contiene dos botones, Control PID, que lleva hacia la ventana de Control de Flujo del proceso y el botón de Ingeniería que lleva a la interface donde se introducen los valores de sintonización para el controlador.



Figura 6.5. Ventana Principal del Sistema de Control y Monitoreo

La ventana de Control de Nivel en operación manual, que se ilustra en la Figura 6.6, esta compuesta por tres switches para el arranque de las tres diferentes bombas. Bajo el mismo criterio de operación para el panel de control, en el HMI no se podrán arrancar la bomba 1 y bomba 2 al mismo tiempo, para evitar desperdicios de líquido y asegurar la operación confiable en el modo manual. En el caso de que el líquido llegue al nivel alto en el tanque 1, la bomba 1 se activará para eliminar el exceso y si existe un nivel bajo en el mismo tanque las bombas 1 y 2 se detendrá en el caso de que estén en funcionamiento, con el objeto de evitar su operación en vacío. Para el tanque 2, la bomba 2 detendrá su operación en caso de funcionamiento si el nivel alto de este tanque se activa. En el caso del tanque 3, la bomba 3 arrancará si el nivel alto de este se activa y detendrá su servicio si no existe nivel suficiente de líquido.

Esta ventana cuenta con luces de indicación del funcionamiento de cada bomba, un botón de parada de emergencia, la interface en la que se observa en tiempo real los distintos niveles de los tanques y el funcionamiento de las bombas con el líquido que pasa a través de las tuberías del sistema. Además cuenta con luces de indicación en la parte superior derecha para mostrar el status del Sistema de Control de Nivel y Flujo. Al pulsar

sobre el instrumento para sensar el flujo del líquido que sale de la perforación se ingresará a la ventana del histórico de flujo del proceso. El menú de la ventana ubicado en la parte inferior derecha contiene dos botones, Atrás para regresar a la ventana principal y el botón para acceder al temario de ayudas del sistema.

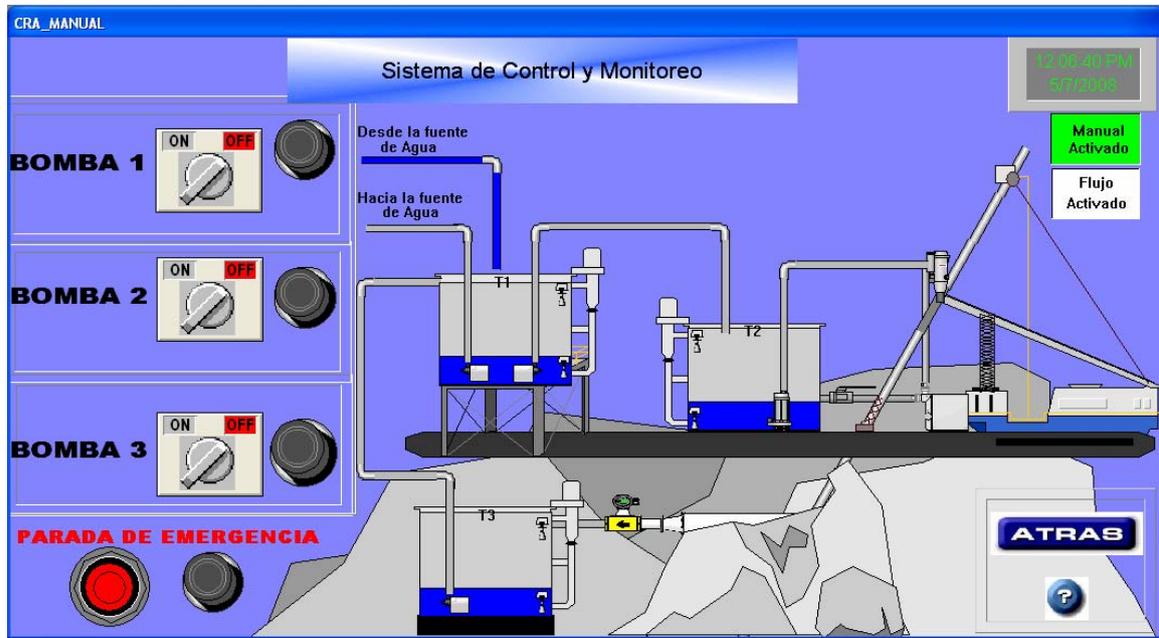


Figura 6.6. Ventana de Control de Nivel: Operación manual

La ventana de Control de Nivel en operación automática cuenta con un menú en la parte izquierda de la ventana, que consta de los botones de Inicio y Parada del Control automático. En la parte superior de estos botones existe una luz de indicación que muestra que la operación automática ha sido iniciada, además existe luces de indicación para el funcionamiento de las tres bombas involucradas en el sistema de control de nivel, como se ilustra en la Figura 6.7.

Al igual que en el resto de ventanas, existe un botón de parada de emergencia del sistema y la interface de esta ventana muestra en tiempo real los distintos niveles de los tanques. En la parte superior derecha existen luces de indicación para el status del Sistema de Control y Monitoreo.

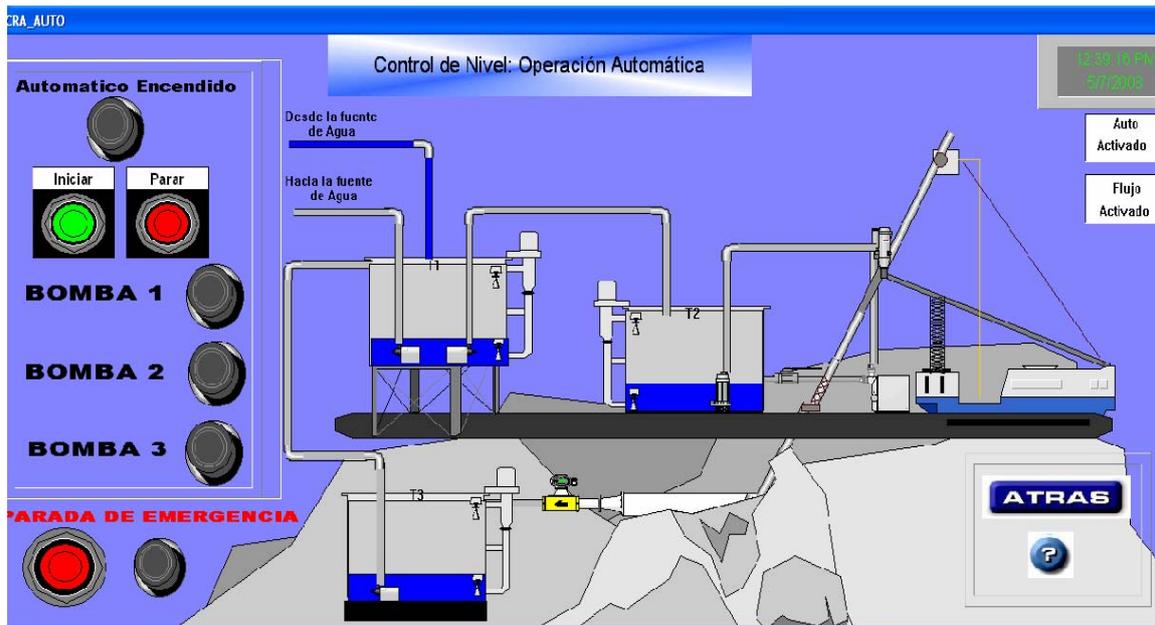


Figura 6.7. Ventana de Control de Nivel: Operación Automática

La ventana de Control de Flujo del Sistema esta conformada por un instrumento que integra dos botones y luces indicadoras para Iniciar y Detener el Control de Flujo para el proceso, ubicados en la parte superior derecha. A continuación de estos botones se cuenta con el menú para el ingreso del valor de consigna, considerando que para el dimensionamiento del sistema de simulación en la maqueta, utilizaremos flujos de líquido que varían hasta 190 cc/s, dado el alcance del instrumento para medir el flujo. Seguido de este, se tiene un botón para el ingreso a la ventana de Ingeniería. En la parte central de la ventana se encuentra un panel de medición con el valor de consigna en color rojo y el valor de la variable procesada en color verde; además existe en el pie de cada indicador de medición los valores numéricos de las variables mencionadas. Además de este panel, existe un bloque de alarmas para flujo alto y flujo bajo del Sistema de Control de Flujo.

Al igual que en las otras ventanas, existe un botón de parada de emergencia y en la parte superior derecha están ubicadas las luces indicadoras del status del Sistema. La interface contiene el tanque 2 que involucra directamente al control de flujo, considerando que para arrancar este controlador es necesario tener un nivel considerable de líquido en el tanque de dosificación. Su apariencia se indica en la Figura 6.8.

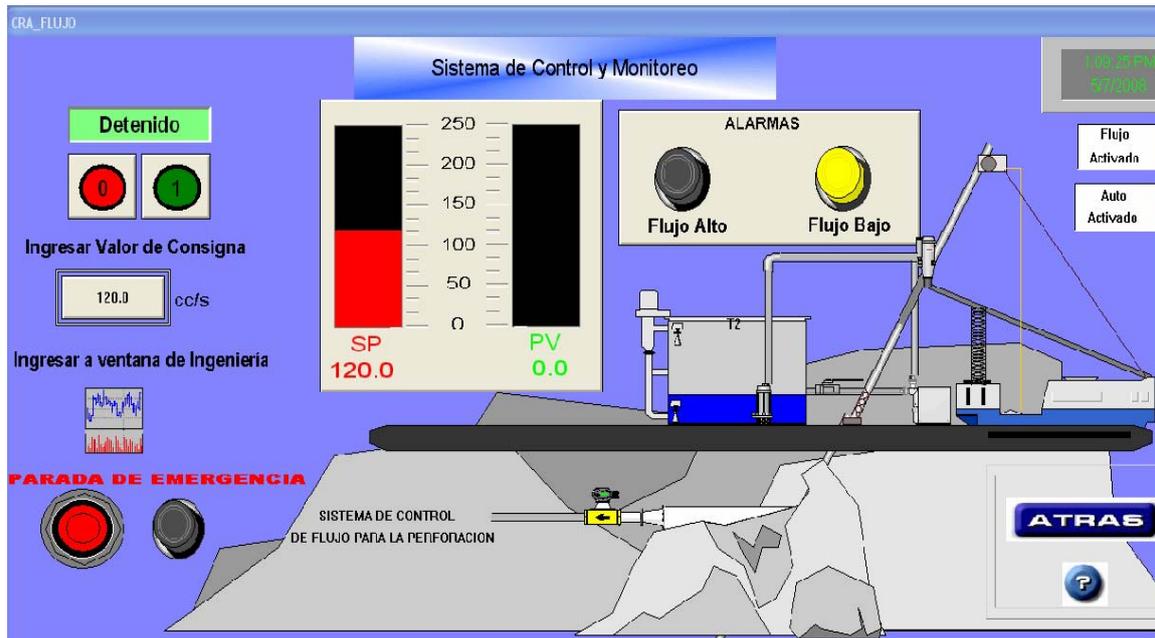


Figura 6.8. Ventana de Control de Flujo del Sistema

En la ventana de interface de Ingeniería, se encuentran los valores de las variables del control de flujo del sistema para la sintonización del controlador proporcional, integral, derivativo. En este caso, el tipo de control que más se adapta al proceso es el de tipo PI. En el panel de Variables de Control podemos digitar el valor de consigna; y los valores para las constantes de ganancia proporcional (K_p), Tiempo de Integración o reajuste (T_i) y la rapidez de derivación (T_d). Además en esta ventana existe el botón para parada de emergencia del sistema y un panel en la parte inferior en donde se observan los valores que se obtienen en el tiempo para el valor de consigna, la variable procesada y la variable manipulada, como se puede observar en la Figura 6.9.

Para la visualización de las variables involucradas en este sistema de control, se utiliza una herramienta de obtención de los valores en tiempo real, PenTrend, que permite obtener la tendencia de 16 valores al mismo tiempo y variar los parámetros con los que deseamos adquirirlos.



Figura 6.9. Ventana de la Interface de Ingeniería para el Controlador de Flujo

En la ventana de histórico de flujo del proceso podemos obtener el caudal de líquido que se recupera de la perforación, con el objeto del análisis para obtener distintos parámetros de estudio correspondiente al flujo de líquido que se dirige hacia la etapa de reciclaje. Esta ventana contiene la herramienta Historical Trend, que permite obtener datos históricos de las variables que se deseen manipular, ajustando los parámetros de fecha, hora, escalas, alcance; su apariencia se ilustra en la Figura 6.10.

La diferencia de esta herramienta radica en que no trabaja en tiempo real, pero mediante el uso de la aplicación HISDATA y la herramienta HisData Panel, podemos obtener datos mediante la conexión de los tags utilizados para su procesamiento en un software de gestión de datos, debido a que el formato de archivo que se obtiene de esta aplicación es *.CSV, compatible para importar hacia una hoja de cálculo de EXCEL.



Figura 6.10. Ventana del Histórico de Flujo de líquido obtenido de la perforación

La ventana de alarmas del sistema contiene una tabla de visualización de alarmas y eventos distribuida en el proceso. Esta herramienta permite la gestión para una estructura en red de ordenadores y para alarmas de tratamiento local. Para el desarrollo de nuestro Sistema de Control y Monitoreo, los eventos que se generan dentro de este proceso son los niveles alto y bajo en los distintos tanques, tratados como señales digitales. En lo que corresponde a las alarmas del sistema, los flujos de líquido alto y bajo, que han sido previamente ajustados, se tratan como señales analógicas y en su visualización se adquiere los valores con los que se han obtenido. Otra alarma generada por el sistema es la parada de emergencia dentro del proceso.

Los campos generados en esta tabla contienen la fecha, hora, reconocimiento, prioridad, nombre de la alarma generada, grupo, valor, límite y un comentario para tomar una acción correctiva o del estado en proceso, como se observa en la Figura 6.11.

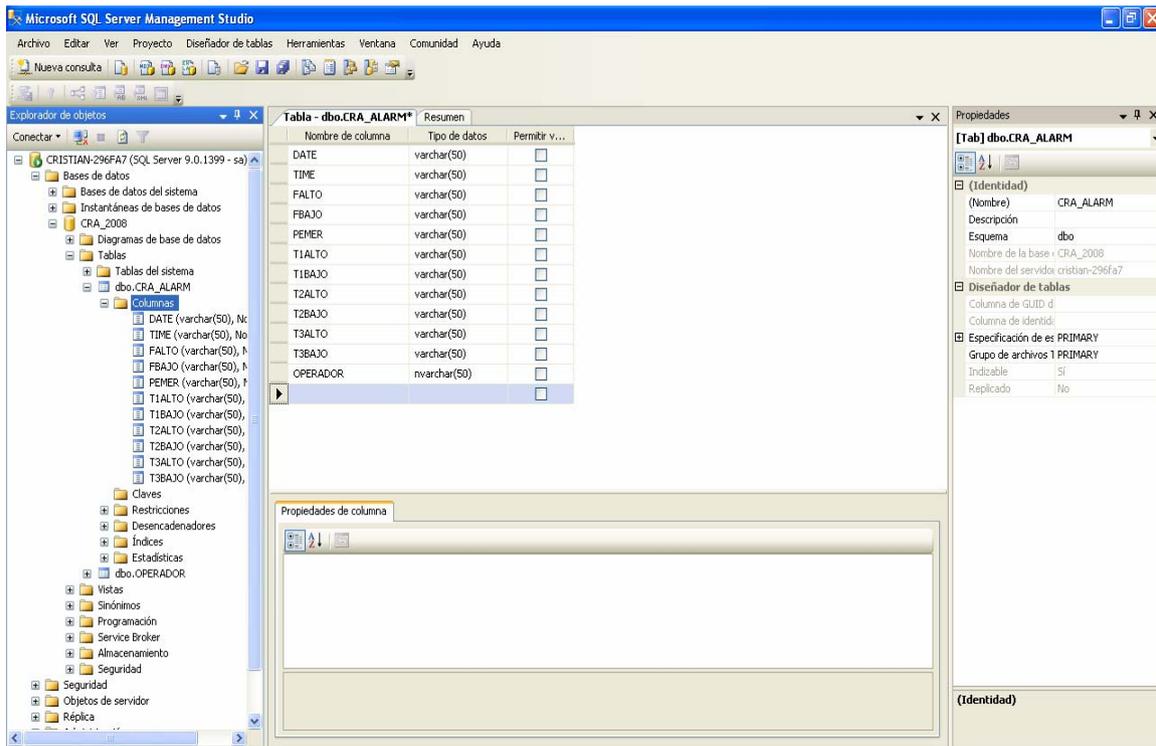


Figura 6.12. Consola SQL Server Managment Studio para la administración de la base de datos

Para la extracción y visualización de los datos almacenados, se utiliza Microsoft Excel, como muestra la Figura 6.13. Esta herramienta constituye un software confiable para la creación del reporte de datos generados por los eventos y alarmas de la HMI.

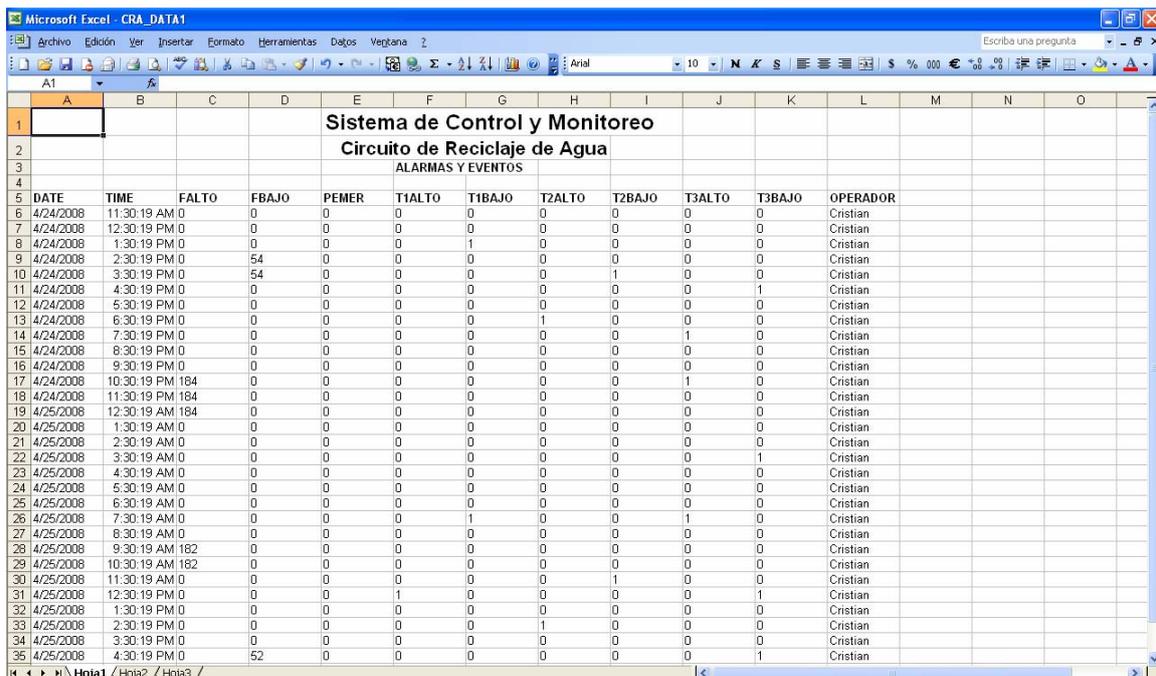


Figura 6.13. Microsoft Excel para importar datos y generar reportes de la base de datos

6.2 PROGRAMACIÓN

La programación de la HMI corresponde a las instrucciones utilizadas para el desarrollo de su interface. Dentro de esta se encuentran implementadas las funciones de conversión de unidades crudas a unidades de ingeniería para el manejo de las variables, acciones de los botones, usos de aplicaciones, herramientas de control y monitoreo de los parámetros del proceso, conexión con la base de datos y habilitación del servidor de entradas/salidas para la conexión HMI-Controlador.

Para cada ventana del HMI, se utiliza una animación de presentación de la ventana a la que corresponde, para esto utilizamos el control ActiveX GIF89, que permite la presentación de un título animado mediante un archivo de extensión *.GIF. La sentencia para la activación del control, la declaramos en el Windows Script en la condición On Show de cada ventana mediante la siguiente instrucción:

```
#Gif89_.FileName = "c:\CRA\archivo.gif";
```

Donde: #Gif89_ es el control ActiveX utilizado

Archivo.gif es el nombre del archivo creado para la animación, en su respectivo directorio de ubicación

En el menú de la ventana de inicio, en el botón de información utilizamos la aplicación del bloc de notas para obtener el resumen del Sistema de Control en formato *.txt, mediante la siguiente sentencia:

```
StartApp "e:\WINDOWS\NOTEPAD.exe informe.txt";
```

Para la elaboración de las ayudas del sistema utilizamos el software Fast-Help Internacional que permite la creación de temarios para el manejo de la HMI con archivos de extensión *.hlp, como ilustra la Figura 6.14.

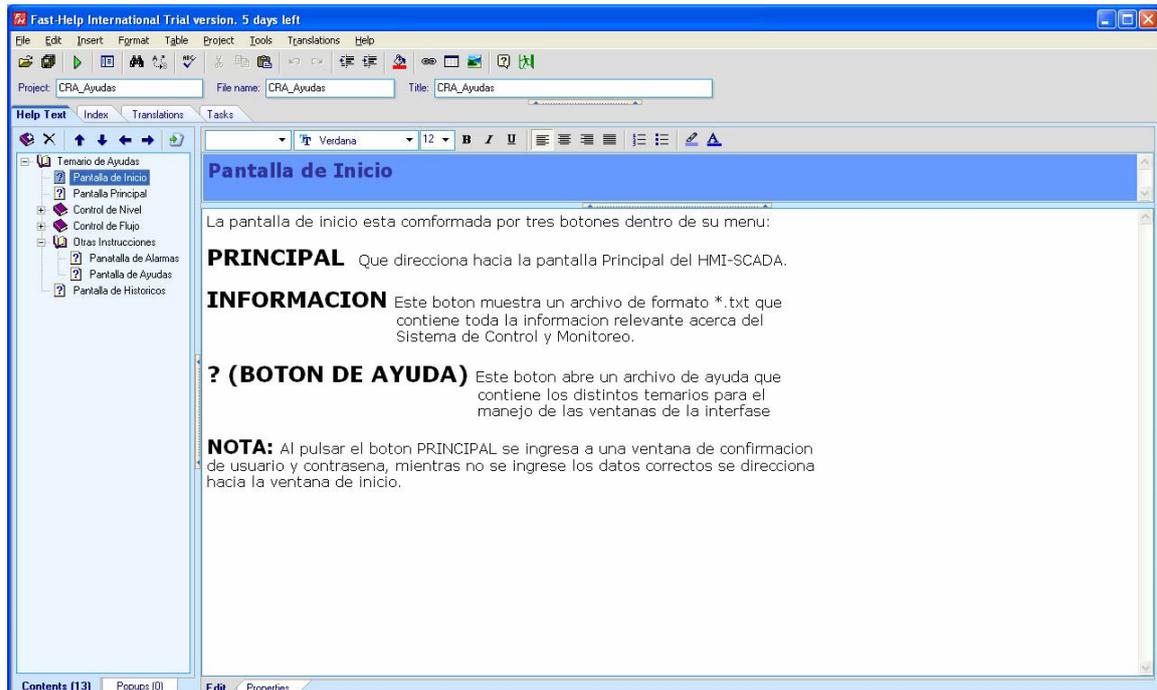


Figura 6.14. Software para el desarrollo de las ayudas del Sistema

Para utilizar las ayudas dentro del desarrollo de Intouch utilizamos la aplicación WinHelp32 de Windows mediante la siguiente sentencia:

```
StartApp "e:\windows\winhlp32.exe CRA_Ayudas.hlp";
```

Para el desarrollo de la HMI utilizamos el Application Script que contiene la conversión de unidades para la visualización y control de las variables en el valor de consigna, la variable procesada y manipulada. En este también se encuentra la sentencia para la conexión de la base de datos de SQL con los tags asociados para la generación de datos.

$$\text{CRA_SP} = (\text{CRA_SP1} + 0.140) / 0.0467 ;$$

$$\text{CRA_PV1} = 0.0467 * \text{CRA_PV} - 0.140 ;$$

$$\text{CRA_MV1} = 0.0315 * \text{CRA_MV} ;$$

```
SQLConnect(CONE,"DSN=CRA;UID=sa;PWD=8080;DB=CRISTIAN-296FA7");
```

```
SQLInsert(CONE,"CRA_ALARM","CRASQL");
```

```
SQLDisconnect(CONE);
```

En la Tabla 6.1 se especifican los parámetros de ajuste para la herramienta SQL Manager.

Tabla 6.1. Parámetros para la conexión de SQL

Parámetro	Descripción
CONE	Nombre de la conexión
DSN	Nombre del DSN de usuario
UID	Nombre de usuario para conectarse al SQL Server
PWD	Clave de usuario para conectarse al SQL Server
DB	Nombre del servidor
“CRA_ALARM”	Nombre de la tabla del SQL Server
“CRASQL”	Nombre del Bind List

Además de este, se utiliza 8 sentencias en el Condition Script para validar los tags asociados a los eventos, alarmas y el ingreso de clave al sistema.

- CRA_PSW == "8080"
- CRA_PV1 <= 60
- CRA_PV1 >= 175
- CRA_T1HL == 1
- CRA_T1LL == 1
- CRA_T2HL == 1
- CRA_T2LL == 1
- CRA_T3HL == 1
- CRA_T3LL == 1

Para la generación de alarmas se ha creado un grupo específico denominado CRA_Alarmas, que está asociado a la tabla de distribución de eventos y alarmas del sistema. En los detalles de alarmas colocamos los campos que obtendremos para la tabla que se genera en la ventana.

En la conexión de SQL Server con Intouch, además de las sentencias descritas anteriormente, se requiere la creación de un Bind List para asociar los tagnames con las columnas de las tablas que fueron creadas en nuestra base de datos, como se indica en la Figura 6.15.

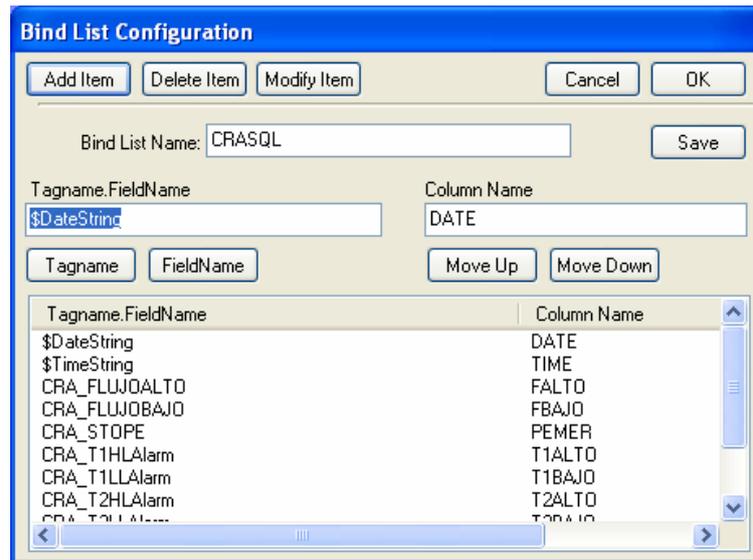


Figura 6.15. Bind List para la conexión de tagnames con la base de datos

Cuando se requiere obtener datos externos generados desde Intouch, además de la configuración de SQL Server, es necesario crear el origen de los datos con las herramientas administrativas de Windows, para este caso es necesario configurar el ODBC con el DSN del usuario con que el requiere trabajar, como se ilustra en la Figura 6.16.

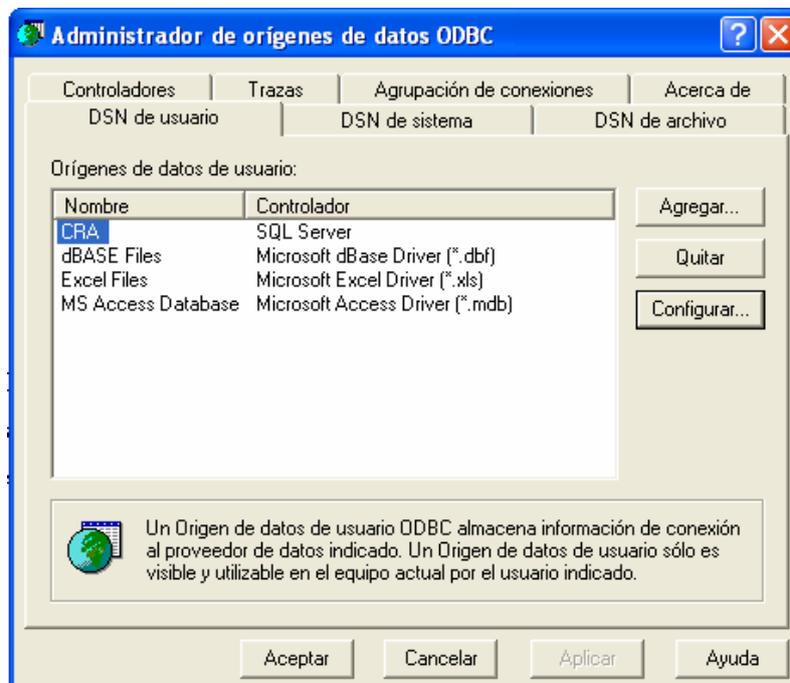


Figura 6.16. Configuración de orígenes de datos para la conexión con SQL Server

Para la comunicación entre el autómatas TWIDO y el software de desarrollo de la interfaz se utiliza el servidor de E/S MODBUS de Wonderware Modicon. Este componente es un desarrollo de Microsoft Windows que actúa como servidor del protocolo de comunicación y permite que otras aplicaciones de programas de Windows accedan a los datos de los PLCs. La comunicación se la realiza vía conexión serial RS-232 o RS-422.

El protocolo de comunicación direcciona un elemento de datos en un diálogo que usa la convención de tres nombramientos que incluye el nombre de la aplicación, del tópico y del elemento, como se indica en la Figura 6.17 y Figura 6.18.

- **Application Name:** el nombre del programa de Windows (servidor) que accederá el elemento de datos. En el caso de los datos que entran y salen de dispositivos compatibles con Modicon vía este servidor, el nombre de la aplicación es MODBUS.
- **Topic Name:** El significado total de este nombre es configurado en el servidor para identificar dispositivos específicos. En el caso de nuestra aplicación, se requiere un diálogo entre el TWIDO y la PC. El nombre con el identificamos al tópico es PLC y su configuración en el servidor se observa en la siguiente figura.

The image shows a Windows dialog box titled "MODBUS Topic Definition". It contains the following fields and options:

- Topic Name:
- Com Port:
- Slave ID:
- Slave Device Type:
- Use Concept Data Structures
- String Variable Style:
 - Full length (padded with spaces on the end)
 - C style (end marked by zero byte)
 - Pascal style (first byte contains length)
- Register Type:
 - BINARY
 - BCD
- Block I/O Sizes:
 - Coil Read:
 - Register Read:
 - Coil Write:
 - Register Write:
- Update Interval: msec

Figura 6.17. Definición del Tópico para comunicación mediante Modicon MODBUS

- **Item Name:** Un elemento de datos específico acorde con el tópico descrito. Para el desarrollo de esta interface, se utiliza los registros de bit de memoria y de palabra de memoria desarrollados en la lógica de programación del PLC para la conexión con Intouch.

En la configuración del Access Name en nuestra aplicación vía DDE, utilizamos la convención mostrada anteriormente; con la consideración de que el Node Name se utiliza si los datos se obtienen desde otro dispositivo, caso contrario al utilizarlos localmente desde la misma PC se deja el espacio en blanco.

El nombre de acceso es aleatorio, por recomendación se utiliza el mismo que del tópico.

The screenshot shows the 'Modify Access Name' dialog box. The 'Access' field contains 'PLC'. The 'Node Name' field is empty. The 'Application Name' field contains 'MODBUS'. The 'Topic Name' field contains 'PLC'. The 'Which protocol to use' section has three radio buttons: 'DDE' (selected), 'SuiteLink', and 'Message Exchange'. The 'When to advise server' section has two radio buttons: 'Advise all items' and 'Advise only active items' (selected). There are 'OK', 'Cancel', and 'Failover' buttons on the right. At the bottom, there is a checkbox for 'Enable Secondary Source' which is unchecked.

Figura 6.18. Configuración del Nombre de Acceso para comunicación con Intouch

A continuación en la Tabla 6.2, se indican los tagnames utilizados para el desarrollo de la HMI, en la programación de las diferentes ventanas, funciones de control y monitoreo y las acciones de los controles en la interface.

Tabla 6.2. Tagnames para el desarrollo de la HMI

Tagname	Tipo	Grupo	Access Name	Item Name
CONE	Memory Integer	\$\$System	-	-
CRA_Alarmas	Alarm Group	\$\$System	-	-
CRA_AUTOL	I/O Discrete	\$\$System	PLC	00009
CRA_B1	I/O Discrete	\$\$System	PLC	00016
CRA_B2	I/O Discrete	\$\$System	PLC	00017
CRA_B3	I/O Discrete	\$\$System	PLC	00018
CRA_FA	Memory Discrete	\$\$System	-	-
CRA_FLUJO	I/O Discrete	\$\$System	PLC	00021
CRA_FLUJOALTO	Memory Discrete	CRA_Alarmas	-	-
CRA_FLUJOBajo	Memory Discrete	CRA_Alarmas	-	-
CRA_Help	Memory Discrete	\$\$System	-	-
CRA_INF	Memory Discrete	\$\$System	-	-
CRA_INGRESO	Memory Discrete	CRA_Alarmas	-	-
CRA_KP	I/O Integer	\$\$System	PLC	40003
CRA_L1	I/O Discrete	\$\$System	PLC	00037
CRA_L2	I/O Discrete	\$\$System	PLC	00038
CRA_L3	I/O Discrete	\$\$System	PLC	00039
CRA_MANAUTO	I/O Discrete	\$\$System	PLC	00015
CRA_MV	I/O Real	\$\$System	PLC	40009
CRA_MV1	Memory Real	\$\$System	-	-
CRA_NOMBRE	Memory Message	CRA_Alarmas	-	-
CRA_PSW	Memory Message	CRA_Alarmas	-	-
CRA_PV	I/O Real	\$\$System	PLC	40008
CRA_PV1	Memory Real	\$\$System	-	-
CRA_SP	I/O Real	\$\$System	PLC	40002

Tagname	Tipo	Grupo	Access Name	Item Name
CRA_SP1	Memory Real	\$\$System	-	-
CRA_START	I/O Discrete	\$\$System	PLC	00019
CRA_STOP	I/O Discrete	\$\$System	PLC	00020
CRA_STOPE	I/O Discrete	CRA_Alarmas	PLC	00022
CRA_T1HL	I/O Discrete	\$\$System	PLC	00023
CRA_T1HLAlarm	Memory Discrete	CRA_Alarmas	-	-
CRA_T1LL	I/O Discrete	\$\$System	PLC	00024
CRA_T1LLAlarm	Memory Discrete	CRA_Alarmas	-	-
CRA_T2HL	I/O Discrete	\$\$System	PLC	00025
CRA_T2HLAlarm	Memory Discrete	CRA_Alarmas	-	-
CRA_T2LL	I/O Discrete	\$\$System	PLC	00026
CRA_T2LLAlarm	Memory Discrete	CRA_Alarmas	-	-
CRA_T3HL	I/O Discrete	\$\$System	PLC	00027
CRA_T3HLAlarm	Memory Discrete	CRA_Alarmas	-	-
CRA_T3LL	I/O Discrete	\$\$System	PLC	00028
CRA_T3LLAlarm	Memory Discrete	CRA_Alarmas	-	-
CRA_TD	I/O Integer	\$\$System	PLC	40005
CRA_TI	I/O Integer	\$\$System	PLC	40004
HDWDataDir	I/O Message	\$\$System	Hisdata Viewstr	Datadir
HDWDBDir	I/O Message	\$\$System	Hisdata Viewstr	DBDir
HDWDuration	I/O Message	\$\$System	Hisdata Viewstr	Duration
HDWError	I/O Message	\$\$System	Hisdata Viewstr	Error
HDWFilename	I/O Message	\$\$System	Hisdata Viewstr	Filename
HDWInterval	I/O Message	\$\$System	Hisdata Viewstr	Interval
HDWStartDate	I/O Message	\$\$System	Hisdata	StartDate

Tagname	Tipo	Grupo	Access Name	Item Name
HDWStartTime	I/O Message	\$\$System	Hisdata Viewstr	StartTime
HDWStatus	I/O Message	\$\$System	Hisdata Viewstr	Status
HDWTags	I/O Message	\$\$System	Hisdata Viewstr	Tags
HDWTags1	I/O Message	\$\$System	Hisdata Viewstr	Tags1
HDWTags2	I/O Message	\$\$System	Hisdata Viewstr	Tags2
HDWTemp	Memory Message	\$\$System	-	-
HDWWriteFile	I/O Integer	\$\$System	Hisdata Viewstr	WriteFile
HistTrend	Hist Trend	\$\$System	-	-
HistTrendPanMins	Memory Integer	\$\$System	-	-
HistTrendPenScale	Memory Integer	\$\$System	-	-

6.3 FUNCIONES DE CONTROL Y MONITOREO

6.3.1 Entorno de Desarrollo: WindowMaker

InTouch trabaja con ventanas o pantallas, estas disponen de elementos animados, tendencias gráficas, alarmas y lógica asociada. Antes de iniciar la aplicación, es necesario definir la pantalla sobre la que vamos a trabajar. Las pantallas pueden ser de tres tipos:

- **Replace:** Cierra cualquier otra ventana que corte cuando aparece en pantalla, incluyendo ventanas tipo popup u otras tipo replace.
- **Overlay:** Aparece sobre la ventana visualizada. Cuando cerramos una ventana tipo overlay, cualquier ventana que estuviera escondida bajo la overlay será restablecida. Seleccionando cualquier porción o parte visible de una ventana debajo de la overlay, provocará que esta ventana pase a ser considerada activa.

- **Popup:** Similar a la overlay, pero en el caso de popup la ventana siempre queda por encima de las demás, y no desaparece ni aunque pulsemos con el ratón sobre otra. Normalmente será necesario hacer desaparecer la ventana popup antes de que aparezca otra.

WindowMaker de InTouch es una herramienta de dibujo basada en gráficos por objetos, en lugar de en gráficos por pixels, lo que significa que se crea objetos independientes unos de otros. Ello facilita la labor de edición del dibujo y, lo que es más importante, permite una enorme sencillez y potencia en la animación de cada uno de los objetos, independientemente o por grupos. Para esto, se dispone de una Barra de Herramientas de dibujo, que permite una edición rápida de cualquier elemento. El funcionamiento de esta barra es muy sencillo, ya que seleccionamos con el cursor aquel elemento que deseamos colocar en pantalla, disponiendo siempre de un texto inferior que indica la utilidad de cada herramienta.

Los Elementos Wizards se definen como elementos inteligentes, que permiten que las aplicaciones en InTouch puedan ser generadas de un modo más rápido y eficiente. Estos elementos admiten crear rápidamente un objeto en la pantalla. Haciendo doble click sobre el objeto se puede asociar links de animación, asignar a tagnames o incluso incluir una lógica en ese objeto. Si se agrupa varios de estos objetos, se puede crear un elemento completo, acabado y programado, que se utiliza tantas veces como sea necesario.

Además de estos Wizards, es posible utilizar otros más complejos que provoquen operaciones en background, tales como crear/convertir una base de datos, importar un fichero AutoCad, configurar módulos de software (Recipes), entre otros. Los elementos en su mayoría son escalables y configurables en tamaño, permitiendo modificar y ajustar los dibujos ya hechos a un tamaño necesario para la ventana desarrollada.

6.3.2 Definición de Tagnames

El diccionario de tagnames es el núcleo de InTouch. Durante la ejecución de la aplicación, este diccionario contiene todos los valores de los elementos en la base de datos;

para crear esta, el software incorpora los elementos que la van a componer. Por lo tanto, InTouch crea una base de datos con todos los tags que se necesita para la aplicación. A cada uno de estos datos se asigna un nombramiento mediante una convención especificada por el programa. Al final, se dispone un diccionario con todos los tagnames o datos utilizados en la aplicación.

Desde el diccionario de tagnames, se define los tags y sus características. Existen diversos tipos de tagnames, según su función o características. Básicamente se dividen de acuerdo a la Tabla 6.3.

Tabla 6.3. Clasificación de los tagnames

Tipo	Descripción
MEMORY	Tags de registros internos de InTouch
I/O	Registros de enlace con otros programas o I/O de dispositivos externos mediante Servidor
INDIRECT	Tags de tipo indirecto
GROUP VAR	Tags de los grupos de alarmas
HISTTREND	Tag asociado a los gráficos históricos
TagID	Información acerca de los tags que están siendo visualizados en una gráfica histórica
\$	Tags del sistema

A su vez, los tres primeros tipos se clasifican dentro de otro grupo, como se indica en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4. Subclasificación de los tagnames Memory, I/O e Indirect

Tipo	Descripción
DISCRETE	Puede disponer de un valor 0 ó 1
INTEGER	Tagname de 32 bits con signo. Su valor va desde -2.147.483.648 hasta 2.147.483.647

Tipo	Descripción
REAL	Tagname en coma flotante. Su valor va entre $\pm 3.4e 38$. Todos los cálculos son hechos en 64 bits de resolución, pero el resultado se almacena en 32 bits
MESSAGE	Tagname alfanumérico de hasta 131 caracteres de longitud

6.3.3 Scripts

InTouch permite crear una lógica interna con condiciones para cálculos, operaciones, etc. Esta lógica puede estar asociada a:

- Toda una aplicación (APPLICATION SCRIPTS)
- Una sola ventana (WINDOW SCRIPTS)
- Una tecla (KEY SCRIPTS)
- Una condición (CONDITION SCRIPTS)
- Cambio de un dato (DATA CHANGE SCRIPTS)
- Asociadas a un ActiveX
- Funciones Usuario (QUICKFUNCTIONS)

Los Scripts son programas que permiten llevar a cabo acciones determinadas mediante una estructura IF...THEN...ELSE y la inclusión de funciones específicas del sistema que pueden ser utilizadas dentro de la lógica de la aplicación. Esta lógica estará activa de acuerdo al tipo de Script elegido. Las funciones se clasifican en:

- Funciones de texto
- Funciones matemáticas
- Funciones del Sistema
- Funciones del Misceláneo

6.3.4 Alarmas y Eventos

Este software soporta la visualización, impresión y archivo en disco duro o en base de datos relacional, de alarmas tanto digitales como analógicas para la notificación al

operador de condiciones del sistema de dos modos distintos: Alarmas y Eventos. Una alarma es una acción anormal que puede ser perjudicial para el proceso y que normalmente requiere de algún tipo de actuación por parte del operador. Un evento es una acción de estado normal del sistema que no requiere ningún tipo de respuesta por parte del operador. Los tipos de alarmas y eventos existentes se indican en la Tabla 6.5:

Tabla 6.5. Tipos de Alarmas y Eventos del Sistema

Condición de Alarma	Tipo
Discrete	DISC
Deviation – Major	LDEV
Deviation – Minor	SDEV
Rate-Of-Change (ROC)	ROC
SPC	SPC
Value - LoLo	LOLO
Value - Lo	LO
Value - Hi	HI
Value - HiHi	HIHI

Cada alarma se asocia a un tag. Dependiendo del tipo de tag es posible crear distintos tipos de alarmas y eventos. A cada alarma puede asociarse un nivel de prioridad de 1 a 999, donde Prioridad 1 es la más crítica. Ello permite filtrar alarmas en displays, en impresora o en disco duro.

InTouch dispone de un cómodo sistema para prioridades de alarmas. Cuando se crea un tagname de alarma, este se asigna a un grupo de alarmas. Estos grupos o jerarquías de alarmas permiten representar qué alarmas son las más importantes, a la vez que permiten reconocer un grupo de alarmas en lugar de todas a la vez. Al crear un tag, se asocia a un grupo y en caso de no hacerlo, el tag de alarma queda automáticamente asociado al grupo principal, llamado \$SYSTEM.

Para el desarrollo del sistema de Control y Monitoreo de nuestra aplicación, se utiliza la herramienta Wizard de Objeto de Alarmas. Esta crea una tabla con los contenidos de los campos a visualizar. Para la configuración de esta herramienta se ajustan los parámetros indicados de la Tabla 6.6.

Tabla 6.6. Parámetros de configuración de las Alarmas y Eventos

Parámetro	Descripción
Display Name	Nombre relacionado del display
New Alarms Appear At	Alarmas nuevas al principio del display (Top), o al final (Bottom)
Show Titles	Muestra o no títulos
Show Vert Scroll Bar	Muestra o no la barra de scroll vertical
Show Horz Scroll Bar	Muestra o no la barra de scroll horizontal
Show Status Bar	Muestra o no la barra de estado
Allow Runtime Grid Changes	Permite o no cambios en la grilla de visualización durante el tiempo de ejecución
Perform Query on Startup	Ejecuta consulta sobre alarmas al arrancar
Auto Scroll to New Alarms	Se posiciona automáticamente en la nueva alarma
Allow Runtime Alarm Selection	Permite selección de alarmas en tiempo de ejecución
Use Extended Alarm Selection	Usa selección extendida de alarmas
From ... To Priority	Niveles de prioridad de alarma mayor y menor que se visualizarán en el objeto de alarmas
Alarm State Define	Ver todas las alarmas (all) o sólo las no reconocidas (unack)
Query Type	Alarm Summary para visualizar las alarmas activas actualmente. Alarm History para visualizar las alarmas activas y las que han dejado de ser activas en el sistema
Alarm Query	Nodo de consulta. Por defecto es \InTouch!\$System (alarmas del propio nodo del grupo \$System). Para las Alarmas de nuestra aplicación el nodo corresponde a (\InTouch!CRA_Alarmas)

Parámetro	Descripción
Date	Muestra la fecha y su formato
Time	Muestra la hora y su formato
Alarm State	Estado de la Alarma
Alarm Class	Clase de la Alarma
Alarm Type	Muestra el tipo de alarma
Priority	Prioridad de la alarma
Alarm Name	Nombre de la Alarma
Group Name	Grupo de alarma asociado
Alarm Provider	Nodo Proveedor de la Alarma
Value at Alarm	Valor del registro dentro de la pantalla de alarmas
Limit	Valor límite de la alarma del registro
Operator	Asociar el número de identificación del operador con la alarma
Comment	Comentario asociado

6.3.5 Tendencias históricas y de tiempo real

Las curvas históricas y de tiempo real, permiten visualizar la evolución con respecto al tiempo de un dato en forma de curva o tendencia. Este dato debe haber sido almacenado previamente, por lo que el tagname visualizado en este tipo de curvas debe ser definido como tipo rastreado (Log Data). Para la activación del gestor de curvas históricas, se debe configurar los parámetros indicados en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7. Parámetros de configuración de la herramienta de Tendencias históricas

Parámetro	Descripción
Enable Historical Logging	Activación del gestor de históricos
Keep Log Files For	Indica e número de días que se requiere mantener en disco los ficheros históricos. "0" significa que jamás se borran automáticamente.

Parámetro	Descripción
Store Log Files ...	Indica la carpeta donde se guardarán los ficheros históricos
Printing Control	Control de impresión. Recomendado dejar por defecto

Una vez configurada esta opción, es necesario ajustar los parámetros con los que se van a obtener los datos de la herramienta Historical Trend del Wizard. Dentro del cuadro de configuración se definen los campos indicados en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8. Parámetros de ajuste de la herramienta de Tendencias históricas

Parámetro	Descripción
HistTrend	Tag asociado a la curva histórica. Oprimiendo el pulsador Suggest, InTouch sugerirá un nombre de tag
Pen Scale	Tag asociado a la curva histórica. Oprimiendo el pulsador Suggest, InTouch sugerirá un nombre de tag
Values	Permite definir el eje vertical (valores)
Times	Permite definir el eje horizontal (tiempos)
Pens	Permite definir los valores asociados a cada uno de los lápices de trazado de la curva.

Dentro de los Wizards, se dispone de la herramienta de pulsadores de la curva histórica. Esta herramienta tiene ya programados pulsadores para lograr zooms de la tendencia ha tratar, tiene también programados los punteros de selección de fecha/hora, permitiendo definir diversas funciones sin necesidad de programación.

La aplicación HistData permite convertir datos de ficheros históricos generados por InTouch a ficheros de tipo csv (Comma Separated Value). Estos son fácilmente manejables por programas para la generación de reportes, tales como Excel y permiten de este modo crear todo tipo de informes. Para llevar a cabo la selección de datos a convertir y la conversión, HistData se enlaza con tagnames de InTouch mediante DDE. Las

variables que incluye HistData son las mostradas en la tabla de los tagnames utilizados para el desarrollo de esta aplicación en el tema correspondiente a Programación.

6.3.6 Gestión con SQL

La herramienta SQL Access Manager está diseñada para transferir datos de manera sencilla y transparente en tiempo de ejecución de la aplicación. Esta operación de Intouch esta basada en funciones de conectividad propias de SQL, donde se crea y asocia las columnas de las tablas de la base de datos, con los tagnames de la aplicación desarrollada.

El proceso de asociación es conocido como Enlace y se lo realiza mediante la herramienta Bind List. SQL Access Manager guarda los nombres de los campos de la base de datos y sus asociaciones en el formato *.CSV, en un archivo llamado SQL.DEF. Este archivo puede ser visualizado y modificado por un editor de texto o un software para la gestión de datos dinámicos.

Las funciones de SQL pueden ser usadas en cualquier Script de Intouch, dependiendo de la aplicación y programación de la interface. Estas funciones pueden ser ejecutadas automáticamente basadas en la entrada del operador, en el cambio de un tagname asociado para una condición, entre otras.

Además de estas funciones, SQL de Intouch brinda la posibilidad de crear nuevas tablas, insertar nuevos datos dentro de las tablas, editar los campos existentes, limpiar los datos de las tablas, eliminar tablas y navegar entre los datos generados por la aplicación.

Cuando la aplicación de SQL es ejecutada, los argumentos de la plantilla de la tabla definen la estructura del archivo de la base de datos. Al ejecutar las funciones de SQL, el argumento de la herramienta Bind List define los tagnames de Intouch que van a ser usados para la asociación de las columnas en las tablas de la base de datos. A continuación en la Figura 6.19 se muestra el funcionamiento del SQL Access Manager.

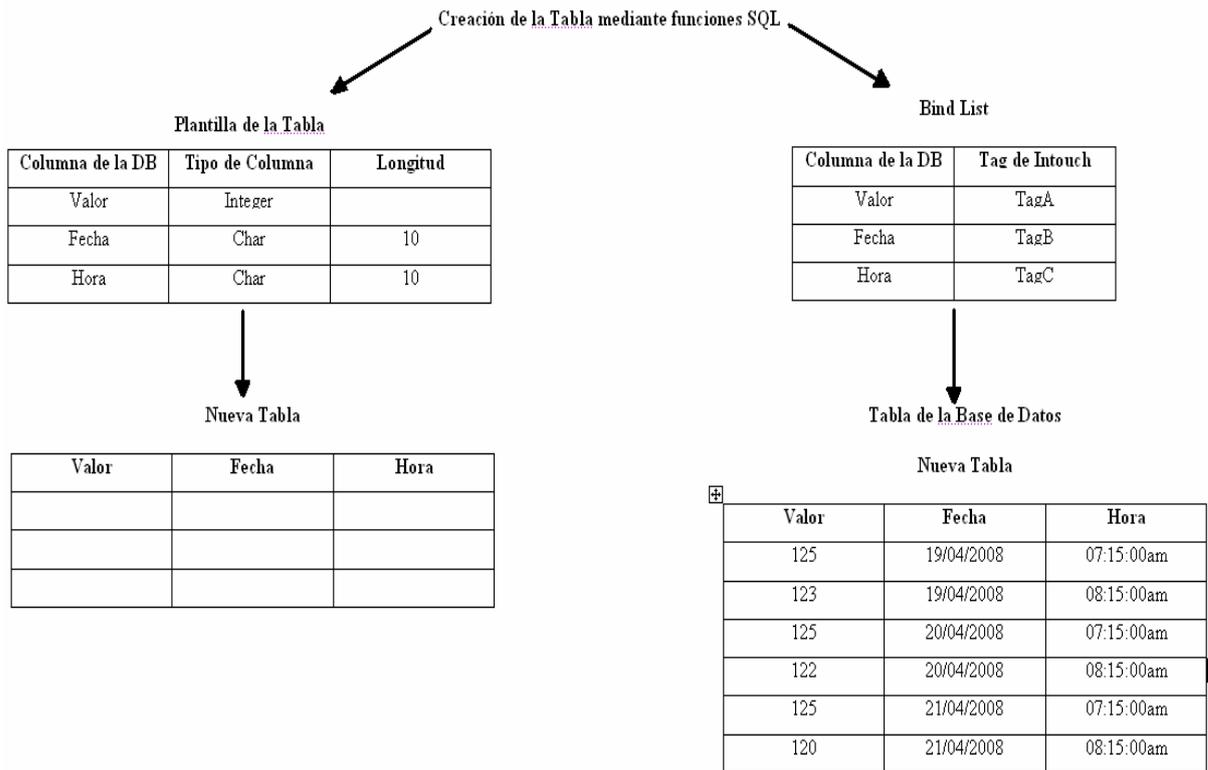


Figura 6.19. Proceso de funcionamiento de SQL Access Manager

6.3.7 Comunicaciones

La comunicación DDE. DDE es un protocolo de comunicaciones desarrollado por Microsoft para intercambio de datos entre aplicaciones Windows. DDE es un sistema estándar en Windows de uso simple, en el que la comunicación se establece automáticamente entre programas que contemplan la estructura DDE (cliente-servidor). Un programa que puede mandar datos al bus DDE es un programa servidor. Un programa cliente puede recibir datos DDE. Esta comunicación permite crear programas con gestiones especiales basados en software de programación de objetos, hojas de cálculo, entre otros y transferir los datos a InTouch sin necesidad de crear un programa de comunicaciones. Así ocurre con los servidores de autómatas que dispone Wonderware I/O Servers, entre los que se incluyen la gran mayoría de los PLCs más conocidos del mundo con comunicación punto a punto como en red. Intouch brinda la posibilidad de direccionar un servidor DDE a un puerto de comunicaciones y otro servidor a otro puerto, con lo que podemos compartir información que venga de distintos PLCs o sistemas de campo.

La comunicación que soporta el autómata Twido esta basada en el protocolo Modbus, para esto se utiliza el I/O Server de Modicon que dialoga Modbus para aplicaciones de Microsoft Windows con capacidades para actuar en DDE, Fast DDE o SuiteLink.

Es importante notar la convención dada para el Nombre del elemento (Item Name), que se maneja para estandarizar la comunicación de Modicon Modbus con los distintos dispositivos PLCs. El servidor permite seleccionar un tipo de esclavo cuando se configura la definición del tópico para el dispositivo. Los rangos de direcciones del PLC que soporta esta comunicación se indican en la Tabla 6.9.

Tabla 6.9. Convención para el manejo de los rangos de direcciones en el protocolo MODBUS

Tipo de PLC	Tipo de elemento	Rango	Tipo de tag	Acceso
484	Bobina	1-999	Discreto	Lectura/Escritura
	Contacto	1001-1999	Discreto	Sólo Lectura
	Registro de entrada	3001-3999	Análogo	Sólo Lectura
	Registro de almacenamiento	4001-4999	Análogo	Lectura/Escritura
584/984 Micro84	Bobina	1-9999	Discreto	Lectura/Escritura
	Contacto	10001-19999	Discreto	Sólo Lectura
	Registro de entrada	30001-39999	Análogo	Sólo Lectura
	Registro de almacenamiento	40001-49999	Análogo	Lectura/Escritura
6 dígitos	Bobina	1-65536	Discreto	Lectura/Escritura
	Contacto	100001-165536	Discreto	Sólo Lectura
	Registro de entrada	300001-365536	Análogo	Sólo Lectura
	Registro de almacenamiento	400001-465536	Análogo	Lectura/Escritura
	Registro de memoria exten.	600001-699999	Análogo	Lectura/Escritura

Utilizando esta convención y las recomendaciones del fabricante para el direccionamiento de los objetos de bit y de palabras en la lógica del programa, se acotan las siguientes consideraciones:

- Los contactos que se direccionan con las entradas discretas del autómata no se utilizan directamente para la comunicación mediante Modbus. Las bobinas que se direccionan con las salidas discretas del autómata no se utilizan directamente debido a que guardan su último estado de funcionamiento. Este inconveniente se resuelve utilizando contactos y bobinas auxiliares que se guardan en nuevos objetos de bit.
- Los contactos y bobinas almacenados en otras direcciones de objetos de bits se enlazan al I/O Server de Modicon utilizando el siguiente formato en el Item Name:

%M[n] =[n+1] desde 00001 hasta 09999

Por ejemplo: %M0 = 00001, donde la entrada/salida discreta asociada al objeto de bit %M0 ha sido almacenada en la lógica del programa.

- Para la conexión de las entradas/salidas analógicas y valores analógicos del autómata con el protocolo de comunicación se utilizarán direcciones de objetos de palabra asociados a las direcciones del controlador.
- En el caso de los registros asociados a objetos de palabra, se utilizará el siguiente formato para la lectura/escritura mediante el protocolo de comunicación de Modicon Modbus.

%MW[n] = [n+1] desde 40001 hasta 49999

Por ejemplo: %MW0 = 40001, donde el registro esta asociado al objeto de palabra en la lógica del programa.

CAPÍTULO 7

SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 SIMULACIÓN

7.1.1 Maqueta del Circuito de Reciclaje de Agua

Para la simulación del Sistema de Control y Monitoreo del Circuito de Reciclaje de Agua se utiliza un maqueta a escala 1:40, dimensionando los dispositivos para las acciones de control y monitoreo del proceso obtenidas en el simulador. Las tres tinas utilizadas son de material plástico de 51x40x32cm con capacidad para 54 litros. En esta simulación se desarrolla la etapa de captación y conducción del líquido y la etapa de reciclaje del líquido utilizado para la perforación.

En la primera etapa del circuito, se utiliza una tina para la simulación del proceso de acumulación del líquido que proviene desde la vertiente de agua. Seguido de esta, planteando un modelo no interactivo de tinas en serie, se encuentra la tina de dosificación, donde se agregan distintos materiales antes de ingresar a la perforación. Posterior a esta se encuentra la etapa de reciclaje, en cuyo caso se utilizará una tina para captar el líquido que proviene de la perforación y nuevamente enviar esta agua hacia la tina de acumulación. El diagrama de las dimensiones para la simulación del circuito se encuentra en el anexo que corresponde al modelamiento de la maqueta.

Para el diseño en maqueta, en lo correspondiente al Sistema de Control y Monitoreo de Flujo, se utiliza un sensor térmico ajustado a la tubería de media pulgada que conecta al sistema, como se indica en la Figura 7.1a. Este sensor cumple con el dimensionamiento para la simulación propuesta para mediciones cuya velocidad de flujo varía entre 0 a 150 cm/s en agua, con una temperatura permisible de trabajo entre 0 a 70°C y para una presión máxima de 200 bares. Para el control de flujo hacia la perforación,

se utiliza una bomba sumergible en servicio de descarga, para tubería de media pulgada, con una potencia de 30W y un caudal de 360GPH, como se ilustra en la Figura 7.1b.



Figura 7.1. a) Sensor de Flujo del Sistema. b) Bomba para el control de flujo del Sistema

Para el caso del diseño en maqueta del circuito, en lo correspondiente al Sistema de Control y Monitoreo de Nivel en las tinas del circuito, se utiliza interruptores de nivel de montaje vertical adaptados para actuar sobre dos niveles en las distintas tinas del circuito. Estos interruptores trabajan hasta una temperatura máxima de 105°C , presión máxima de 10 Bares y en diferentes tipos de líquidos debido a que su material de construcción es Tereftalato de Polibutileno en el cuerpo del interruptor y una aleación de Buna-N con Epóxica en el flotador.

En lo que se refiere al control del nivel, las bombas que controlan el paso de líquido desde la tina de acumulación hacia la tina de dosificación y la bomba que activa el retorno del líquido hacia la vertiente, actúan en servicio de descarga para tubería de media pulgada, con una potencia de 18W, un caudal máximo de 237GPH y se ilustran en la Figura 7.2a.

En el caso del control del nivel para la tina del líquido reciclado, se utiliza una bomba sumergible en servicio de descarga, en cuyo caso alcanza una altura máxima de 1.6 metros para tubería de media pulgada, con una potencia de 28W y un caudal máximo de 317GPH. Su instalación se muestra en la Figura 7.2b.



Figura 7.2. a) Interruptores de nivel y bombas para el control de nivel del sistema.
b) Tina de reciclaje del agua utilizada para la perforación

7.1.2 Panel de Control

El propósito del diseño del panel es elaborar un Sistema de Control que este ubicado dentro del proceso para que pueda ser manejado localmente por el operador, pero además pueda ser controlado y monitoreado de forma remota mediante la inclusión de un Sistema HMI-SCADA aprovechando las prestaciones del autómeta Twido.

El bastidor del Panel del Control es de material metálico de 40x60x20cm, contiene una clavija de seguridad en la parte central del extremo derecho con llave de tipo triangular y su apariencia se ilustra en la Figura 7.3a.

En el interior del bastidor en su parte posterior, existe una placa metálica de 36x54x2cm, que se utiliza para el montaje de las rieles DIN35 y de las canaletas plásticas ranuradas 33x33mm. El montaje de los dispositivos del panel de control se observa en la Figura 7.3b.



Figura 7.3. a) Vista frontal del panel de control.
b) Cableado y conexiones en Interior del panel

En la parte frontal del panel se encuentran los botones, switches y luces pilotos que se involucran en las operaciones de Control de Nivel y Flujo del Sistema. El panel de control se aprecia en la Figura 7.4.

- Control de Nivel: Dos formas de operación posibles:
 - Manual:
 - Switch Arranque/Parada Bomba 1
 - Switch Arranque/Parada Bomba 2
 - Switch Arranque/Parada Bomba 3
 - Automático:
 - Botón para Iniciar
 - Botón para Detener
- Control de Flujo: Switch para el Iniciar/Detener el controlador de flujo
- Luces piloto para indicación de funcionamiento de Bomba 1, Bomba 2, Bomba 3
- Luz piloto para indicar el funcionamiento del Control de Flujo del Sistema
- Bloque de Alarmas para indicar los niveles en las tinas del circuito.



Figura 7.4. Panel de Control del Sistema para el Circuito de Reciclaje de Agua

Los diagramas eléctricos y de montaje de los rieles y canaletas del panel de control se encuentran en el anexo que corresponde al panel de control.

7.2 PRUEBAS Y RESULTADOS

En el proceso de análisis de la maqueta del Circuito de Reciclaje de Agua, se han realizado modificaciones complementarias, que permiten un mejor desempeño en el Sistema de Control de Nivel y Flujo. Para el Control de Nivel del líquido, es importante la consideración de que las bombas no arranquen en vacío para evitar daños en su funcionamiento, por esta razón, los interruptores de nivel bajo se colocarán una altura mínima superior al nivel del mecanismo de succión de la bomba. La tubería que transporta el líquido desde la tina de acumulación hacia la tina de dosificación, en su tramo final, deberá estar ligeramente asentada, con un corte seccional en diagonal, con el objeto de evitar demasiada turbulencia en la tina y que la bomba para el Control de Flujo del sistema funcione de forma incorrecta.

Para el Control de Flujo de líquido, se ha colocado un depósito entre la tubería de conducción hacia la simulación de la perforación y la tubería de transporte desde la bomba. Este mecanismo de depósito cumple con dos funciones; la primera corresponde a la función de estabilizar el flujo de líquido que ingresa hacia el sistema, tomando en cuenta que esta variable tiene considerables desviaciones y su constante de tiempo es corta. La

otra función del depósito es evitar el efecto de vacío causado por la acción de la gravedad y el desnivel que se crea al descargar el líquido en el sistema.

Los resultados obtenidos con el diseño e implementación en maqueta son considerablemente confiables, donde se brinda un controlador rápido que garantiza que el nivel del líquido no sobrepasa la capacidad de las tinas del circuito pero a la vez se mantiene para la operación continua del sistema. Por otro lado, no existe el riesgo de que los elementos finales de control actúen en vacío, protegiendo su mecanismo de funcionamiento y por ende alargando su vida útil en operación. El Control de Flujo de Líquido cumple con el alcance inicialmente planteado de la utilización del recurso hídrico de forma mesurada. En la parte que involucra el proceso, se garantiza un flujo constante dependiendo de los parámetros ajustados en la consigna, que permiten compensar las pérdidas de líquido causadas por la infiltración dentro de la perforación y con esto lubricar y refrigerar eficientemente la herramienta de perforación, eliminando los detritos producidos por la acción abrasiva.

El desarrollo de la HMI, permite el Control y Monitoreo en tiempo real del proceso, reduciendo el tiempo en el tratamiento de los datos obtenidos en el circuito de reciclaje y aumentando la calidad en el proceso de perforación causado por la reducción de las maniobras y tareas repetitivas por parte del operador. Este análisis permite deducir la reubicación del personal operativo en tareas más críticas, que permiten optimizar el tiempo de obtención de testigos consiguiendo mayores y mejores resultados.

Para realizar el estudio de resultados en las pruebas sometidas al Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo de líquido es necesario cuantificar el proceso de análisis. Para este caso, se utiliza dentro de la simulación un flujo constante suministrado por la acometida de agua con un valor equivalente a 110 cc/s. En lo que corresponde al análisis del Sistema de Control del Nivel de Líquido, se ha realizado pruebas para obtener el comportamiento del proceso en un régimen constante, durante un período de dos días desde las 11:30 am del primer día hasta las 7:30pm del segundo día. El procedimiento a realizar consistió en utilizar la acometida de agua por un período aproximado de 45 minutos hasta observar un comportamiento de estabilización del Sistema de Control de nivel de Líquido. Para el caso, se obtuvo los eventos de niveles generados en las distintas

tinias, que se indican en la Tabla 7.1, donde el valor 0 corresponde a que no se ha generado un evento en el nivel del líquido y el valor 1 corresponde a la generación de un evento.

Tabla 7.1. Análisis de Resultados. Sistema de Control de Nivel

		SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO					
		ALARMAS Y EVENTOS					
DATE	TIME	T1ALTO	T1BAJO	T2ALTO	T2BAJO	T3ALTO	T3BAJO
4/24/2008	11:30:19 AM	0	0	0	0	0	0
4/24/2008	12:30:19 PM	0	0	0	0	0	0
4/24/2008	1:30:19 PM	0	1	0	0	0	0
4/24/2008	2:30:19 PM	0	0	0	0	0	0
4/24/2008	3:30:19 PM	0	0	0	1	0	0
4/24/2008	4:30:19 PM	0	0	0	0	0	1
4/24/2008	5:30:19 PM	0	0	0	0	0	0
4/24/2008	6:30:19 PM	0	0	1	0	0	0
4/24/2008	7:30:19 PM	0	0	0	0	1	0
4/24/2008	8:30:19 PM	0	0	0	0	0	0
4/24/2008	9:30:19 PM	0	0	0	0	0	0
4/24/2008	10:30:19 PM	0	0	0	0	1	0
4/24/2008	11:30:19 PM	0	0	0	0	0	0
4/25/2008	12:30:19 AM	0	0	0	0	0	0
4/25/2008	1:30:19 AM	0	0	0	0	0	0
4/25/2008	2:30:19 AM	0	0	0	0	0	0
4/25/2008	3:30:19 AM	0	0	0	0	0	1
4/25/2008	4:30:19 AM	0	0	0	0	0	0
4/25/2008	5:30:19 AM	0	0	0	0	0	0
4/25/2008	6:30:19 AM	0	0	0	0	0	0
4/25/2008	7:30:19 AM	0	1	0	0	1	0
4/25/2008	8:30:19 AM	0	0	0	0	0	0
4/25/2008	9:30:19 AM	0	0	0	0	0	0
4/25/2008	10:30:19 AM	0	0	0	0	0	0
4/25/2008	11:30:19 AM	0	0	0	1	0	0
4/25/2008	12:30:19 PM	1	0	0	0	0	1
4/25/2008	1:30:19 PM	0	0	0	0	0	0
4/25/2008	2:30:19 PM	0	0	1	0	0	0
4/25/2008	3:30:19 PM	0	0	0	0	0	0
4/25/2008	4:30:19 PM	0	0	0	0	0	1
4/25/2008	5:30:19 PM	0	0	0	0	0	0
4/25/2008	6:30:19 PM	1	0	0	0	0	0
4/25/2008	7:30:19 PM	0	0	0	0	0	0

En lo que corresponde al análisis de resultados del Sistema de Control de Flujo del proceso, se procedió a importar un reporte de los flujos de líquido obtenidos en la HMI hacia una hoja de cálculo de EXCEL. El procedimiento que se siguió fue controlar con dos distintos valores de consigna que corresponden a 165 cc/s y 180 cc/s, para posteriormente crear una perturbación a través de la válvula manual que simula la infiltración del líquido dentro de la perforación. La Tabla 7.2a y 7.2b indica los valores obtenidos en esta simulación para las consignas 165 y 180 cc/s respectivamente. Los valores de flujos marcados con negrilla indican el inicio de la perturbación.

Tabla 7.2. Análisis de Resultados. Sistema de Control de Flujo. a) Setpoint =165 b) Setpoint = 180

a			b		
DATE	TIME	FLUJO[cc/s]	DATE	TIME	FLUJO[cc/s]
4/24/2008	11:35:00 AM	13	4/24/2008	11:35:00 AM	8
4/24/2008	11:35:02 AM	138.6	4/24/2008	11:35:02 AM	128.2
4/24/2008	11:35:04 AM	165.6	4/24/2008	11:35:04 AM	178.9
4/24/2008	11:35:06 AM	165.4	4/24/2008	11:35:06 AM	180.3
4/24/2008	11:35:08 AM	165.3	4/24/2008	11:35:08 AM	180.5
4/24/2008	11:35:10 AM	165.3	4/24/2008	11:35:10 AM	180.4
4/24/2008	11:35:12 AM	165.8	4/24/2008	11:35:12 AM	181.2
4/24/2008	11:35:14 AM	165.4	4/24/2008	11:35:14 AM	180.6
4/24/2008	11:35:16 AM	165.6	4/24/2008	11:35:16 AM	136.7
4/24/2008	11:35:18 AM	165.4	4/24/2008	11:35:18 AM	132.5
4/24/2008	11:35:20 AM	165.3	4/24/2008	11:35:20 AM	157.7
4/24/2008	11:35:22 AM	165.5	4/24/2008	11:35:22 AM	153.9
4/24/2008	11:35:24 AM	123.5	4/24/2008	11:35:24 AM	176.7
4/24/2008	11:35:26 AM	121.6	4/24/2008	11:35:26 AM	178.6
4/24/2008	11:35:28 AM	135.7	4/24/2008	11:35:28 AM	181.7
4/24/2008	11:35:30 AM	158.6	4/24/2008	11:35:30 AM	181.1
4/24/2008	11:35:32 AM	163.6	4/24/2008	11:35:32 AM	180.7
4/24/2008	11:35:34 AM	165.2	4/24/2008	11:35:34 AM	180.5
4/24/2008	11:35:36 AM	165.3	4/24/2008	11:35:36 AM	180.4
4/24/2008	11:35:38 AM	165.6	4/24/2008	11:35:38 AM	180.4
4/24/2008	11:35:40 AM	165.4	4/24/2008	11:35:40 AM	180.3
4/24/2008	11:35:42 AM	165.5	4/24/2008	11:35:42 AM	180.3
4/24/2008	11:35:44 AM	165.3	4/24/2008	11:35:44 AM	180.5
4/24/2008	11:35:46 AM	165.2	4/24/2008	11:35:46 AM	180.2
4/24/2008	11:35:48 AM	165.3	4/24/2008	11:35:48 AM	180.4
4/24/2008	11:35:50 AM	165.2	4/24/2008	11:35:50 AM	180.3
4/24/2008	11:35:52 AM	165.4	4/24/2008	11:35:52 AM	180.5
4/24/2008	11:35:54 AM	165.6	4/24/2008	11:35:54 AM	180.4
4/24/2008	11:35:56 AM	165.4	4/24/2008	11:35:56 AM	180.3
4/24/2008	11:35:58 AM	165.3	4/24/2008	11:35:58 AM	180.5
4/24/2008	11:36:00 AM	165.6	4/24/2008	11:36:00 AM	180.3
4/24/2008	11:36:02 AM	165.4	4/24/2008	11:36:02 AM	180.5
4/24/2008	11:36:04 AM	165.3	4/24/2008	11:36:04 AM	180.5

7.3 ANÁLISIS COSTO – BENEFICIO

El concepto de eficiencia es definido como la relación existente entre los productos y los costos que la ejecución del proyecto implica. Este tipo de evaluación proporciona medidas de síntesis en un proyecto jerárquicamente desarrollado y adopta las decisiones pertinentes en base de criterios racionales.

Cuando los resultados y costos del proyecto pueden traducirse en unidades monetarias, su evaluación se realiza utilizando la técnica del Análisis Costo-Beneficio, sin embargo los impactos no siempre pueden ser valorizados en moneda, por lo que se requiere de un Análisis Costo-Efectividad. La particularidad de esta técnica, radica en comparar los costos con la potencialidad de alcanzar más eficaz y eficientemente los objetivos no expresables en moneda o con la eficacia y eficiencia diferencial real que las distintas formas de implementación han mostrado en el logro de sus objetivos.

En el caso concreto del diseño del Sistema de Control y Monitoreo del Circuito de Reciclaje de Agua, se plantea un análisis que muestre su factibilidad de implementación, expresado en moneda, pero además un estudio de impacto que brinda el mejoramiento en la efectividad del proceso ya implantado, con muestras obtenidas en la simulación del prototipo del sistema.

7.3.1 Análisis de prefactibilidad

Dentro del análisis de prefactibilidad se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- Requerimientos de un aumento en los resultados del proceso
- Requerimientos de una mejora en la calidad del proceso
- Necesidad de bajar los costos en el desarrollo del proceso
- Necesidad de protección ambiental
- Necesidad de brindar seguridad al personal
- Desarrollo de nuevas tecnologías

Basado en el estudio de campo del proceso, el alcance del proyecto es automatizar el Circuito de Reciclaje de Agua, tomando en cuenta que ya se tiene implementado un proceso y se desarrolla un diseño en base de los parámetros que ya están en funcionamiento. La prefactibilidad comprende también el análisis de tiempo que tomará efectuar el proyecto incluyendo su estudio y aprobación. Este análisis se desarrolló en un Diagrama de Gantt y se encuentra en el Anexo 8.

Para obtener el Sistema de Control y Monitoreo se desarrolló un proceso de diseño, simulación y análisis de resultados mediante el uso tecnológico de un Controlador Lógico Programable de la marca TWIDO de la familia TELEMECANIQUE y el desarrollo de una interfaz HMI-SCADA en el software de integración Intouch V 9.5 de la firma Wonderware.

7.3.2 Análisis Costo-Efectividad

La automatización es viable, cuando al evaluar los beneficios económicos y sociales de las mejoras que se podrían obtener al automatizar, estas son mayores a los costos de operación y mantenimiento del sistema. La automatización de un proceso frente al control manual del mismo, brinda ciertas ventajas y beneficios de orden económico, social y tecnológico. El Sistema de Control y Monitoreo del Circuito de Reciclaje de Agua que se presenta en este proyecto brinda los siguientes beneficios y ventajas:

- Se asegura mejoramiento en la calidad del trabajo del operador y en el desarrollo del proceso, certificando la eficiencia del sistema implementado.
- Se obtiene una reducción de costos, puesto que se racionaliza el trabajo, se reduce el tiempo y dinero dedicado al mantenimiento.
- Existe una reducción en los tiempos de procesamiento de información.
- Flexibilidad para adaptarse a nuevos procesos (sistema flexible y multiproceso).
- Se obtiene un conocimiento más detallado del proceso, mediante la recopilación de información y datos estadísticos del proceso.
- Se obtiene un mejor conocimiento del funcionamiento y desarrollo de los equipos y máquinas que intervienen en el proceso.

- Factibilidad técnica en procesos y en operación de equipos.
- Factibilidad para la implementación de funciones de análisis, optimización y autodiagnóstico.
- Aumento en el rendimiento de los equipos y facilidad para incorporar nuevos equipos y sistemas de información.
- Disminución de la contaminación y daño ambiental.
- Racionalización y uso eficiente de la energía; en particular del recurso hídrico que se utiliza para el proceso.
- Aumento en la seguridad de las instalaciones y la protección a los trabajadores.

Dentro de este análisis, existen ciertos requisitos de importancia que debe cumplirse al realizar un proyecto de automatización.

- **Expansibilidad y escalabilidad:** Es una característica del sistema que le permite crecer para atender las ampliaciones futuras en el proceso, o para atender las operaciones no tomadas en cuenta al inicio de la automatización. Se analiza bajo el criterio de análisis costo-beneficio, típicamente suele dejarse una reserva en capacidad instalada ociosa alrededor de 10% a 25%.
- **Manutención:** Se refiere a tener disponible por parte de la empresa, un grupo de personal capacitado, que brinde el soporte técnico adecuado cuando se necesite de manera rápida y confiable. Además implica que el proveedor cuente con repuestos en caso sean necesarios.
- **Sistema abierto:** Los sistemas deben cumplir los estándares y especificaciones internacionales. Esto garantiza la interconectividad y compatibilidad de los equipos a través de interfaces y protocolos, también facilita la interoperabilidad de las aplicaciones y el traslado de un lugar a otro.

7.3.3 Inversión Inicial

La inversión inicial presenta todos los costos que se involucran en el proceso de adquisición de equipo e instrumentos necesarios para la automatización del sistema. Los costos de la inversión inicial se indican en las Tablas 7.3 hasta 7.8.

Tabla 7.3. Inversión Inicial. Implementación de equipo en el proceso

Material	Cantidad	Valor Unitario USD	Valor Total USD	Proveedor
Implementación en el proceso				
Fuente Eléctrica conmutable de 120/240 VAC a 12/24/48 VDC	1	120.0	120.0	IANDCE CONTROL S.A.
Válvula Solenoide EBC 110VAC tubería 2-1/2"	2	80.05	160.1	INDUELEC S.A.
Interruptor de nivel de montaje horiz. WE Anderson serie F7	7	45.00	315.0	IANDCE CONTROL S.A
Sensor de flujo tubería 2-1/2 " 5-30GPM con transmisor de 0-10V/4(0) – 20mA NEWPORT Serie FP	1	498.5	498.5	NEWPORT S.A
Bomba centrífuga sumergible MaxiFalls Standard 115VAC 1.5 HP 3000GPH	1	250.0	250.0	LA LLAVE S.A
Válvula proporcional solenoide ASCO tubería 2-1/2" serie 8202 con unidad de control	1	480.0	480.0	LA LLAVE S.A

Tabla 7.4. Inversión Inicial. Tablero de Control

Material	Cantidad	Valor Unitario USD	Valor Total USD	Proveedor
Tablero de Control				
Caja metálica 60x40x20 SQUARE D	1	80.00	80.00	ELSYSTEC S.A
PLC TWIDO base 14IN / 10 OUT TWDLCAA24DRF	1	268.8	268.8	ELSYSTEC S.A
Expansión 4 IN, 2 OUT Analógicas TWDAMM6HT	1	283.5	283.5	ELSYSTEC S.A
Cable de programación TWDSPU1001V10M	1	193.48	193.48	ELSYSTEC S.A
Riel DIN 35mm Longitud 1 m	2	1.00	2.00	KRIPTON
Canaleta Ranurada 33 x33mm x 2 metros	1	3.95	3.95	JVCA
Borneras par riel DIN AWG 16-20	20	0.88	17.60	JVCA
Borneras para tierra AWG 16	2	2.42	4.84	JVCA
Porta Fusible y Fusible 10 x 38 mm 15A	1	1.65	1.65	JVCA
Porta Fusible y Fusible 10 x 38 mm 2A	7	1.65	4.95	JVCA
Interruptor electromagnético Merlin Gerin 2P – 6A	2	7.92	15.84	JVCA
Bornera V-0800 4mm	4	0.35	1.40	JVCA
Switch 22mm LAY5-BC4 IP 65	4	2.24	8.96	JVCA

Tabla 7.5. Inversión Inicial. Tablero de Control

Material	Cantidad	Valor Unitario USD	Valor Total USD	Proveedor
Tablero de Control				
Pulsante color rojo 22mm NA IP 65	1	1.80	1.80	KRIPTON
Pulsante color verde 22mm NA IP 65	1	1.80	1.80	KRIPTON
Pulsante de emergencia 22mm tipo hongo con enclavamiento	1	10.75	10.75	CENELSUR
Luz piloto distintos colores 110-220V 22mm CAMSCO	10	3.250	32.50	CENELSUR
Cinta helicoidal de protección KS-8	1	2.70	2.70	JVCA
Correa plástica 10cm 100 unidades	1	2.00	2.00	JVCA
Codificador de alambre No 0 -9	1	5.00	5.00	JVCA
Cable flexible TFF No.18 AWG Rojo	50 m	0.144	7.20	JVCA
Cable flexible TFF No.18 AWG Negro	50 m	0.144	7.20	JVCA
Cable flexible TFF No.16 AWG Azul	50 m	0.160	8.00	JVCA

Tabla 7.6. Inversión Inicial. Desarrollo HMI y comunicación

Material	Cantidad	Valor Unitario USD	Valor Total USD	Proveedor
Interfaz HMI-SCADA				
Software de programación TWIDO	1	Incluido con cable de programación	-	ELSYSTEC S.A
Software de desarrollo HMI-SCADA Intouch V10.0 con licencia de utilidades para 1000 tags, I/O Servers, Factory Suit, Industrial SQL Server.	1	6000.0	6000.0	Wonderware para América Latina
Comunicación				
Kit STKWLINK8S: 2 radio modems WLINK8S 868 Mhz, 10mW, 20 canales, 19200 bps. Cables de interfase RS-232 instaladores	1	1019.72	1019.72	DmdOpen
Antena Yagui 868Mhz de 8 elementos , accesorios antena y latiguillo conector	2	59.00	118.00	DmdOpen

Tabla 7.7. Inversión Inicial. Implementación y capacitación

Material	Cantidad	Valor Unitario USD	Valor Total USD	Proveedor
Implementación				
Implementación y puesta en marcha del sistema		600.00	600.00	Personal de la empresa y/o contratación
Capacitación				
Capacitación de personal y operadores		Recursos de la empresa.	300.00	Personal de la empresa
SUBTOTAL EN USD			10827.24	

Tabla 7.8. Inversión Inicial. Total General

SUBTOTAL USD		10827.24
Impuesto (IVA)	12%	1299.27
Gastos generales e imprevistos	10% sobre SUBTOTAL + IVA	1212.65
TOTAL USD		13339.16
Gasto Inicial de la Empresa USD		-1242.3
TOTAL GENERAL USD		12096.86

Una vez obtenido el gasto de la inversión inicial del proyecto se analiza y justifica la inversión en cada una de las perspectivas del beneficio. En el caso de este análisis se utiliza el Método del Retorno de Inversión (Taza Interna de Retorno-TIR), en donde previamente se obtiene un Análisis de los beneficios monetarios causados por la implementación del proyecto.

Tabla 7.9. Análisis de Detalle en Beneficios

Análisis de Detalle en Beneficios				
Detalle	Cantidad en 1 año	Valor Unitario USD	Valor en 1 año USD	Valor en 3 años USD
Reducción en pérdidas del material para el proceso	100 libras	10.00	1000.00	3000.00
Reducción en la reubicación del personal operativo	4	500.00	2000.00	6000.00
Optimización y seguridad del proceso mediante automatización	-	1000.00	1000.00	3000.00
Optimización en la protección ambiental	-	3000.00	3000.00	9000.00
Impacto tecnológico en el desarrollo social	-	2000.00	2000.00	6000.00
TOTAL USD		6510.00	9000.00	27000.00

7.3.4 Método de Retorno de Inversión

Este método consiste en calcular el costo y beneficio anual, sabiendo el costo total al iniciar el proyecto. El desarrollo de este análisis permite saber en que año se recupera el costo total inicialmente evaluado en el proyecto, donde el año de recuperación de la inversión es estimada, cuando la sumatoria de los beneficios netos es igual o mayor al costo total del inicio del proyecto. Se considera el crecimiento anual de Costos y

Beneficios mediante un índice para su evaluación en el proyecto, tomando la tasa de interés activa para abril del 2008 del 10.17% y la ecuación 4.1 para el Valor Actual Neto.

$$\text{Valor Actual} = \text{Valor} + \frac{r}{100} (\text{Valor}) \cdot n \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde: *Valor* representa el beneficio o costo en los diferentes años

r representa el interés utilizado en la evaluación

n representa el año

7.3.4.1 Primer Escenario. Para el análisis del retorno de Inversión, se crea un primer escenario donde se considera la inversión inicial obtenida en la Tabla 7.8, para el primer año. En el segundo año se considera una acción de mantenimiento correctivo y reparación de los instrumentos del proceso con una base de USD 1000. Bajo este Costo, el valor que representará en el tercer año dicha acción de mantenimiento y reparación está calculado con la *Ecuación 4.1* que obtiene el valor actual neto en esa consideración.

El valor del Beneficio para el primer año generado en una base de USD 9000, se obtiene del Análisis de Detalle en Beneficios considerando el valor adquirido en el año 1, tomado de la Tabla 7.9. Para el segundo y tercer año de beneficios se considera el valor actual neto con los parámetros planteados. Los valores obtenidos se representan en la Tabla 7.10

$$\text{Valor Actual} = \text{Valor} + \frac{r}{100} (\text{Valor}) \cdot n$$

$$\text{Valor Actual en Costo para el 3° año en USD} = 1000 + \frac{10.17}{100} (1000) \cdot 3$$

$$\text{Valor Actual en Costo para el 3° año en USD} = 1305.10$$

$$\text{Valor Actual en Beneficio para el 2}^\circ \text{ año en USD} = 9000 + \frac{10.17}{100} (9000) \cdot 2$$

$$\text{Valor Actual en Beneficio para el 2}^\circ \text{ año en USD} = 10830.60$$

$$\text{Valor Actual en Beneficio para el 3}^\circ \text{ año en USD} = 9000 + \frac{10.17}{100} (9000) \cdot 3$$

$$\text{Valor Actual en Beneficio para el 3}^\circ \text{ año en USD} = 11745.90$$

Tabla 7.10. Análisis de Retorno de Inversión: Primer Escenario

Retorno de Inversión: Primer Escenario			
Año	Costo USD [Ci]	Beneficio USD [Bi]	Beneficio Neto USD [Bi - Ci]
1	12096.86	9000.00	-3096.86
2	1000.00	10830.60	9830.60
3	1305.10	11745.90	10440.80
Sumatoria del Beneficio Neto USD [Σ(Bi-Ci)]			17174.54

7.3.4.2 Segundo Escenario. Al igual que en el caso anterior, se crea un segundo escenario donde se considera la misma inversión inicial obtenida en la Tabla 7.8, para el primer año. En el segundo año se considera una acción de mantenimiento correctivo, reparación y un reemplazo en los instrumentos del proceso con una base de USD 1500. Para el análisis bajo este Costo, el valor que representará en el tercer año dicha acción de mantenimiento, reparación y reemplazo está calculado con la *Ecuación 4.1* que obtiene el valor actual neto con los parámetros planteados. El valor del Beneficio para el primer año generado en una base de USD 9000, se obtiene del Análisis de Detalle en Beneficios considerando el valor adquirido en el año 1, tomado de la Tabla 7.9. Para el segundo y tercer año de beneficios se considera el valor actual neto con los parámetros planteados. Los valores obtenidos se representan en la Tabla 7.11.

$$\text{Valor Actual} = \text{Valor} + \frac{r}{100}(\text{Valor}) \cdot n$$

$$\text{Valor Actual en Costo para el 3° año en USD} = 1500 + \frac{10.17}{100}(1500) \cdot 3$$

$$\text{Valor Actual en Costo para el 3° año en USD} = 1957.65$$

$$\text{Valor Actual en Beneficio para el 2° año en USD} = 9000 + \frac{10.17}{100}(9000) \cdot 2$$

$$\text{Valor Actual en Beneficio para el 2° año en USD} = 10830.60$$

$$\text{Valor Actual en Beneficio para el 3° año en USD} = 9000 + \frac{10.17}{100}(9000) \cdot 3$$

$$\text{Valor Actual en Beneficio para el 3° año en USD} = 11745.90$$

Tabla 7.11. Análisis de Retorno de Inversión: Segundo Escenario

Retorno de Inversión: Segundo Escenario			
Año	Costo USD [Ci]	Beneficio USD [Bi]	Beneficio Neto USD [Bi - Ci]
1	12096.86	9000.00	-3096.86
2	1500.00	10830.60	9330.60
3	1957.65	11745.90	9788.25
Sumatoria del Beneficio Neto USD [Σ(Bi-Ci)]			16021.99

7.3.4.3 Tercer Escenario. Por último se crea un tercer escenario donde se considera la misma inversión inicial obtenida en la Tabla 7.8, para el primer año. En el segundo año se toma en cuenta una acción de mantenimiento correctivo, reparación y reemplazos de distintos instrumentos del proceso con una base de USD 2000, consideración que es extrema en comparación con la inversión inicial, pero por objeto de análisis ha sido tomada en cuenta. El valor que representará en el tercer año esta acción de mantenimiento,

reparación y reemplazos de instrumentos está calculado con la *Ecuación 4.1* que obtiene el valor actual neto en los parámetros planteados. El valor del Beneficio para el primer año generado en una base de USD 9000, se obtiene del Análisis de Detalle en Beneficios considerando el valor adquirido en el año 1, tomado de la Tabla 7.9. Para el segundo y tercer año de beneficios se considera el valor actual neto con los parámetros planteados. Los valores obtenidos se representan en la Tabla 7.12.

$$\text{Valor Actual} = \text{Valor} + \frac{r}{100} (\text{Valor}) \cdot n$$

$$\text{Valor Actual en Costo para el 3° año en USD} = 2000 + \frac{10.17}{100} (2000) \cdot 3$$

$$\text{Valor Actual en Costo para el 3° año en USD} = 2610.20$$

$$\text{Valor Actual en Beneficio para el 2° año en USD} = 9000 + \frac{10.17}{100} (9000) \cdot 2$$

$$\text{Valor Actual en Beneficio para el 2° año en USD} = 10830.60$$

$$\text{Valor Actual en Beneficio para el 3° año en USD} = 9000 + \frac{10.17}{100} (9000) \cdot 3$$

$$\text{Valor Actual en Beneficio para el 3° año en USD} = 11745.90$$

Tabla 7.12. Análisis de Retorno de Inversión: Tercer Escenario

Retorno de Inversión: Tercer Escenario			
Año	Costo USD [Ci]	Beneficio USD [Bi]	Beneficio Neto USD [Bi - Ci]
1	12096.86	9000.00	-3096.86
2	2000.00	10830.60	8830.60
3	2610.20	11745.90	9135.70
Sumatoria del Beneficio Neto USD [Σ(Bi-Ci)]			14869.44

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

Los actuales procesos de intervención minera que están incursionando en el país, desarrollan y buscan metodologías de prospección, exploración y producción enfocadas en el manejo sustentable de los recursos de la zona, disminuyendo impactos ambientales y sociales relacionados principalmente con el deterioro de los elementos físico - bióticos del lugar y por otra parte, con los desequilibrios sociales, culturales y organizacionales de las comunidades en el área de influencia del plan minero.

El desarrollo de este proyecto se enfoca en la utilización controlada del recurso hídrico para el proceso de perforación en la zona de exploración. El alcance de este, se ha logrado con un diseño para el Sistema de Control y Monitoreo de Nivel y Flujo de líquido utilizado en el Circuito de Reciclaje de Agua para el proceso de perforación, partiendo del sistema ya implantado que se controla de forma manual por el personal de operación. Para esto, se analizó las variables involucradas en el sistema y cada componente que interviene en el proceso de perforación.

Con el propósito de probar el diseño obtenido y lograr una simulación del proceso, se ha desarrollado una maqueta que cumple con los requerimientos y parámetros planteados para conseguir el sistema de control de nivel y flujo.

Una vez implantada la maqueta de simulación del circuito, se procedió al análisis de la instrumentación más idónea que se adapta a los parámetros y estrategias de control. Los dispositivos utilizados fueron dimensionados para el proceso de simulación; sin embargo,

la implementación del panel de control tiene el propósito de ser utilizado en el proceso real.

Se obtuvo un sistema de control de nivel que minimiza las fallas operativas, lo que en el proceso significa liberar al personal de tareas repetitivas y reducir los inconvenientes causados por fallas al no obtener un procedimiento sistemático. El sistema de control de nivel responde de manera rápida y eficiente garantizando que el nivel de líquido no sobrepase la capacidad de las tinajas del circuito, provea de manera permanente líquido para el proceso, resguarde el funcionamiento de los actuadores y no trabaje cuando sea innecesario, de tal forma que se logre extender o conservar la vida útil de los elementos finales de control.

En lo que concierne al control de flujo se obtuvo un sistema que incrementa los niveles de calidad del proceso, utilizando de forma mesurada el líquido que ingresa hacia la perforación mediante la inclusión de un controlador tipo PI; con un diseño flexible en funcionamiento que se logra por la opción de modificar los parámetros del controlador.

El autómata utilizado para el proyecto es el Twido de base compacta TWDLCAA24DRF con el módulo de E/S análogas TWDAMM6HT, que cumple con el dimensionamiento para el Sistema de Control y Monitoreo. Este PLC verifica los factores cuantitativos para su selección, que incluyen el número de entradas/salidas, capacidad de memoria, posibilidad de crecimiento del sistema y alimentación; y en los factores cualitativos, que incluyen las condiciones físicas y ambientales de trabajo, opciones avanzadas de control, compatibilidad, comunicaciones y servicios adicionales.

La HMI obtenida en el diseño está orientada al control y adquisición de datos en tiempo real, mediante la utilización del software de integración Intouch y el software de administración de base de datos SQL Server. El diseño planteado es de arquitectura abierta y flexible con la posibilidad de expansiones o modificaciones, adquiridas por las prestaciones del autómata Twido. El protocolo de comunicación utilizado para la conexión HMI-PLC es el MODBUS RTU en modo Slave y el driver utilizado para su conexión con Intouch es el de Wonderware I/O Server Modicon Modbus que permiten la comunicación

serial entre el autómata y la PC, bajo el cable de interface que transforma el estándar RS-485 del puerto del Twido al estándar RS-232 para el puerto de la PC. Las alarmas y eventos generados en el sistema son conectados con una base de datos y sus reportes se obtienen mediante Microsoft EXCEL.

Por último se realiza un análisis de costo-beneficio del proyecto, donde se obtiene la prefactibilidad de implementarlo en el proceso real, ensayado desde el método de Retorno de Inversión contando con tres distintos escenarios que permiten visualizar los parámetros para la inversión del Sistema planteado.

8.2 RECOMENDACIONES

Al realizar el análisis de instrumentación del sistema, es importante que los dispositivos que se adquieran, estén dimensionados de acuerdo a las características del proceso pero también tomando en cuenta los parámetros dados por el fabricante para su funcionamiento.

Considerando el ambiente de trabajo al que está involucrado el Sistema; temperatura, humedad, hostilidad del ambiente, corrosión, polvo, ruido y áreas peligrosas por el manejo de sustancias inflamables y explosivas, se debe obtener dispositivos que cumplan con las certificaciones para el funcionamiento bajo estos ambientes y la correcta clasificación para las áreas peligrosas. Por otro lado, para la adquisición de los dispositivos de control y monitoreo es importante obtener proveedores garantizados, de preferencia en el área local, que suministren un stock dentro del país en caso de reemplazo o mantenimiento de los equipos, con recursos de capacitación e información permanente del material entregado.

En el caso de utilizar acondicionamiento de las señales para el Sistema, se recomienda manipular dispositivos que funcionen correctamente bajo los ambientes del proceso. Para evitar dificultades en el tratamiento de estas señales es conveniente utilizar equipos de medición y control que se dimensionen de acuerdo a las capacidades del controlador utilizado para el desarrollo del sistema. Los sensores que se utilicen en la instrumentación deben cumplir en lo posible la linealidad en su respuesta, de esta forma se evita el acondicionamiento de la señal transmitida y ajuste en la programación. El panel de

control implementado debe contar con las respectivas protecciones para sobretensión y sobrecorriente en los elementos primarios de medición, elementos finales de control y preactuadores.

Se recomienda que los diseños del sistema de control y monitoreo desarrollados estén basados en los criterios de estabilidad, precisión, velocidad de respuesta y sensibilidad para obtener procesos confiables y eficientes que cumplan con los requerimientos técnicos para su funcionamiento.

Para establecer la comunicación mediante el protocolo MODBUS del I/O Server de Wonderware para Modicon se recomienda utilizar la convención estandarizada para el direccionamiento y lectura de los nombres de los elementos (Item Name) para el diálogo con Modbus, considerando que el direccionamiento utilizado en el software de programación TwidoSuite no es compatible para la lectura/escritura en el PLC desde la HMI.

Las direcciones de las entradas/salidas analógicas y discretas del controlador deben ser transferidas a objetos de bit y palabra para su conexión con Intouch y direccionadas de acuerdo a la convención utilizada para la comunicación mediante Modbus.

Para la adquisición de Intouch y sus utilidades se recomienda adquirir una licencia con un mínimo de 500 tags para el desarrollo de la aplicación, tomando en cuenta las posibles expansiones y más de un Sistema de Control y Monitoreo en el proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. OGATA, Katsuhiko, **Ingeniería de Control Moderna**, Tercera Edición, Editorial Prentice Hall Hispanoamericano, México 1998, pp 476-520.
2. SMITH, Carlos; CORRIPIO, Armando, **Control Automático de Procesos**, Segunda Edición, Editorial Limusa, México 1997, pp 107-145.
3. FRANKLIN, G; POWELL; EMANI, Naeini, **Control de Sistemas Dinámicos con Retroalimentación**, Segunda Edición, Editorial Addison-Wesley Iberoamericana, México 1991, pp 210-230.
4. JOHNSON, Curtis, **Process and Control Instrumentation Technology**, Sexta Edición, Editorial Prentice Hall, USA 1993, pp 430-480.
5. BALCELLS, Joseph; ROMERAL, José, **Autómatas Programables**, Segunda Edición, Serie Mundo Electrónico, Editorial AlfaOmega, México 1998, pp180-215.
6. PALLAS, Ramón; **Sensores y Acondicionadores de señal**, Tercera Edición, Editorial AlfaOmega, España 2001, pp350-370.

7. OCKERT, Kart; **Practical Wastewater Pretreatment Strategies for Small Breweries**, Tercera Edición, Publication no.T-2002-0.307-07 en la MBAA, USA 2006, pp 80-120.
8. SANS, Ramón; RIVAS, Joan, **Ingeniería Ambiental: Contaminación y Tratamientos**, Primera Edición, Editorial Marcobo, España 1989, pp 110-160.
9. Informe de Auditoria Ambiental al proyecto Quimsacocha, AMBIGEST CIA. LTDA., Ecuador 2007.
10. www.schneiderelectric.com/support/downloads, Twido User Reference Manual, Hardware Portion, TWD USE 10AE Eng1.0
11. www.schneiderelectric.com/support/downloads, Twido Software Reference Manual, TWD USE 10AE EngVersion 4.0
12. www.schneiderelectric.com/support/downloads, Twido programmable controllers, Software Reference Guide, TWD USE 10AE Eng Version 3.2
13. www.schneiderelectric.com/support/downloads, Twido S1061 Version A, Modbus & macro.

ANEXO 1

ADVERTENCIAS Y RECOMENDACIONES PARA EL USO DEL AUTÓMATA TWIDO

El controlador lógico programable TWIDO TWDLCAA24DRF y sus módulos de expansión están diseñados para trabajar en zonas especificadas dentro de la Clase 1, División 2, Grupos A, B, C, D. La sustitución de los componentes del equipo puede causar que su desempeño dentro de la Clase 1, División 2 falle. El manipular este equipo y no considerar la clasificación del área peligrosa a la que pertenece puede causar severos daños en el equipo, perjuicios personales o incluso la muerte. Las advertencias y precauciones del uso de este equipo están especificadas en la literatura posterior.

El uso de este equipo eléctrico debe ser llevado a cabo solamente por personal calificado en lo correspondiente al desarrollo de la aplicación, implementación y mantenimiento. A continuación se detallan las precauciones y advertencias necesarias para el manejo del equipo.

 PELIGRO
<p>Peligro de shock eléctrico, quemadura o explosión. Apagar toda la alimentación antes de iniciar la instalación, remoción, cableado, mantenimiento o inspección del sistema de relees inteligentes.</p> <p>El fallo de estas instrucciones puede causar la muerte o serios daños personales.</p>

 ADVERTENCIA
<p>Recomendaciones para el uso del equipo:</p> <ul style="list-style-type: none">• Apagar la alimentación antes de instalar, remover, cablear o realizar mantenimiento.• Este producto no es recomendado para funciones críticas de la máquina. Si existe peligro para el personal o equipo, usar apropiados interruptores de seguridad.• No desarmar, reparar o modificar los módulos.• Este equipo es diseñado para uso en un lugar cerrado.• Instalar los módulos en las condiciones de ambiente de operación descritas.• Usar la fuente de alimentación de los sensores únicamente para alimentar a los que están conectados al módulo.



ADVERTENCIA

- Para la línea de alimentación y circuitos de salida, usar fusibles de estándar tipo T IEC 60127. Los fusibles deben cumplir con los requerimientos de voltaje y corriente del circuito.

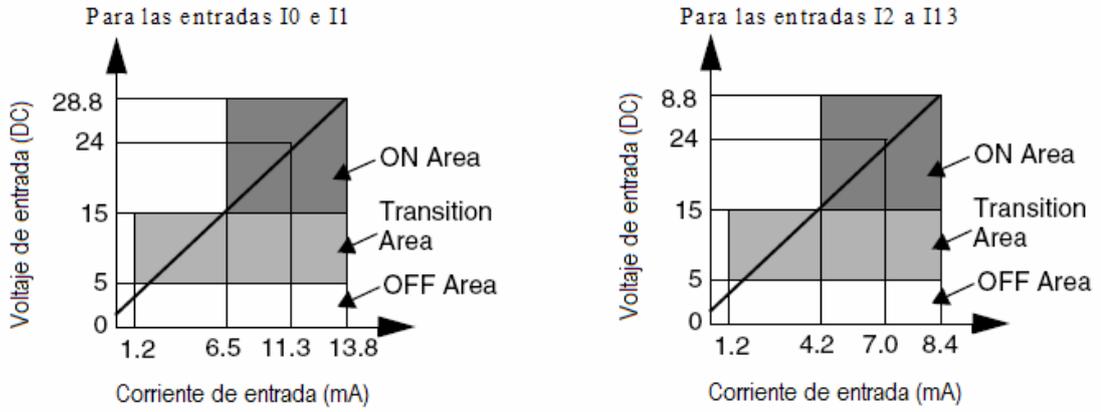
Recomendado: series 218 Littelfuse, 5x20mm, fusibles de tiempo de retardo.

El fallo de estas instrucciones puede causar la muerte o serios daños personales.

Reglas y Recomendaciones para el cableado

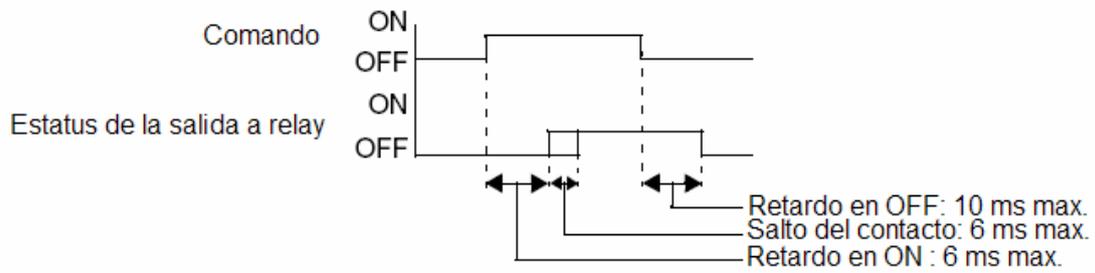
- Cada terminal acepta cables desde 18 AWG(0.82mm²) hasta 28 AWG(0.08mm²).
- La protección de las salidas del módulo son responsabilidad del usuario. Se debe seleccionar un fusible adecuado para la carga, respecto a los códigos eléctricos.
- Dependiendo de la carga, se debe usar un circuito de protección para las salidas a rele del módulo.
- El cable de la fuente de alimentación debe estar entre 16 AWG (1.30mm²) y 22 AWG (0.33mm²). Usar la menor longitud de cable posible.
- El cable de puesta a tierra debe ser 16 AWG (1.30mm²).
- Los cables de la fuente de poder enrutados al interior de un panel deben permanecer separados de los cables de alimentación, cableado de E/S y cableado de comunicación. Separar los ductos para los distintos cableados.
- Tener cuidado en el cableado de salida de los módulos que están diseñados para trabajar ya sea en alimentación positiva o negativa. El cableado incorrecto puede causar serios daños al equipo.
- Asegurarse de que las condiciones de operación y ambientales están dentro de los valores especificados.
- Utilizar los tamaños adecuados de cable según los requerimientos de voltaje y corriente.

Recomendación: El rango de operación de las entradas del controlador según la normativa IEC 61131-2 se muestra en la siguiente figura.



Rango de operación de entradas en el controlador TWDLCAA24DRF

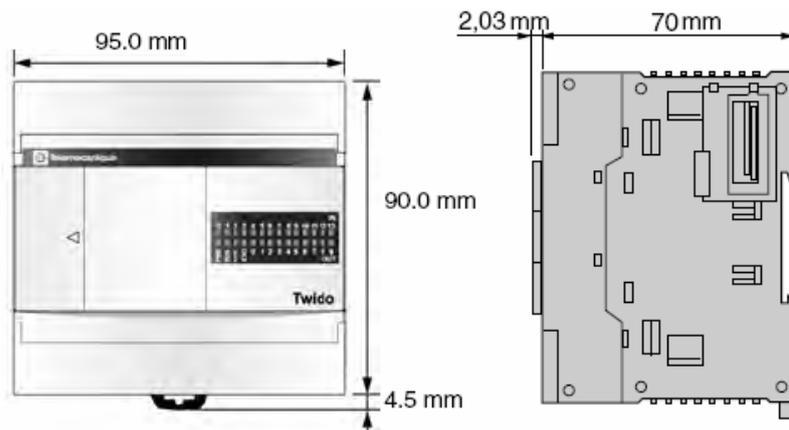
Recomendación: Existe un retardo en las salidas del controlador que se debe tomar en cuenta para la instalación del sistema.



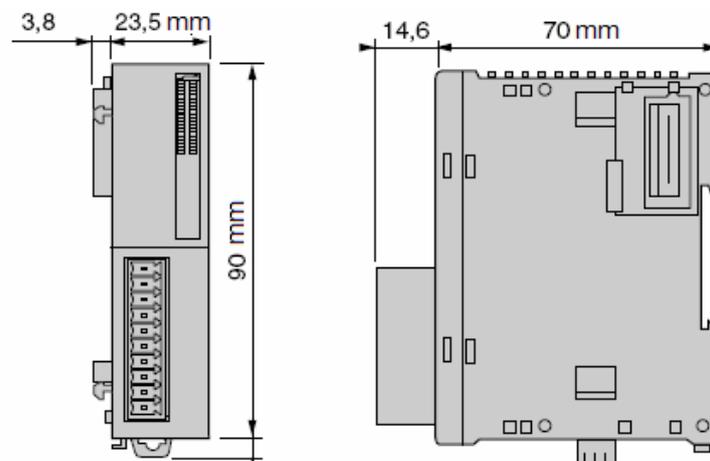
Retardos del controlador

Dimensiones

La siguiente figura indica las dimensiones del controlador TWDLCAA24DRF y del módulo de E/S analógicas TWDAMM6HT en vista frontal y lateral de la base.



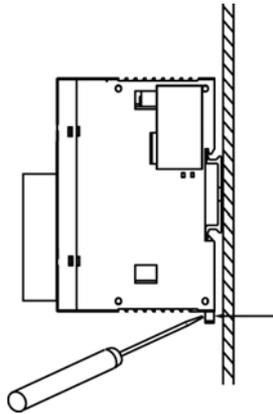
Controlador TWDLCAA24DRF



Módulo de E/S analógicas TWDAMM6HT

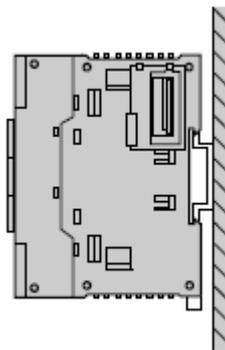
Montaje

Todas las bases y módulos del controlador TWIDO son montables sobre el riel DIN de 35mm. Para ajustar el módulo sobre el riel se debe tomar desde el lado de la abrazadera y presionar hacia abajo con la ayuda de un destornillador.

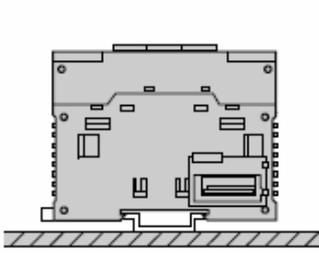


Montaje en riel DIN de 35 mm

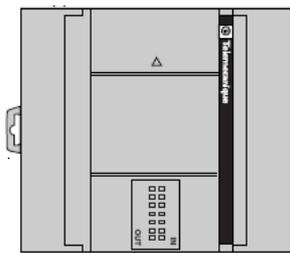
Las bases compactas deben colocarse única y exclusivamente como se muestra en la figura "Montaje correcto". Cuando la temperatura ambiente es de 35 °C o inferior, la base compacta también se puede montar de forma vertical sobre un plano horizontal, tal y como se muestra en la figura. Cuando la temperatura ambiente es de 40 °C o inferior, la base compacta también se puede montar de lado sobre un plano vertical como se muestra en la figura. El controlador no se puede colocar horizontalmente hacia abajo, su mal montaje puede causar daños personales y en funcionamiento del equipo.



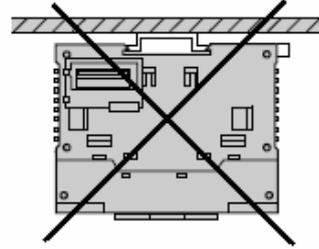
Montaje correcto



Montaje a 35°C o menos



Montaje a 40°C o menos



Montaje incorrecto

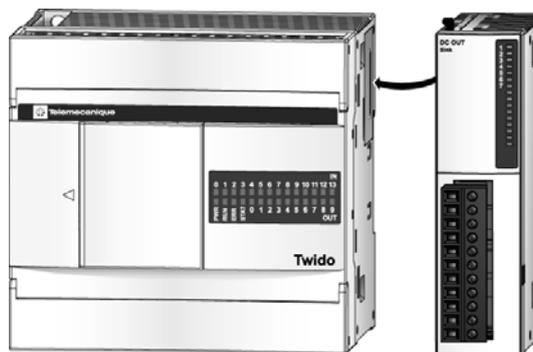
Procedimiento de ensamblaje de un módulo de ampliación de E/S a una base

El siguiente procedimiento muestra cómo ensamblar una base y un módulo de ampliación de E/S.

1. Retirar de la base la cubierta del conector de ampliación.
2. Asegurarse de que el botón de retención negro del módulo de E/S se encuentra en la posición superior.



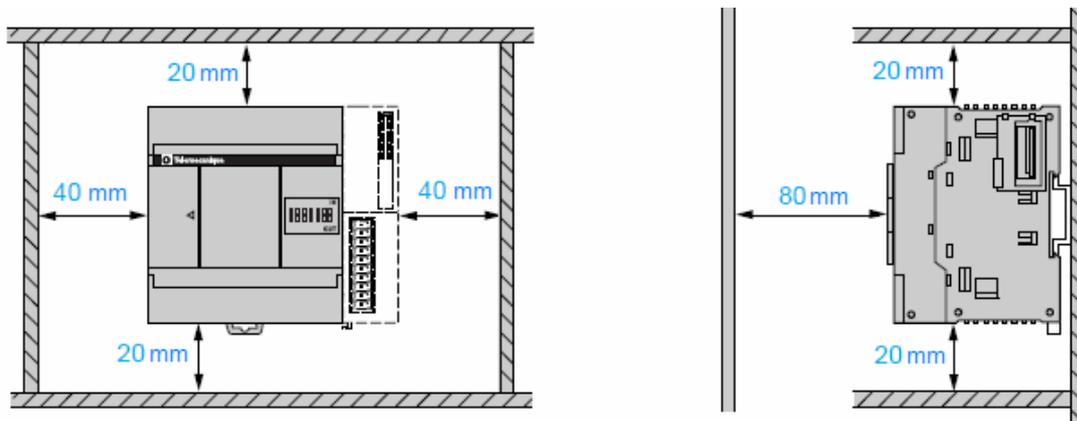
3. Alinear el conector del lateral izquierdo del módulo de ampliación de E/S con el conector del lateral derecho de la base.



4. Presionar el módulo de ampliación de E/S contra la base hasta que se oiga un "clic".
5. Empujar hacia abajo el botón de retención negro situado en la parte superior del módulo de ampliación de E/S para fijar el módulo a la base.

Instalación en panel de control

La instalación en el panel de control se la realiza considerando los siguientes valores de distancia mínimos entre las paredes del panel, con el objeto de mantener la circulación natural del aire sobre el equipo. Se debe tener en cuenta las distancias mínimas indicadas en las siguientes figuras.



Instalación del equipo en panel de control

Diagnóstico del controlador TWDLCAA24DRF mediante los indicadores luminosos del panel frontal

Estado LED		Autómata base	E/S remotas
PWR verde		Autómata apagado	Igual que autómata base
		N/A	Igual que autómata base
		Autómata encendido	Igual que autómata base
RUN verde		Aplicación no ejecutada	No conectado o de forma incorrecta
		Autómata en modo de detención o fallo de ejecución(HALT)	Igual que autómata base
		Autómata en forma de ejecución	Igual que autómata base
ERR rojo		Correcto	Igual que autómata base
		Aplicación no ejecutable o fallo de ejecución(HALT)	N/A
		Fallos internos del autómata (configuración y/o programación)	Igual que autómata base
STAT verde		Controlado por el usuario o la aplicación mediante el bit de sistema %S69	Igual que autómata base
		N/A	N/A
		Controlado por el usuario o la aplicación mediante el bit de sistema %S69	Igual que autómata base

ANEXO 2

CERTIFICACIONES DEL AUTÓMATA TWDLCAA24DRF Y MÓDULOS DE EXTENSIÓN

En algunos países, las certificaciones del gran número de componentes eléctricos y electrónicos están estipuladas bajo la ley, es por esta razón que se extiende un certificado de conformidad estándar a través de un organismo oficial. Para el caso de productos usados en aplicaciones marinas, las certificaciones requieren aún de mayores prioridades.

Sigla	Certificación	País
CSA	Canadian Standards Association	Canadá
C-Tick	Australian Communication Authority	Australia
GOST	Gost Standard Scientific Research Institute	C.I.S., Russia
UL	Underwriters Laboratories	USA
Sigla	Autoridad de Clasificación	País
IACS	International Association of Classification Societies	Internacional
ABS	American Bureau of Shipping	USA
BV	Bureau Veritas	Francia
DNV	Det Norske Veritas	Noruega
GL	Germanischer Lloyd	Alemania
LR	Lloyd's Register	Reino Unido
RINA	Registro Italiano Navale	Italia
RMRS	Russian Maritime Register of Shipping	C.I.S.

Organismos de certificaciones para componentes eléctricos

La siguiente tabla muestra las certificaciones obtenidas del autómata hasta diciembre del 2007.

Certificaciones 	 UL	 CSA	 ACA	 GOST	Hazardous Locations, <i>CII, Div 2(1)</i>	 ATEX
País	USA	Canadá	Australia	Rusia, CIS	USA, Canadá	Europa
TWIDO						
Autoridades marinas de Clasificación	 ABS	 BV	 DNV	 GL	 LR	 RINA
País	USA	Francia	Noruega	Alemania	UK	Italia
TWIDO						

(1) Clasificación de áreas peligrosas: UL 1604, CSA 22.2 no. 213 o FM 3611. Estos productos están certificados solamente para uso en áreas peligrosas de Clase 1, División 2, grupos A, B, C y D

ANEXO 3

TABLA DE INDICADORES PARA EL ENLACE HMI - PLC

Indicadores para enlace HMI – PLC

Tagname	Tipo	Dirección del autómata
CRA_AUTOL	Discreto	%M8
CRA_MANAUTO	Discreto	%M14
CRA_B1	Discreto	%M15
CRA_B2	Discreto	%M16
CRA_B3	Discreto	%M17
CRA_START	Discreto	%M18
CRA_STOP	Discreto	%M19
CRA_FLUJO	Discreto	%M20
CRA_STOPE	Discreto	%M21
CRA_T1HL	Discreto	%M22
CRA_T1LL	Discreto	%M23
CRA_T2HL	Discreto	%M24
CRA_T2LL	Discreto	%M25
CRA_T3HL	Discreto	%M26
CRA_T3LL	Discreto	%M27
CRA_L1	Discreto	%M36
CRA_L2	Discreto	%M37
CRA_L3	Discreto	%M38
CRA_SP	Análogo	%MW1
CRA_KP	Análogo	%MW2
CRA_TI	Análogo	%MW3
CRA_TD	Análogo	%MW4
CRA_PV	Análogo	%MW7
CRA_MV	Análogo	%MW8

ANEXO 4

TABLA DE DIRECCIONES USADAS EN LA LÓGICA DE PROGRAMACIÓN

Direcciones usadas en la lógica de programación para objetos
de bit, palabra, entradas/salidas digitales y analógicas

Dirección del objeto	Tipo de objeto	Descripción
%M0	Bit	Contacto auxiliar bobina M0
%M1	Bit	Contacto auxiliar bobina M1
%M2	Bit	Contacto auxiliar bobina M2
%M3	Bit	Contacto auxiliar bobina M3
%M4	Bit	Contacto auxiliar bobina M4
%M5	Bit	Bobina auxiliar para encender bomba 1
%M6	Bit	Bobina auxiliar para encender bomba 2
%M7	Bit	Bobina auxiliar para encender bomba 3
%M8	Bit	Contacto auxiliar bobina M8
%M9	Bit	Contacto auxiliar bobina M9
%M10	Bit	Contacto auxiliar bobina M10
%M11	Bit	Contacto auxiliar bobina M11
%M12	Bit	Bobina auxiliar para control del bloque de operación PI
%M13	Bit	Bit asociado a la acción Directa/Inversa del controlador PI
%M14	Bit	Contacto para seleccionar Manual/Auto (conexión desde Intouch)
%M15	Bit	Contacto para encender bomba 1 (Conexión desde Intouch)
%M16	Bit	Contacto para encender bomba 2 (Conexión desde Intouch)
%M17	Bit	Contacto para encender bomba 3 (Conexión desde Intouch)
%M18	Bit	Contacto para iniciar Operación Automática de Control Nivel (Conexión desde Intouch)

Dirección del objeto	Tipo de objeto	Descripción
%M19	Bit	Contacto para detener Operación Automática de Control Nivel (Conexión desde Intouch)
%M20	Bit	Contacto para encender el Control de Flujo (Conexión desde Intouch)
%M21	Bit	Contacto para parada de emergencia (Conexión desde Intouch)
%M22	Bit	Bobina para nivel alto de T1 (Conexión a Intouch)
%M23	Bit	Bobina para nivel bajo de T1 (Conexión a Intouch)
%M24	Bit	Bobina para nivel alto de T2 (Conexión a Intouch)
%M25	Bit	Bobina para nivel bajo de T2 (Conexión a Intouch)
%M26	Bit	Bobina para nivel alto de T3 (Conexión a Intouch)
%M27	Bit	Bobina para nivel bajo de T3 (Conexión a Intouch)
%M28	Bit	Contacto auxiliar para Manual/Automático (Conexión a Intouch)
%M29	Bit	Contacto auxiliar para switch bomba 1 (Conexión a Intouch)
%M30	Bit	Contacto auxiliar para switch bomba 2 (Conexión a Intouch)
%M31	Bit	Contacto auxiliar para switch bomba 3 (Conexión a Intouch)
%M32	Bit	Contacto auxiliar para encender automático del control de nivel (Conexión a Intouch)

Dirección del objeto	Tipo de objeto	Descripción
%M33	Bit	Contacto auxiliar para detener automático del control de nivel (Conexión a Intouch)
%M34	Bit	Contacto auxiliar para switch de control de flujo (Conexión a Intouch)
%M35	Bit	Contacto auxiliar para parada de emergencia
%M36	Bit	Bobina para operación de bomba 1 (Conexión a Intouch)
%M37	Bit	Bobina para operación de bomba 2 (Conexión a Intouch)
%M38	Bit	Bobina para operación de bomba 3 (Conexión a Intouch)
%MW0	Palabra	Palabra asociada de Control para PID Ajustado a valor = 1
%MW1	Palabra	Palabra para consigna
%MW2	Palabra	Valor de constante proporcional (Kp)
%MW3	Palabra	Valor de Tiempo de Reajuste (Ti)
%MW4	Palabra	Valor de Tiempo de Derivación(Td)
%MW5	Palabra	Límite de la medida
%MW6	Palabra	Consigna de Salida (para ajuste AT)
%MW7	Palabra	Valor de salida analógica
%MW8	Palabra	Valor de entrada analógica
%I0.0	Entrada	Selección Manual/Auto desde panel
%I0.1	Entrada	Arranque/Parada bomba1 desde panel
%I0.2	Entrada	Arranque/Parada bomba2 desde panel
%I0.3	Entrada	Arranque/Parada bomba3 desde panel
%I0.4	Entrada	Iniciar Control de Nivel Auto desde panel
%I0.5	Entrada	Detener Control de Nivel Auto desde panel
%I0.6	Entrada	Iniciar/Parar Control de Flujo desde panel
%I0.7	Entrada	Parada de emergencia desde panel
%I0.8	Entrada	Nivel Alto T1

Dirección del objeto	Tipo de objeto	Descripción
%I0.9	Entrada	Nivel Bajo T1
%I0.10	Entrada	Nivel Alto T2
%I0.11	Entrada	Nivel Bajo T2
%I0.12	Entrada	Nivel Alto T3
%I0.13	Entrada	Nivel Bajo T3
%IW1.0	Entrada	Entrada analógica para sensor de flujo
%Q0.0	Salida	Enciende Bomba1
%Q0.1	Salida	Enciende Bomba 2
%Q0.2	Salida	Enciende Bomba 3
%Q0.3	Salida	Enciende luz piloto de Control de Flujo
%Q0.4	Salida	Enciende luz piloto para nivel alto T1
%Q0.5	Salida	Enciende luz piloto para nivel bajo T1
%Q0.6	Salida	Enciende luz piloto para nivel alto T2
%Q0.7	Salida	Enciende luz piloto para nivel bajo T2
%Q0.8	Salida	Enciende luz piloto para nivel alto T3
%Q0.9	Salida	Enciende luz piloto para nivel bajo T3
%QW1.0	Salida	Salida analógica para preactuador de la bomba de control de flujo

ANEXO 5

DIAGRAMAS DE INSTRUMENTACIÓN Y PROCESO

ANEXO 6

PLANO DE LA MAQUETA PARA LA SIMULACIÓN DEL CIRCUITO DE RECICLAJE DE AGUA

ANEXO 7

DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL PANEL DE CONTROL

ANEXO 8

DIAGRAMA DE GANTT PARA EL ANÁLISIS DE TIEMPO EN EL PROCESO DE PREFACTIBILIDAD

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Figura 1.1. Mapa Geográfico de la Zona de Exploración.....	5
---	---

CAPÍTULO 2. PROCESO DE EXPLORACIÓN MINERA

Figura 2.1. Equipo utilizado para la perforación.....	16
Figura 2.2. Brocas utilizadas para la perforación.....	18
Figura 2.3. Velocidad de penetración Vs. Desgaste de la herramienta.....	24
Figura 2.4. Potencia de rotación en función del diámetro de perforación.....	26
Figura 2.5. Energía consumida por el sistema de empuje.....	26
Figura 2.6. Potencia de empuje en función del diámetro de perforación.....	27
Figura 2.7. Circuito de reciclaje de agua para la perforación.....	30

CAPÍTULO 3. INSTRUMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

Figura 3.1. Sensor basado en la caída de presión. Placa orificio.....	42
Figura 3.2. Sensor basado en la caída de presión. Tubo Venturi.....	43
Figura 3.3. Sensor basado en la caída de presión. Tubo Pitot.....	44
Figura 3.4. Sensor basado en la velocidad de flujo. Turbina.....	45
Figura 3.5. Sensor basado en la velocidad de flujo. Medidor electromagnético.....	47
Figura 3.6. Sensor basado en la velocidad de flujo. Medidor Vortex.....	48
Figura 3.7. Sensor basado en la velocidad de flujo. Medidor ultrasónico.....	49
Figura 3.8. Principio de funcionamiento del medidor térmico.....	50
Figura 3.9. Instrumentos de medición directa de nivel. Flotador.....	58
Figura 3.10. Instrumentos de medición basados en la presión hidrostática.....	60
Figura 3.11. Instrumento Medidor Tipo Burbujeo.....	62

Figura 3.12. Instrumentos de medición basados en el desplazamiento del fluido.....	64
Figura 3.13. Instrumentos basados en las características eléctricas.....	65
Figura 3.14. Instrumento Medidor de capacidad.....	66
Figura 3.15. Instrumento basado en sistema ultrasónico.....	68
Figura 3.16. Instrumento basado en rayos gamma.....	69
Figura 3.17. Partes de una válvula de control.....	74
Figura 3.18. Representación en diagrama de bloques de una válvula de control.....	74
Figura 3.19. Válvula tipo globo.....	76
Figura 3.20. Válvula tipo mariposa.....	76
Figura 3.21. Válvula tipo esférica.....	77
Figura 3.22. Válvula tipo tapón.....	77
Figura 3.23. Válvula tipo Sauders.....	78
Figura 3.24. Comportamiento de las características inherentes de flujo.....	81
Figura 3.25. Característica de Flujo Instalada.....	81
Figura 3.26. Pérdida de carga en la válvula Vs. Caudal.....	82
Figura 3.27. Bombas de impulsor abierto, semiabierto y cerrado.....	88
Figura 3.28. Empuje axial en impulsor abierto con álabes posteriores.....	89
Figura 3.29. a) Impulsor con álabes radiales. b) Empuje axial de impulsor cerrado	91

CAPÍTULO 4. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

Figura 4.1. Variables en el control automático de procesos.....	100
Figura 4.2. Sistema no-interactivo del circuito de agua para la perforación.....	102
Figura 4.3. Modelamiento matemático: Diagrama de bloques.....	107
Figura 4.4. Sistema de control en lazo cerrado.....	111
Figura 4.5. Funcionamiento del Control On/Off.....	112
Figura 4.6. Diagrama de bloques del controlador On/Off.....	113
Figura 4.7. Diagrama de bloques del controlador On/Off con histéresis.....	113
Figura 4.8. Funcionamiento del Control Proporcional.....	114
Figura 4.9. Funcionamiento del Integral.....	115
Figura 4.10. Funcionamiento del Control derivativo.....	116
Figura 4.11. Arquitectura del sistema de control.....	120
Figura 4.12. Parámetros de la respuesta al escalón de una planta.....	124
Figura 4.13. Comportamiento de la planta mediante método Ziegler y Nichols	125

CAPÍTULO 5. EL CONTROLADOR PROGRAMABLE

Figura 5.1. Reticulado para la programación Ladder.....	135
Figura 5.2. Comunicación autómatas/PC mediante cable de transmisión serial...	138
Figura 5.3. Conexiones de cable nominal para EIA RS232 y EIA RS485.....	141
Figura 5.4. Software TwidoSuite para la programación del Controlador Twido	146
Figura 5.5. Configuración de los dispositivos mediante TwidoSuite.....	147
Figura 5.6. Configuración de las E/S, direcciones y datos.....	148
Figura 5.7. Ventana de programación y edición de parámetros de la aplicación	149
Figura 5.8. Ventana para establecer la conexión con el autómata Twido.....	150
Figura 5.9. Driver de Schneider para comunicación MODBUS.....	150
Figura 5.10. Sección 1. Control de Nivel: Modo Manual.....	152
Figura 5.11. Sección 2. Control de Nivel: Modo Automático.....	154
Figura 5.12. Configuración del bloque de operación avanzado PID.....	155
Figura 5.13. Sección 3. Control de Flujo: Controlador tipo PI.....	156
Figura 5.14. Sección 4. Salidas del Controlador.....	158
Figura 5.15. Sección 5. Conexiones con Intouch: Entradas.....	160
Figura 5.16. Sección 6. Conexiones con Intouch: Salidas.....	161

CAPÍTULO 6. DESARROLLO DE LA INTERFACE HMI

Figura 6.1. Archivo de información en la ventana de inicio del HMI.....	168
Figura 6.2. Ventana del temario de ayudas del Sistema de Control y Monitoreo	169
Figura 6.3. Ventana de Inicio del Sistema de Control y Monitoreo.....	169
Figura 6.4. Ventana de Ingreso de Clave de Acceso al Sistema.....	170
Figura 6.5. Ventana Principal del Sistema de Control y Monitoreo.....	171
Figura 6.6. Ventana de Control de Nivel: Operación manual.....	172
Figura 6.7. Ventana de Control de Nivel: Operación Automática.....	173
Figura 6.8. Ventana de Control de Flujo del Sistema.....	174
Figura 6.9. Ventana de la Interface de Ingeniería para el Controlador de Flujo	175
Figura 6.10. Ventana del Histórico de Flujo obtenido de la perforación.....	176
Figura 6.11. Ventana de alarmas y eventos del Sistema de Control y Monitoreo	177
Figura 6.12. Consola SQL Server Management Studio.....	178
Figura 6.13. Microsoft Excel para importar datos y generar reportes.....	178
Figura 6.14. Software para el desarrollo de las ayudas del Sistema.....	180
Figura 6.15. Bind List para la conexión de tagnames con la base de datos.....	182

Figura 6.16. Configuración de orígenes de datos para la conexión con SQL...	182
Figura 6.17. Definición del Tópico para comunicación MODBUS.....	183
Figura 6.18. Configuración del Nombre de Acceso para Intouch.....	184
Figura 6.19. Proceso de funcionamiento de SQL Access Manager.....	196

CAPÍTULO 7. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Figura 7.1. a) Sensor de Flujo del Sistema. b) Bomba para el control de flujo	200
Figura 7.2. a) Interruptores de nivel y bombas para el control de nivel b) Tina de reciclaje del agua utilizada para la perforación.....	201
Figura 7.3. a) Vista frontal del panel de control b) Cableado y conexiones en Interior del panel.....	202
Figura 7.4. Panel de Control para el Circuito de Reciclaje de Agua.....	203

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2. PROCESO DE EXPLORACIÓN MINERA

Tabla 2.1. Capacidades del equipo de perforación.....	13
Tabla 2.2. Malacate wireline del equipo de perforación.....	14
Tabla 2.3. Módulo hidráulico del equipo de perforación.....	14
Tabla 2.4. Mástil y base de posicionamiento del equipo de perforación.....	14
Tabla 2.5. Cabeza y mandriles del equipo de perforación.....	15
Tabla 2.6. Peso del equipo de perforación.....	15
Tabla 2.7. Clasificación de las brocas de perforación.....	17
Tabla 2.8. Clasificación de la dureza de las rocas.....	19
Tabla 2.9. Velocidades de rotación según la dureza de las rocas.....	19
Tabla 2.10. Fuerza de empuje según tipo de roca.....	21
Tabla 2.11. Velocidad ascensional del fluido según el tipo de roca.....	22
Tabla 2.12. Área de sección anular para la circulación del fluido.....	23

CAPÍTULO 3. INSTRUMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

Tabla 3.1. Estrategias y parámetros para el Control Automático del Sistema.....	35
Tabla 3.2. Comparación de los parámetros y características de los sensores de flujo.....	54
Tabla 3.3. Comparación de los parámetros y características de los sensores de nivel.....	72
Tabla 3.4. Características inherentes del flujo.....	80
Tabla 3.5. Velocidades de rotación del campo giratorio.....	86

CAPÍTULO 5. EL CONTROLADOR PROGRAMABLE

Tabla 5.1. Control, envío y recepción para comunicaciones ASCII.....	139
Tabla 5.2. Configuración del puerto de Twido para comunicación Modbus.....	142
Tabla 5.3. Control, envío y recepción para comunicaciones MODBUS.....	143

CAPÍTULO 6. DESARROLLO DE LA INTERFACE HMI

Tabla 6.1. Parámetros para la conexión de SQL.....	181
Tabla 6.2. Tagnames para el desarrollo de la HMI.....	185
Tabla 6.3. Clasificación de los tagnames.....	189
Tabla 6.4. Subclasificación de los tagnames Memory, I/O e Indirect.....	189
Tabla 6.5. Tipos de Alarmas y Eventos del Sistema.....	191
Tabla 6.6. Parámetros de configuración de las Alarmas y Eventos.....	192
Tabla 6.7. Parámetros de configuración de la herramienta de Tendencias históricas...193	
Tabla 6.8. Parámetros de ajuste de la herramienta de Tendencias históricas.....	194
Tabla 6.9. Convención para el manejo de direcciones en el protocolo MODBUS.....	197

CAPÍTULO 7. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 7.1. Análisis de Resultados. Sistema de Control de Nivel.....	205
Tabla 7.2. Análisis de Resultados. Sistema de Control de Flujo.....	206
Tabla 7.3. Inversión Inicial. Implementación de equipo en el proceso.....	210
Tabla 7.4. Inversión Inicial. Tablero de Control.....	211
Tabla 7.5. Inversión Inicial. Tablero de Control.....	212
Tabla 7.6. Inversión Inicial. Desarrollo HMI y comunicación.....	213
Tabla 7.7. Inversión Inicial. Implementación y capacitación.....	214
Tabla 7.8. Inversión Inicial. Total General.....	214
Tabla 7.9. Análisis de Detalle en Beneficios.....	215
Tabla 7.10. Análisis de Retorno de Inversión: Primer Escenario.....	217
Tabla 7.11. Análisis de Retorno de Inversión: Segundo Escenario.....	218
Tabla 7.12. Análisis de Retorno de Inversión: Tercer Escenario.....	219

**HOJAS TÉCNICAS DE
LOS DISPOSITIVOS**

ÍNDICE DE HOJAS TÉCNICAS

CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE TWIDO.....	1
ESPECIFICACIONES DE HARDWARE DEL TWD LCAA 24DRF.....	1
Características Generales.....	1
Alimentación.....	2
Comunicaciones.....	3
Características de las entradas.....	4
Características de las salidas.....	5
Módulo mixto de E/S analógico TWD AMM 6HT.....	7
Características del cable de comunicación.....	9
Funciones Especiales del Controlador.....	10
ESPECIFICACIONES DE SOFTWARE: TwidoSuite.....	12
Objetos en el Lenguaje Twido.....	12
Objetos de bit.....	12
Objetos de palabra.....	14
Objetos de palabras dobles y constantes dobles.....	17
Formatos para direccionamiento.....	18
Estructura de la memoria de aplicación.....	22
Tipos de almacenamiento en memoria.....	22
Elementos gráficos del lenguaje Ladder.....	24
Consejos sobre programación en Ladder.....	26
CONFIGURACIÓN DEL CONTROLADOR.....	27
UNIDAD DE CONTROL PROPORCIONAL ELECTRÓNICA ASCO 8908.....	29
Características.....	29

Características Eléctricas.....	29
Dimensiones.....	30
Selección de la señal de control.....	31
Esquema de Cableado.....	31
Diagrama de Voltaje- Corriente Vs. Tiempo.....	32
BOMBA PARA APLICACIONES MARINAS (BILGE PUMP) Rule360.....	33
Características.....	33
Características de funcionamiento.....	33
Certificaciones.....	33
Especificaciones.....	34
Diagrama de conexión.....	34
BOMBA SUMERGIBLE SPRINGBRUNNEN FP12V-18 Y FP12V-28.....	35
Características.....	35
Especificaciones.....	35
Características de Funcionamiento.....	36
INTERRUPTORES DE NIVEL PARA LÍQUIDO SERIES F7.....	37
Características.....	37
Especificaciones.....	37
Dimensiones y montaje.....	38
Datos Físicos.....	38
SENSOR DE FLUJO RECHNER SW-600-G1/2"/28.....	39
Características.....	39
Posición de montaje.....	40
Ajuste.....	41
Características Técnicas.....	41
Dimensiones.....	42
Diagrama de conexiones.....	42

CONTROLADOR LOGICO PROGRAMABLE TWIDO TWD LCAA 24DRF
ESPECIFICACIONES DE HARDWARE

Características Generales		
Temperatura	°C	Operación: 0...+55 Almacenamiento: - 25...+ 70
Humedad Relativa		30 a 95 %, sin condensación
Grado de Protección		IP20
Altitud	m	Operación: 0...2000 Almacena.: 0...3000
Resistencia a la vibración (montado en riel)	Hz	10...57, amplitud 0.075mm, aceleración 57...150 Hz
	m/s ²	9.8 (1gn)
Resistencia al choque	m/s ²	147(15gn) por 11ms
Peso	Kg	0.305
Características del controlador de base compacta No. Ref. TWD LCAA 24DRF		
Número de entradas 24VDC		14
Número y tipo de salidas		10 relay
Tipo de conexión de I/O		Bloque no removible de Terminal tipo tornillo
Módulos de expansión		
<ul style="list-style-type: none"> • Máximo número de módulos 		4
<ul style="list-style-type: none"> • Máximo número de I/O 		88
<ul style="list-style-type: none"> • AS – Interface 		Manejo en modo esclavo: 62 discreto, 7 análogo
Capacidad de la memoria		3000 instrucciones
Tiempo de Ciclo		
<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de procesamiento 	ms	1 por 1000 instrucciones lógicas
<ul style="list-style-type: none"> • Sistema en general 		0.5

Memoria		
• Bits internos		128
• Palabras internas		3000
• Timers		128
• Contadores		128
• Palabras Dobles		Si
Alimentación		
Voltaje		
• Nominal	VAC	~ 100...240
• Limite (incluyendo fluctuación)		~85...264
Frecuencias Nominal/Limite	Hz	50-60/47-63
Salidas de 24 V para sensores	mA	250
Corriente		
• Corriente entrada nominal Irms ~ 85V	A	0.45
• Corriente de irrupción		40
Duración de los microbreaks	ms	10 max
Protección		Por fusible interno
Consumo máximo a ~ 110V	VA	33
Fuerza dieléctrica		
• Entre alimentación y terminales de tierra	Vrms	1500 – 50/60Hz por 1 minuto
• Entre I/O y terminales de tierra	Vrms	1500 – 50/60Hz por 1 minuto
Resistencia de aislamiento		
• Entre alimentación y terminales de tierra	MΩ	> 10 (500VDC)
• Entre I/O y terminales de tierra		> 10 (500VDC)

Comunicaciones		
Conexiones integradas		1 x RS485 enlace serial, sin aislamiento A 38.4Kbit/s
<ul style="list-style-type: none"> Enlace serial: Tipo 		
	Protocolo	-Puerto terminal Half-duplex -Modbus master/slave RTU/ASCII o modo de caracteres -Modo "Remote Link" descentralizado E/S (Controladores Twido usan para extensiones E/S)
	Conexión	Conector mini-DIN de 8 vías
Conexiones vía adaptador o módulos de comunicación		Un adaptador RS-232C o RS-485 De 1.2....38.4Kbit/s
<ul style="list-style-type: none"> Enlace serial: Tipo 		
	Conexión	Mini DIN o bloque Terminal(solo RS-485)
<ul style="list-style-type: none"> AS-Interface: Tipo 		1 o 2 módulos master (direccionamiento Standard y extendido), 62 esclavos
	Conexión	Terminal de bloque tipo tornillo removible
<ul style="list-style-type: none"> CANopen: Tipo 		1 módulo master (clase M10) , 125...500kbit/s , 16 esclavos máximo
<ul style="list-style-type: none"> Ethernet TCP/IP 		1 Módulo de interfase con Puerto Twido 10BASE-T/100BASE-TX
	Conexión	Conector RJ45. Reemplaza al módulo que conecta vía RS-485

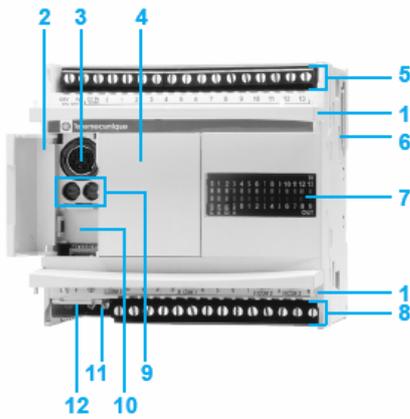
Características generales del controlador Twido

Características de las entradas		
Número de canales de entrada		14
Voltaje de entrada nominal	V	24VDC (entrada en común positivo o en común negativo)
Comunes		1
Rango de Voltaje de entrada	V	20.4...28.8VDC
Corriente de entrada nominal		11mA para I0.0 e I0.1 7mA para otras entradas I0.i
Impedancia de entrada		2.1K Ω para I0.0 y I0.1 3.4 K Ω para otras entradas I0.i
Tiempo de filtrado		35 μ s + tiempo programado de filtro para I0.0...I0.5
<ul style="list-style-type: none"> En estado 1 		40 μ s + tiempo programado de filtro para otras entradas I0.i
<ul style="list-style-type: none"> En estado 0 		45 μ s + tiempo programado de filtro para I0.0...I0.5 150 μ s + tiempo programado de filtro para otras entradas I0.i
Aislamiento:		Ninguno
<ul style="list-style-type: none"> Entre canales Entre canales y lógica interna 	Vrms	~1500 por 1 min
Características de las salidas		
Número de canales de salida		10 relay
Corrientes de salida	A	2 por canal 8 por común
<ul style="list-style-type: none"> Aumento por canal 		5 máx

Características de las entradas del controlador Twido

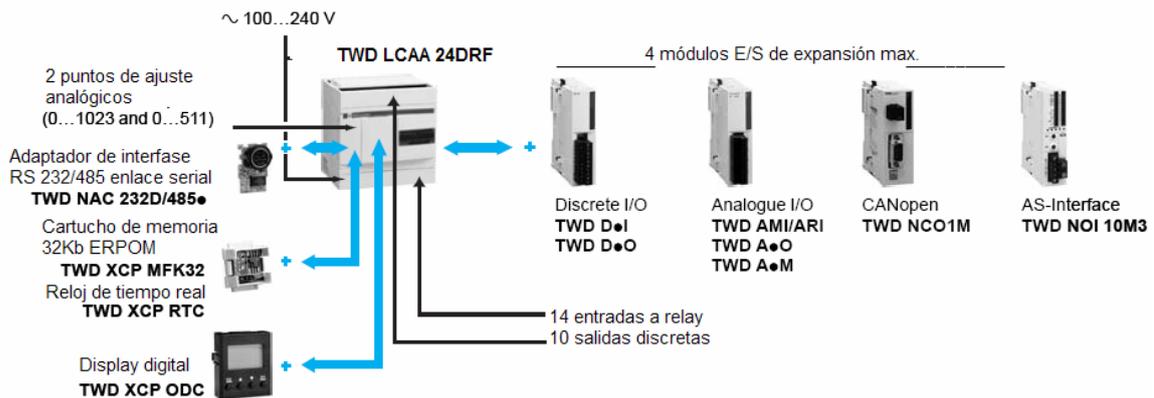
Características de las salidas		
Comunes:		
• Común 0		4 Contactos N/A
• Común 1		4 Contactos N/A
• Común 2		1 Contactos N/A
• Común 3		1 Contactos N/A
Mínima carga de conmutación	mA	0.1 por 0.1 VDC (valor de referencia)
Resistencia de contacto	mΩ	30 max.
Salidas de carga en el relay	A	2 A ~ 240 V o 2 A 30VDC (con 1800 operaciones por hora max.) -Vida eléctrica mínima: 1x10 ⁵ operaciones -Vida mecánica mínima: 1x10 ⁶ op.
• Inductiva sin protección del disp. • Capacitiva (FESTO, drivers, arranques)		Uso de las salidas del relay no garantizadas (reducción en la vida). Para este tipo de aplicaciones es recomendable utilizar salidas de tipo transistor.
Voltaje de aislamiento entre los canales y la lógica interna	Vrms	~ 1500 por un min
Consumo para todas las salidas:		
• En estado 0 : 5VDC 24VDC	mA	5 -
• En estado 1 : 5VDC 24VDC	mA	36 55
• En estado 0 : 5VDC + Entradas en ON 24VDC	mA	- -

Características de las salidas del controlador Twido



1. Dos convertores de bisagras para el bloque de terminales de conexión.
2. Una compuerta de acceso de bisagra.
3. Un conector de puerto serial mini-DIN tipo RS-485 (permite conexión del terminal de programación).
4. Un slot (protegido por un convertor removible) para el módulo de display digital.
5. Un bloque terminal de tornillo para 24VDC para sensores y para conexiones de las entradas.
6. Un conector para módulos de expansión de E/S y módulos de comunicación (máximo 4 módulos).
7. Un bloque de visualización:
 - visualiza el estado del controlador con 3 luces pilotos (PWR_RUN,ERR).
 - visualiza el estado de las entradas y salidas (IN y OUT).
 - visualiza el estado del usuario (STAT), este es controlado por el programa de aplicación del usuario de acuerdo a sus requerimientos.
8. Un bloque terminal de tornillo para las conexiones de las salidas a los preactuadores.
9. Dos puntos de ajuste de potenciómetros análogos.
10. Un conector de extensión adicional para el puerto serial RS232C / RS485.
11. Un bloque terminal de tornillo para la alimentación del controlador
12. Conector con protección memoria adicional o reloj en tiempo real.

Descripción del Controlador compacto TWD LCAA 24DRF

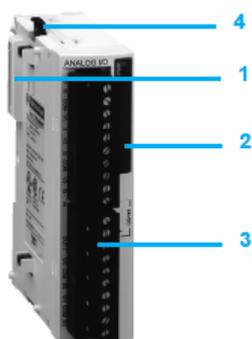


Configuración del controlador con base compacta No. Ref. TWD LCAA 24DRF

Datos generales del módulo mixto de E/S analógico TWD AMM 6HT		
Número de canales		4 entradas / 2 salidas
Tipo de entradas / salidas		Voltaje/corriente
Conexión		Bloque terminal removible tipo tornillo
Rangos de entradas y salidas	V mA	0...10V 4...20mA
Resolución de E/S análogas		12 bits (4096 points)
Tiempo de ciclo	ms	64 + 1 tiempo de ciclo del controlador
Alimentación: Externa	V	24VDC para los sensores o preactuadores (rango de voltaje 20.4...28.8V)
Características de las entradas analógicas del módulo TWD AMM 6HT		
Número de canales		4 entradas de nivel alto
Rango		Voltaje 0...10V
Tipo		Corriente 4...20mA
Resolución		No diferencial Diferencial
Valor del LSB		12 bits
Conexión		2.5mV 4.8µA
Sobrecarga continua permisible		Bloque terminal removible tipo tornillo 13VDC 40mA
Impedancia de entrada	KΩ	10 mínimo 250 máximo
Máxima duración de muestreo	ms	16
Período de adquisición	ms	16 + 1 tiempo de ciclo del controlador
Precisión de la medición: Error total	%PE	±1
Modo común de rechazo		-50dB
Cross Talk		2 bits menos significativos máximo
Cableado		Recomendado par trenzado
Protección		Fotocupla entre las entradas y el circuito interno

Características de las salidas analógicas del módulo TWD AMM 6HT			
Número de canales		2 salidas	
Rango		Voltaje	Corriente
		0...10V	4...20mA
Resolución		12 bits	
Valor del LSB		2.5mV	4.8µA
Conexión		Bloque terminal removible tipo tornillo	
Carga :	Tipo	Resistivo	
	Impedancia	Ω	2000 mínimo 300 máximo
Tiempo de estabilización	ms	20	
Tiempo de transferencia total de la salida	ms	20 + 1 tiempo de ciclo del controlador	
Alimentación externa	V	Nominal: 24VDC, Rango: 20.4...28.8	
Precisión de la medición:			
	Error total	%PE	±2
Fuerza dieléctrica entre las E/S y el circuito de aliment.	Vrms	~ 800	
Cross Talk		2 bits menos significativos máximo	
Cableado		Recomendado par trenzado	
Alimentación externa para el módulo	V	Nominal: 24VDC, Rango: 20.4...28.8	
Protección		Fotocoupla entre las entradas y el circuito interno	
Consumo del módulo:			
	Alimentación interna 5VDC	mA	60
	Alimentación externa 24VDC	mA	80

Características del módulo de E/S analógicas TWD AMM 6HT



- 1 Una extensión para el conector eléctrico en el módulo anterior
- 2 Un bloque de visualización de los canales del módulo
- 3 Terminal de bloque tipo tornillo removible para conexión a fuente externa de 24VDC, sensores y preactuadores.
- 4 Mecanismo de enclavamiento al módulo anterior

Descripción del módulo TWD AMM 6HT

Características del cable de comunicación multifunción TSX PCX 1031		
Tipo de conexión		Serial RS-485
Tipo de conector		Conector macho de 8 pines mini DIN a conector hembra de 9 pines subD
Operación		Convertor que incluye un selector rotativo de 4 posiciones para seleccionar diferentes operaciones
Longitud de cable	m	2.5
Temperatura de operación	°C	0...60

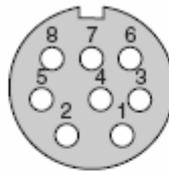
Características del cable de comunicación

El cable TSX PCX 1031 es un cable de comunicación multifunción que integra la conversión de las señales RS-485 en señales RS-232. Garantiza el enlace entre un autómata y diferentes equipos serie RS-232. Las diferentes funciones del modo serie se definen siguiendo la posición del selector al que se puede acceder desde la caja del convertidor.

Posición Selector	Función	Señal /DPT	Señal RTS
0	TER MULTI.- Enlace de modo punto a punto o multipunto. Fuerza conector Terminal en modo master, protocolo predeterminado (sustituye el cable referenciado TSX PCU 1031).	1	Si

Posición Selector	Función	Señal /DPT	Señal RTS
1	OTHER MULTI.- Enlace en modo multipunto. Demás tipos de comunicación.	0	Si
2	TER MULTI.- Enlace de modo punto a punto. Fuerza conector terminal en modo master, protocolo predeterminado.	1	No
3	OTHER DIRECT.- Enlace de modo punto a punto. Demás tipos de comunicación definidos por la configuración del autómata.	0	No

Funciones integradas en el cable de comunicación



TSX PCX 1031

1	D1 (A +)
2	D0 (B -)
3	NPC
4	/DE
5	/DPT
6	NPC
7	0 V
8	5 V (180 mA)

Configuración de los pines del mini DIN en el Enlace Serial

Funciones Especiales del Controlador TWIDO TWDLCAA24DRF

El controlador tiene preasignado como digitales, a todas sus E/S. Sin embargo, ciertas E/S pueden ser asignadas a tareas específicas durante su configuración:

- Entrada de Arranque/Parada
- Entradas de conmutación(Latching)

- Contadores rápidos:
 - Contadores simples Up/Down: 5Khz (1 fase)
 - Contadores muy rápidos de Up/Down: 20Khz (2 fases)
- Controlador del estatus de salidas
- Modulación por ancho de pulso (PWM)
- Generador de pulso de salida (PLS)

Los controladores pueden ser programados en el software de aplicación TwidoSoft o TwidoSuite, en los cuales se puede establecer los parámetros de las funciones PWM, PLS, contadores rápidos y muy rápidos y funciones para control PID y PID auto-ajustable (Auto-Tuning).

Función	Descripción
Escaneo	Normal (cíclico) o periódico(constante) De 2 a 150 ms
Tiempo de ejecución	0.14 μ s a 0.9 μ s por lista de instrucción.
Capacidad de memoria	Datos: 3000 palabras de memoria En programa: 3000 listas de instrucciones
Almacenamiento del RAM	Por batería interna de litio. Duración típica aproximada de 30 días a 25°C cuando la batería esta cargada por completo. El tiempo aproximado de carga es de 15 horas para llegar hasta el 90% de la carga total. El tiempo de vida de la batería es de 10 años. La batería no puede ser reemplazada
Puerto de programación	EIA RS-485. Opción de integración del puerto RJ45 para comunicación Ethernet
Módulos de expansión de E/S	Hasta 4 módulos de expansión E/S
Módulos para AS-Interface	Hasta 2 módulos para AS-Interface
Módulos para bus de campo CANopen	Hasta 1 módulo CANopen

Función	Descripción
Comunicación de enlace remoto	Máximo hasta 7 esclavos para E/S remota o controladores par. Máxima longitud de la red: 200m
Comunicación Modbus	EIA RS-485, máxima longitud de 200m, en modo ASCII o RTU
Comunicación Ethernet	Por medio del módulo de interfase Ethernet 100Base-TX sobre protocolo TCP/IP con puerto RJ45
Comunicación ASCII	Protocolo Half-duplex a equipo

Funciones del controlador Twido

ESPECIFICACIONES DE SOFTWARE: TwidoSuite

Objetos en el Lenguaje TWIDO

Los objetos de bit y de palabra son válidos si se les ha asignado espacio de memoria en el autómatas. Para ello, deben utilizarse en la aplicación antes de descargarlos en el autómatas. El rango de objetos válidos oscila entre cero y la referencia máxima para ese tipo de objeto. Por ejemplo, si la referencia máxima de la aplicación para palabras de memoria es %MW9, entonces se asignará el espacio de %MW0 a %MW9, %MW10 no es válido y no se puede acceder a él ni interna ni externamente.

Objetos de bit. Los objetos de bit son variables de software de tipo bit que pueden utilizarse como operandos y verificarse mediante instrucciones booleanas. Los objetos de bit disponibles dentro del controlador son los siguientes:

- Bits de E/S.
- Bits internos (bits de memoria).
- Bits de sistema.
- Bits de pasos.
- Bits extraídos de palabras.

En la siguiente tabla se enumeran y se describen todos los objetos de bit que se utilizan como operandos en instrucciones booleanas.

Tipo	Descripción	Dirección o Valor	Número máximo	Acceso de escritura (1)
Valores inmediatos	0 ó 1 (False o True)	0 ó 1	-	-
Entradas Salidas	Estos bits son las "imágenes lógicas" de los estados eléctricos de las E/S. Se almacenan en la memoria de datos y se actualizan durante cada exploración de la lógica del programa	%Ix.y.z %Qx.y.z	14 10	No Sí
Interna (memoria)	Los bits internos son áreas de memoria interna utilizadas para almacenar valores intermedios durante la ejecución de un programa. Nota: Los bits de E/S no utilizados no pueden emplearse como bits internos	%Mi	256	Sí
Sistema	Los bits de sistema de %S0 a %S127 supervisan el funcionamiento correcto del autómata y la correcta ejecución del programa de aplicación	%Si	128	Según i

Tipo	Descripción	Dirección o Valor	Número máximo	Acceso de escritura (1)
Bloques de función	Los bits de bloque de función corresponden a las salidas de los bloques de función. Estas salidas pueden estar conectadas directamente o utilizarse como un objeto	%Tmi.Q, %Ci.P, etc.	Varía según bloque de función	No
Bloques de función reversibles	Bloques de función programados mediante las instrucciones de programación reversibles BLK, OUT_BLK y END_BLK	E, D, F, Q, TH0, TH1	Varía según bloque de función	No
Extractos de palabras	Uno de los 16 bits de algunas palabras puede extraerse como bit de operando	Variable	Variable	Variable
Pasos Grafcet	Los bits de %X1 a %Xi están asociados a pasos Grafcet. El bit de pasos Xi se establece en 1 cuando el paso correspondiente está activo; en cambio, se establece en 0 cuando el paso se desactiva	%Xi	96	Sí

(1) Escrito por el programa o mediante el Editor de tablas de animación.

Tabla de bits de operandos

Objetos de palabra. Objetos de palabra direccionados en forma de palabras de 16 bits, almacenados en la memoria de datos y que pueden contener un valor entero de entre -32.768 y 32.767 (excepto para el bloque de función de contador rápido, que está entre 0 y 65.535). El controlador maneja los siguientes objetos de palabra:

- Valores inmediatos.
- Palabras internas (%MWi) (palabras de memoria).
- Palabras constantes (%KWi).
- Palabras de intercambio de E/S (%IWi, %QWi%).
- Palabras de sistema (%SWi).
- Bloques de función (datos de tiempo de ejecución o configuración).

El contenido de las palabras o los valores se almacena en la memoria de usuario en código binario de 16 bits (complemento de dos) mediante la convención que se sigue a continuación.

	F	E	D	C	B	A	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	Posición del bit
	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	Estado del bit
+	16384	8192	4096	2048	1024	512	256	128	64	32	16	8	4	2	1	Valor del bit	

Convención de almacenamiento de objetos de palabra

En la notación binaria con señal, el bit 15 se asigna por convención a la señal del valor codificado.

- El bit 15 se establece en 0: el contenido de la palabra es un valor positivo.
- El bit 15 se establece en 1: el contenido de la palabra es un valor negativo (los valores negativos se expresan en lógica de complemento de dos).

Las palabras y los valores inmediatos pueden introducirse o recuperarse en los formatos siguientes:

- Decimal Mín.: -32.768, máx.: 32.767
- Hexadecimal Mín.: 16#0000, máx.: 16#FFFF
- Las reglas de formato ASCII son las siguientes:
 - La función siempre lee primero el byte más significativo.
 - Todo carácter ASCII que se encuentre fuera del intervalo ['0' - '9'] ([16#30 - 16#39]) se considera un carácter de fin, excepto en el caso de un signo menos '-' (16#2D) cuando se coloca como primer carácter.

- En caso de desborde (>32767 o <-32768), el bit del sistema %S18 (desborde aritmético o error) se establece en 1 y se devuelve el valor 32767 o -32768.
- Si el primer carácter de un operando es un carácter de "fin", se devuelve el valor 0 y el bit %S18 se establece en 1.

En la siguiente tabla se enumeran y se describen todos los objetos de palabra que se utilizan como operandos en instrucciones booleanas.

Tipo	Descripción	Dirección o Valor	Número máximo	Acceso de escritura (1)
Valores inmediatos	Se trata de valores enteros expresados en el mismo formato que las palabras de 16 bits, lo que permite que los valores se puedan asignar a estas palabras.		-	No
	Base 10	De 32.768 a 32.767		
	Base 16	De 16#0000 a 16#FFFF		
Interna (memoria)	Palabras empleadas para almacenar valores durante la operación en la memoria de datos.	%MWi	3000	Sí
Constantes	Almacenan constantes o mensajes alfanuméricos. Su contenido sólo se puede escribir o modificar mediante TwidoSuite durante la configuración.	%KWi	256	Sí, sólo mediante TwidoSuite

Tipo	Descripción	Dirección o Valor	Número máximo	Acceso de escritura (1)
Sistema	Estas palabras de 16 bits ofrecen diversas funciones:			
	<ul style="list-style-type: none"> Proporcionan acceso a los datos que proceden directamente del autómata mediante la lectura de las palabras %SWi. Realizan operaciones en la aplicación (por ejemplo, el ajuste de fechadores). 	%SWi	128	Según i
Bloques de función	Estas palabras corresponden a los valores o parámetros actuales de los bloques de función.	%TM2.P, %Ci.P, etc.		Sí
Palabras de E/S analógicas	Entradas analógicas.	%IWAx.y.z	Variable	No
	Salidas analógicas.	%QWAx.y	Variable	Sí
Bits extraídos	Es posible extraer uno de los 16 bits de las palabras siguientes:			
	Interno	%MWi:Xk	1500	Sí
	Sistema	%SWi:Xk	128	Depende i
	Constantes	%KWi:Xk	64	No
	Entrada	%IWi.j:Xk	Variable	No
	Salida	%QWi.j:Xk	Variable	Sí

(1) Escrito por el programa o mediante el Editor de tablas de animación

Tabla de palabras de operandos

Objetos de palabras dobles y constantes dobles. Una palabra de entero doble está formada por cuatro bytes almacenados en la memoria de datos y contienen un valor

comprendido entre -2.147.483.648 y +2.147.483.647. En la tabla siguiente se describen los objetos de palabra doble.

Tipo	Descripción	Dirección o Valor	Número máximo	Acceso de escritura (1)
Valores inmediatos	Números enteros (palabra doble) o decimales (coma flotante) de formato idéntico al de los objetos de 32 bits.	-	-	No
Palabra doble interna	Objetos empleados para almacenar valores durante la operación en la memoria de datos.	%MDi	1500	Sí con Twido Suite
Constante doble	Almacenamiento de las constantes	%KDi	1500	Sí con Twido Suite

(1) Escrito por el programa o mediante el Editor de tablas de animación

Tabla de palabras dobles de operandos

Formatos para direccionamiento de objeto bit, palabra, doble palabra y Entradas/Salidas

Objeto bit. Se utiliza el siguiente formato para direccionar los objetos de bit de pasos, memoria interna y de sistema.

%	M, S o X	i
Símbolo	Tipo de objeto	Número

Formato para direccional objeto de bits

Grupo	Elemento	Descripción
Símbolo	%	El símbolo de porcentaje siempre precede a una variable de software
Tipo de objeto	M	Los bits internos almacenan valores intermedios mientras se está ejecutando un programa
	S	Los bits de sistema proporcionan información de control y de estado del autómata
	X	Los bits de pasos proporcionan información de estado de las actividades de pasos
Número	i	El valor numérico máximo depende del número de objetos configurados

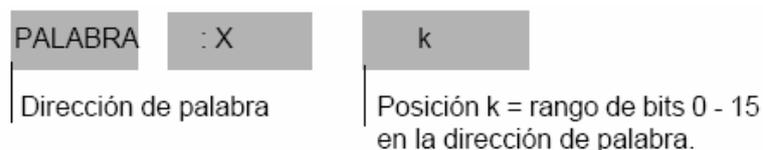
Descripción del direccionamiento de objetos bit

Objeto palabra. Se utiliza el siguiente formato para direccionar los objetos de palabras de sistema, memoria interna y de constantes.



Formato para direccional objeto de palabras

Existe la posibilidad de extraer uno de los 16 bits de un objeto palabra, tomando en cuenta la siguiente sintaxis:



Formato para extraer un bit de un objeto de palabra

Grupo	Elemento	Descripción
Símbolo	%	El símbolo de porcentaje siempre precede a una dirección interna
Tipo de objeto	M	Las palabras internas almacenan valores intermedios mientras se está ejecutando un programa
	K	Las palabras constantes almacenan valores constantes o mensajes alfanuméricos. Su contenido sólo puede escribirse o modificarse utilizando TwidoSuite
	S	Las palabras de sistema proporcionan información de control y de estado del autómata
Sintaxis	W	Palabra de 16 bits
Número	i	El valor numérico máximo depende del número de objetos configurados

Descripción del direccionamiento de objetos de palabra

Objeto palabra doble. Se utiliza el siguiente formato para direccionar los objetos de palabras dobles internas y constantes.



Formato para direccional objeto de palabras dobles

Símbolo	%	El símbolo de porcentaje siempre precede a una dirección interna
Tipo de objeto	M	Las palabras dobles almacenan valores intermedios mientras se está ejecutando un programa
	K	Las constantes dobles almacenan valores constantes o mensajes alfanuméricos. Su contenido sólo puede escribirse o modificarse utilizando TwidoSuite

Grupo	Elemento	Descripción
Sintaxis	D	Palabra de 32 bits
Número	i	El valor numérico máximo depende del número de objetos configurados

Descripción del direccionamiento de palabras dobles

Entradas/Salidas. Cada punto de entrada/salida de una configuración Twido tiene una dirección exclusiva. Por ejemplo, la dirección "%I0.0.4" representa la entrada 4 de un autómata. Las direcciones de E/S pueden asignarse para el siguiente hardware:

- Autómata configurado como master de conexión remota
- Autómata configurado como E/S remotas
- Módulos de E/S de ampliación

Grupo	Elemento	Valor	Descripción
Símbolo	%	-	El símbolo de porcentaje siempre precede a una dirección interna
Tipo de objeto	I	-	Entrada. La "imagen lógica" del estado eléctrico de un autómata o entrada del módulo de E/S de ampliación
	Q	-	Salida. La "imagen lógica" del estado eléctrico de un autómata o salida del módulo de E/S de ampliación
Posición del PLC	x	0	Autómata master (master de conexión remota)
		1 - 7	Autómata remoto (slave de conexión remota).
Tipo de E/S	y	0	Base del módulo de E/S (E/S locales del autómata)
		1 - 7	Módulos de E/S de ampliación
Número de canal	z	0 - 31	Número de canal de E/S en el autómata o en el módulo de ampliación de E/S. El número de puntos de E/S depende del modelo de autómata o del tipo de módulo de E/S de ampliación

Descripción del direccionamiento de Entradas/Salidas del Autómata

Estructura de la memoria de aplicación

La memoria del autómata a la que se accede mediante la aplicación está dividida en partes diferentes, valores de bit, valores de palabra (valores de 16 bits con señal) y valores de palabra doble (valores de 32 bits con señal). La memoria de bits se encuentra en la RAM integrada en el autómata y contiene el mapa de 128 objetos de bit.

La memoria de palabras admite de tipo dinámicas, donde la memoria en tiempo de ejecución almacenada en RAM solamente. Además contiene Palabras de memoria, palabras dobles, descriptores de programa, el código ejecutable para tareas y los datos de configuración del autómata.

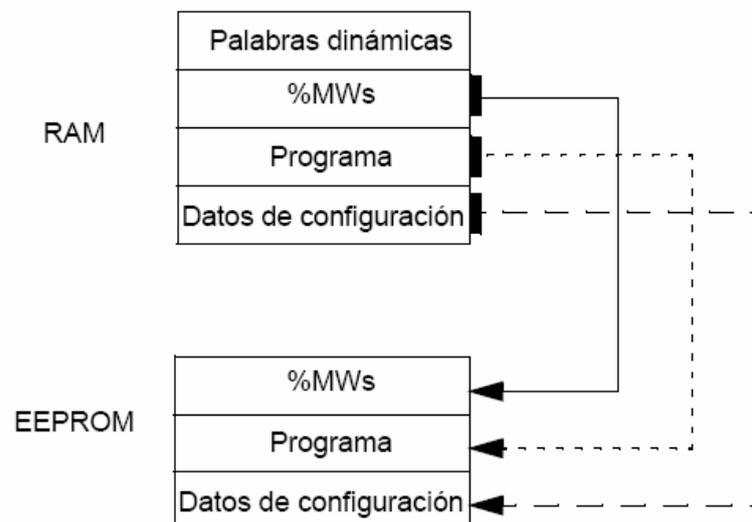
Tipos de almacenamiento en memoria

- **Memoria de acceso aleatorio (Random Access Memory).** Esta es una memoria volátil interna, contiene palabras dinámicas, palabras de memoria, programa y datos de configuración.
- **EEPROM de 32 KB integrada.** Proporciona una copia de seguridad interna de los datos y del programa. Protege el programa contra los daños provocados por fallos de batería o cortes de alimentación de más de 30 días. Contiene el programa y los datos de configuración. Abarca un máximo de 512 palabras de memoria. No se realiza una copia de seguridad del programa si se utiliza un cartucho de memoria ampliada de 64 KB y el dispositivo Twido se ha configurado para aceptar dicho cartucho de memoria ampliada de 64 KB.
- **Cartucho de copia de seguridad de 32 KB.** Externo, opcional y utilizado para guardar un programa y transferirlo a otros autómatas Twido. Se puede utilizar para actualizar el programa en la memoria RAM del autómata. Contiene el programa y las constantes, pero ninguna palabra de memoria.
- **Cartucho de memoria ampliada de 64 KB.** Externo, opcional, que almacena un programa de hasta 64 KB. Debe permanecer conectado al autómata mientras se utiliza dicho programa.

Las palabras de memoria y el programa del autómata se pueden guardar en RAM hasta 30 días si la batería se encuentra en buen estado. El programa se transfiere automáticamente de la memoria EEPROM a la memoria RAM cuando se pierde el programa en esta o si no hay batería. También se puede realizar una transferencia manual mediante TwidoSuite.

Mediante la memoria EEPROM interna del autómata, puede realizarse una copia de seguridad de los datos de configuración, las palabras de memoria y los programas Twido. Dado que al guardar un programa en la EEPROM interna se eliminan todas las palabras de memoria copiadas previamente, en primer lugar debe realizarse la copia de seguridad del programa, y luego, de las palabras de memoria configuradas. Los datos dinámicos pueden almacenarse en palabras de memoria, y luego puede realizarse una copia de seguridad de los mismos en EEPROM. Si no hay ningún programa guardado en la EEPROM interna, no será posible guardar palabras de memoria en ella.

A continuación se incluye un diagrama de la estructura de memoria de un autómata. Las flechas indican qué elementos pueden copiarse en EEPROM desde la memoria RAM.



Estructura de la memoria

Elementos gráficos del lenguaje Ladder

Nombre	Elemento gráfico	Función
Contacto normalmente abierto		Establece contacto cuando el objeto de bit de control está en estado 1
Contacto normalmente cerrado		Establece contacto cuando el objeto de bit de control está en estado 0
Contacto para detectar un flanco ascendente		Flanco ascendente: detecta el cambio de 0 a 1 del objeto de bit de control
Contacto para detectar un flanco descendente		Flanco descendente: detecta el cambio de 1 a 0 del objeto de bit de control
Insertar una conexión		Insertar un bucle Ladder vacío
Eliminar una conexión		Eliminar un bucle Ladder vacío. Nota: 1. Si el bucle Ladder contiene cualquier elemento, en primer lugar debe eliminar todos los elementos Ladder antes de eliminar el bucle 2. El acceso directo del teclado utilizado para eliminar un elemento es Supr
Bobina directa		El objeto de bit asociado toma el valor del resultado del área de comprobación
Bobina inversa		El objeto de bit asociado toma el valor del resultado en negativo del área de comprobación
Establecer bobina		El objeto de bit asociado se establece en 1 cuando el resultado del área de comprobación es 1
Restablecer bobina		El objeto de bit asociado se establece en 0 cuando el resultado del área de comprobación es 1

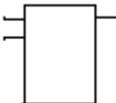
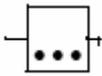
Nombre	Elemento gráfico	Función
Llamada de subrutina o salto	->>%Li ->>%SRi	Se conecta a una instrucción etiquetada ubicada delante o detrás
Retorno desde una subrutina	<RET>	Situado al final de las subrutinas para regresar al programa principal
Detener programa	<END>	Define el final del programa
Temporizadores, contadores, registros, etc.		Cada bloque de función utiliza entradas y salidas que permiten conexiones con otros elementos gráficos. Nota: Las salidas de los bloques de función no pueden conectarse entre sí (conexiones verticales)
Bloque de comparación		Compara dos operandos y la salida cambia a 1 cuando se comprueba el resultado. Tamaño: una fila por dos columnas
Bloque de operación		Realiza operaciones aritméticas y lógicas. Tamaño: una fila por cuatro columnas

Tabla de elementos gráficos del lenguaje Ladder

Instrucciones Ladder especiales OPEN y SHORT. Las instrucciones OPEN y SHORT proporcionan un método apropiado para depurar y solucionar posibles problemas en los programas Ladder. Estas instrucciones especiales alteran la lógica de un escalón, ya sea acortando o abriendo la continuidad de un escalón, tal como se explica en la tabla siguiente.

Instrucción	Descripción
OPEN	Al principio del escalón
	En un escalón: establece una interrupción en la continuidad de un escalón Ladder sin tener en cuenta los resultados de la última operación lógica

Instrucción	Descripción
SHORT	Al principio del escalón
	En un escalón: permite la continuidad a través del escalón sin tener en cuenta los resultados de la última operación lógica

Instrucciones Especiales del Lenguaje Ladder

Consejos sobre programación en Ladder

Tratamiento de los saltos de programa. Utilizar los saltos de programa con precaución para evitar bucles largos que prolonguen el tiempo de ciclo. Evitar los saltos en las instrucciones ubicadas detrás, donde aparece una instrucción delante antes de un salto en un programa.

Programación de salidas. Los bits de salida, al igual que los bits internos, sólo se deben modificar una vez en el programa. En el caso de los bits de salida, sólo se tiene en cuenta el último valor examinado cuando se actualizan las salidas.

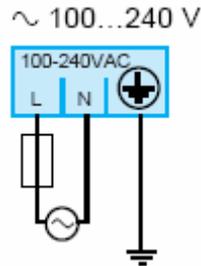
Utilización de los sensores de parada de emergencia de cableado directo. Se recomienda que los sensores utilizados directamente para paradas de emergencia no se procesen por el autómatas, sino directamente a las salidas correspondientes. En el caso del diseño para el sistema de reciclaje de agua se utiliza la parada de emergencia dentro de la lógica del programa, porque las fuentes de alimentación para las salidas son de diferentes características.

Tratamiento de recuperación de la alimentación: Es recomendable que la recuperación de la alimentación dependa de una operación manual. Un reinicio automático puede provocar un funcionamiento no deseado de la instalación (utilizar los bits de sistema %S0, %S1 y %S9).

Comprobación de errores y sintaxis: Cuando se introduce un programa, TwidoSuite comprueba la sintaxis de las instrucciones, los operandos y sus asociaciones.

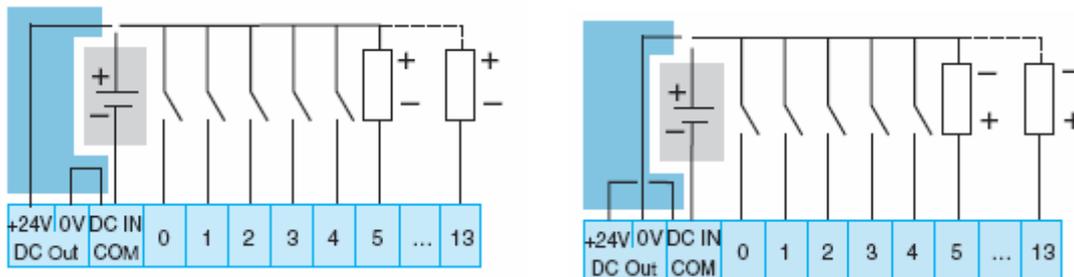
CONFIGURACIÓN DEL CONTROLADOR

Esquemas de cableado para alimentación, entradas y salidas. El esquema de cableado para la alimentación de la base TWDLCAA24DRF es el siguiente:



Esquema de cableado para la alimentación

El cableado para las entradas digitales tienen dos tipos de esquemas, como entrada de corriente continua de común negativo y como entrada de corriente continua de común positivo.

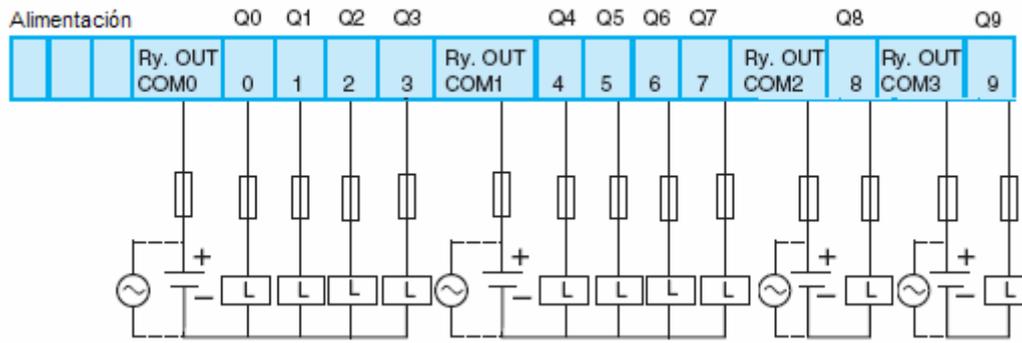


Entrada de común Positivo

Entrada de común negativo

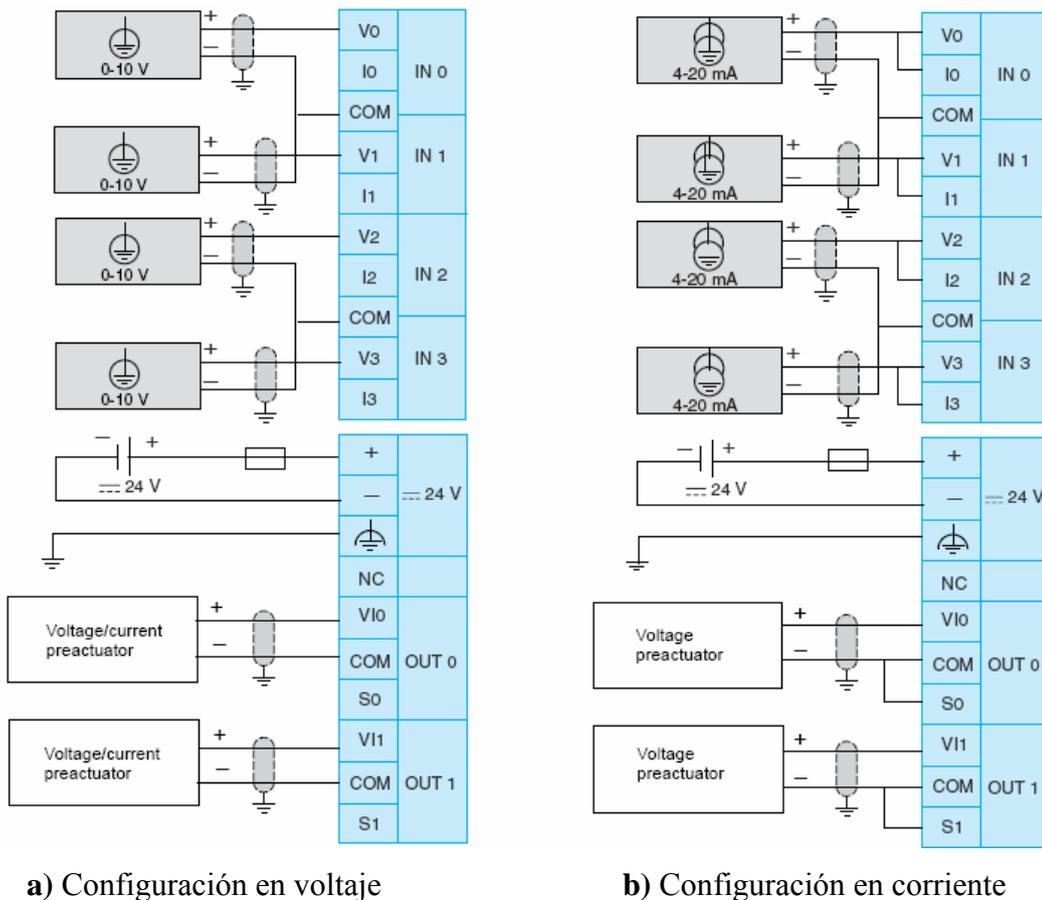
Esquema de cableado para entradas del controlador

El esquema de cableado para salidas a relay es el siguiente:



Esquema de cableado para salidas del controlador

El esquema de conexión para el módulo mixto de entradas/salidas analógicas TWDAMM 6HT tiene configuración para entradas/salidas en voltaje y en corriente, como se indica en la siguiente figura:



Esquema de cableado para módulo de E/S analógicas del controlador

a) Configuración en voltaje. b) Configuración en corriente

UNIDAD DE CONTROL PROPORCIONAL ELECTRÓNICA

ASCO®

SERIE 8908



Características

- Convierte las entradas de las señales de control analógicas a señales para el manejo del actuador mediante modulación por ancho de pulso.
- Función de desconexión al menos luego del 2% de la señal de control máxima
- Rampa de control ajustable.
- Corriente de salida independiente de la resistencia de la bobina del actuador y de las variaciones de la fuente de voltaje.
- Corriente de bobina ajustable dependiendo del requerimiento de la señal de control.
- El circuito de control está integrado mediante un terminal de conexión de acuerdo a la normativa ISO 4400, forma A, DIN 43650, 11mm, estándar industrial B.

Características Eléctricas

Voltaje Nominal: 12VDC

Corriente Máxima: 1100mA

Cables de conexión: Diámetro del cable de 6 – 10 mm

Especificaciones del conector: ISO 4400 / EN 175301-803 , forma A

Seguridad eléctrica: IEC 335

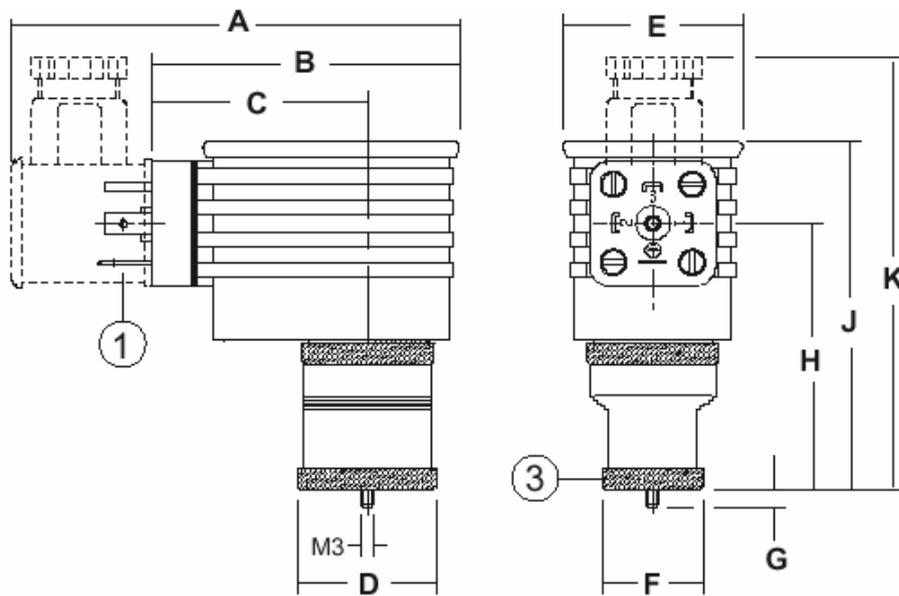
Protección eléctrica: IP 65

Tiempo de rampa: Selección on/off, ajustable de 0,1 – 3 segundos

Frecuencia ajustable: 40 – 700 Hz

Corriente a máxima carga (I_{FL})	Señal de control de entrada			Potencia de consumo (electrónica)	Rango de temperatura de trabajo
	U_c	I_{cx}	I_c		
(mA)	(V)	(mA)	(mA)	(W)	(°C)
1100	0 - 10	0 - 20	4 - 20	0.8	-10 a 75

Dimensiones (mm), peso (kg)



Numero de catálogo	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	Peso
E908A001/004	98	70	48	30	41	30	4	32	51,5	70	0,1
E908A003	98	70	48	32	41	23	4	61	80	98	0,1

- ① Fuente, 4 terminales, ISO 4400, forma A
- ② 3 terminales, ISO 4400, forma A
- ③ 3 terminales, DIN 43650, 11mm estandar industrial B
- ④ 3 terminales, DIN 43650, 9,4mm estandar industrial B

Selección de la señal de control

La señal de control requerida se obtiene ajustando los dipswitches S1, S3 y S4. El valor de fábrica es de 0 – 10 VDC.

S1	S2	S3	S4	Señal de control
Off	Rampa	On	Off	0 – 10V DC
On	Rampa	Off	On	4 – 20 mA
On	Rampa	On	Off	0 – 20 mA

Esquema de Cableado

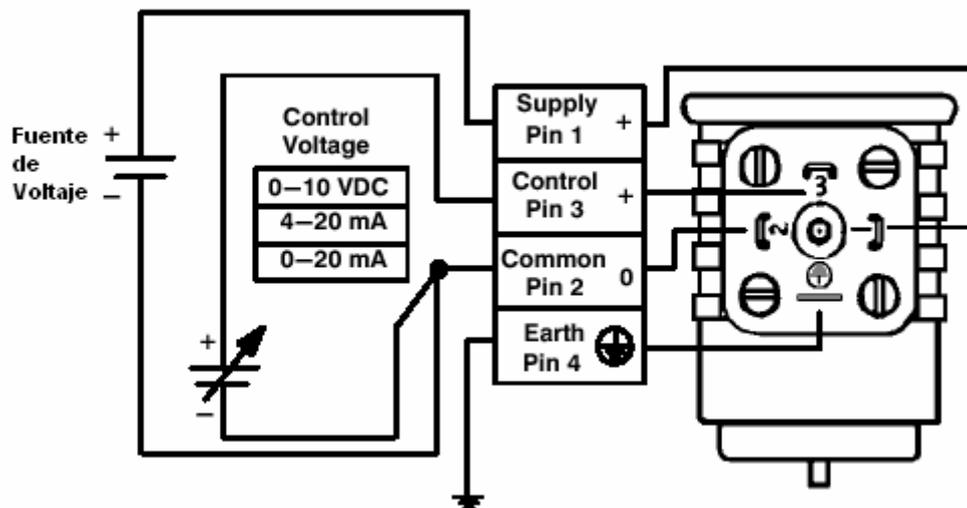
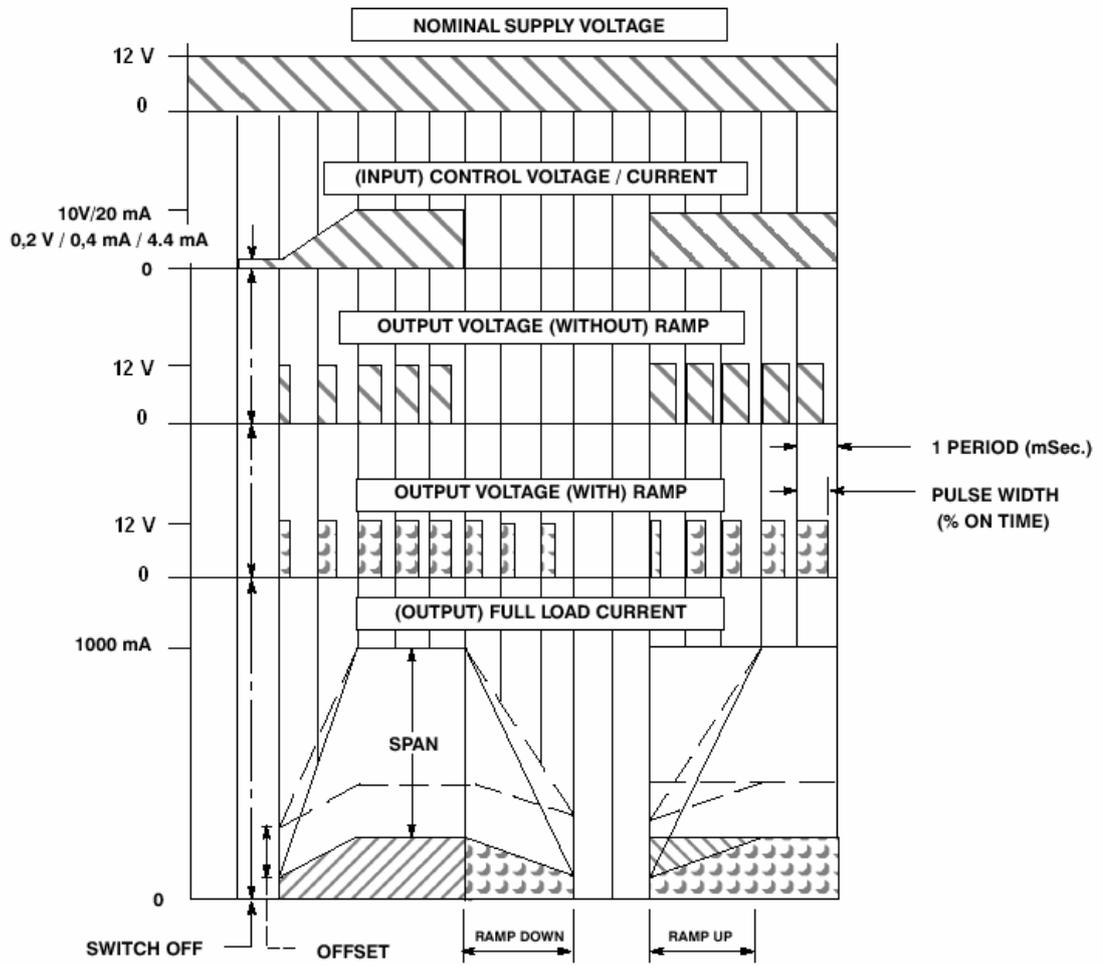


Diagrama de Voltaje- Corriente Vs. Tiempo



BOMBA PARA APLICACIONES MARINAS (BILGE PUMP)



MODELO 24 360GPH

Características

- Totalmente sumergible
- Fácil de limpiar con filtro de enganche que se asegura en su carcasa.
- Operación silenciosa y con menos vibración
- Motor de larga vida compacto y eficiente
- Protección para arranque
- No existe recalentamiento cuando trabaja en vacío
- Protección contra oxidación y corrosión
- Bloque de cableado para grado marino

Características de funcionamiento

	13.6 V	12.0 V
GPH @ Flujo abierto	360	330
GPH @ a una elevación de 1.02 m	265	240
GPH @ a una elevación de 2.04 m	190	150
Corriente máxima (A)	2.5	2.1

Certificaciones

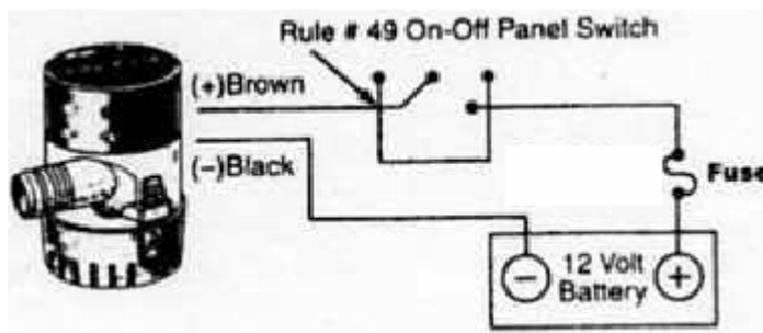
- Equipo aceptado por la NMMA # 704180
- Certificado IMCI – ISO 8849
- Certificado CE
- UPC código 0-42237-08345-6

Especificaciones

Tamaño de fusible	2.5A
Tubería de descarga	$\frac{3}{4}$ " , 19 mm
Terminación de descarga	Tipo púa para manguera
Modelo	24 @ 360GPH
Material de carcasa	ABS
Material de filtro	ABS
Material del eje	Acero inoxidable
Material del impulsor	Nylon
Material de sellado	Nitril/Teflon
Límite de temperatura	93°C
Tiempo de vida típico	1500 horas
Longitud de cable	74 cm
Tipo de Cable	Flexible AGW 16
Peso	9 oz
Largo	8.9 cm
Ancho	6 cm
Profundidad	6 cm
Numero de parte de filtro	Parte M275

Diagrama de conexión

Mantener todos los cables de conexión lo más alto posible del nivel de agua. Utilizar recubrimientos para el cableado para evitar corrosión y deterioro.



BOMBA SUMERGIBLE SPRINGBRUNNEN

MODELOS FP12V-18 Y FP12V-28



Características

- Bomba sumergible
- Filtro asegurado a la carcasa
- Operación silenciosa
- Base de ajuste a la superficie de contacto
- Transformador 110VAC/12VAC 1.5^a

Especificaciones		
Modelo	FP12V-18	FP12V-28
Voltaje de Operación	12VAC	12VAC
Tubería de descarga	½"	½"
Potencia de consumo	18W	28W
Elevación de descarga	1.4 m	1.6 m
Caudal máximo	238GPH	317GPH
Terminación de descarga	Tipo rosca	Tipo rosca
Material de carcasa	Plástico	Plástico
Material de filtro	Plástico	Plástico
Material del eje	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Material del impulsor	Plástico	Plástico

Características de Funcionamiento		
Límite de temperatura	80°C	80°C
Longitud de cable	3 m	3 m
Tipo de Cable	AGW 16 aislado con vaina de caucho cloropreno	AGW 16 aislado con vaina de caucho cloropreno
Peso	15 oz	15 oz
Largo	20 cm	25 cm
Ancho	14 cm	14 cm
Profundidad	15 cm	15 cm

INTERRUPTORES DE NIVEL PARA LÍQUIDO SERIES F7



MODELO F7- BT

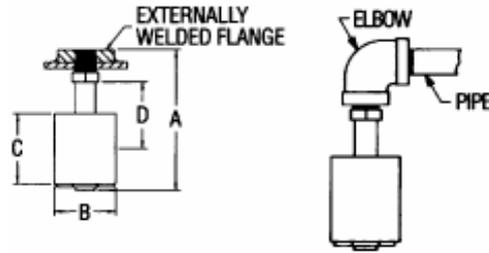
Características

- Provee control de nivel de líquido simple y de bajo costo en tanques o recipientes similares
- Los rangos de conmutación son variables para todas las aplicaciones de los sistemas de control en estado sólido, monitoreo y alarmas
- Para aplicaciones que requieren mayor corriente pueden utilizarse simples interfases con relays.
- Montaje vertical
- Dos acciones de conmutación en su montaje: normalmente abierto o normalmente cerrado
- Boquilla herméticamente sellada que actúa por la acción de magnetos ligados dentro del flotador y pueden ser fácilmente adaptados para abrir o cerrar circuitos en niveles altos o bajos.
- Se revierte la acción de conmutación girando el flotador

Especificaciones

Modelo	F7 - BT
Alimentación	24 VDC
Corriente máxima	0.28A
Clasificación de áreas peligrosas	Clase I, Div 2, Grupos A, B ,C , D
Conexiones de montaje	1/8" NPT (M)
Cables	22 AWG x 46 cm
Magneto	Alnico para -BT
Peso	0.7 oz (20 g)

Dimensiones y montaje



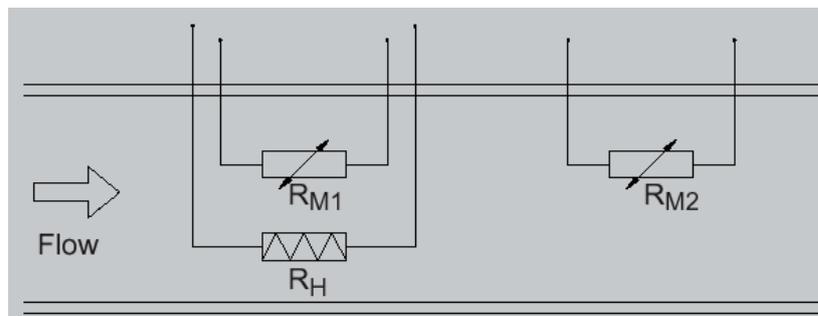
Número de modelo	(A) Longitud de la columna	(B) Diámetro del flotador	(C) Altura de flotador	(D) Altura de actuación
F7-BT	55mm	30mm	25mm	18mm

Datos Físicos

Número de modelo	Material Flotador/ Columna	Temp. Max.	Presión Max.	Zona muerta Aprox.
F7-BT	Buna -N y epoxy / Polibutileno - Terephtalato	105°C	10 Bar	4 mm

SENSOR DE FLUJO RECHNER**RECHNER
SENSORS****MODELO SW-600-G1/2''/28-IL****Características:**

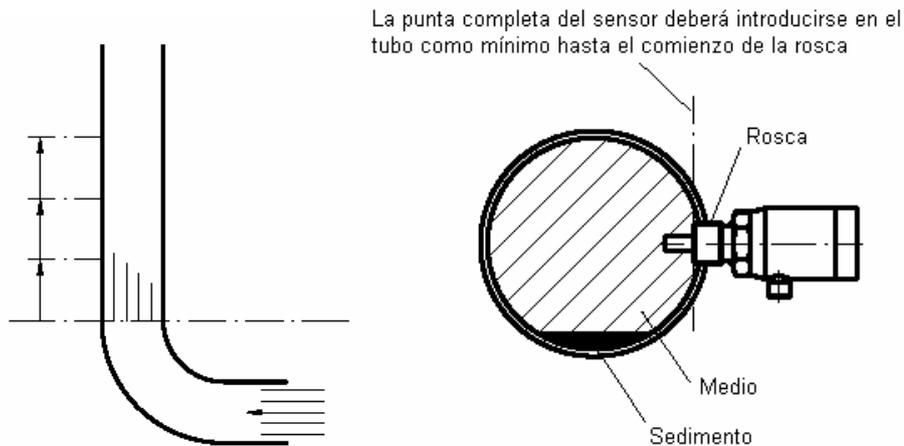
- Controla medios líquidos
- Forma constructiva y compacta unida a la sonda montada
- Ajuste de valores límite mediante potenciómetro y una indicación de diodos luminosos LED (para valores por encima y por debajo del límite) con la salida de conmutación separada galvánicamente
- Basado en el principio de medición calorimétrica, que se fundamenta en el efecto físico de cambio de temperatura en el flujo medio del líquido. Estos sensores contienen una fuente de calentamiento (R_H) y una resistencia de medida que depende de la temperatura (R_{M1}). Una segunda resistencia de medición (R_{M2}) monitorea la temperatura del medio y compensa el valor de medida de flujo durante las variaciones de temperatura.



Principio de funcionamiento del sensor de flujo

Posición de montaje

La función de los sensores de flujo es independiente de su posición. A fin de evitar mensajes incorrectos debido a las turbulencias en el medio, se deberá respetar una distancia mínima de 3 x el diámetro del tubo en las zonas con curvaturas, válvulas y otros objetos parecidos que influyan en la corriente. En los tubos horizontales se recomienda el montaje desde abajo a fin de evitar mediciones incorrectas causadas por burbujas al producirse inclusiones de aire. En caso de sedimentaciones fuertes en las puntas del sensor, el montaje deberá efectuarse lateralmente.



Antes del montaje en la tubería correspondiente deberá asegurarse que el sensor este envuelto del medio líquido. La punta completa del sensor deberá estar introducida en el tubo como mínimo hasta el comienzo de la rosca.

Si se desea la mayor sensibilidad posible del sensor, entonces la cruz encastrada sobre la tuerca de fijación deberá indicar en dirección de la afluencia. Después de enroscar e impermeabilizar, el sensor ofrece la posibilidad de girar el mango de cable junto con el cabezal del sensor a fin de conseguir una alineación óptima.

Ajuste

Con el potenciómetro de 270° en el cabezal indicador se puede ajustar el árbol conmutador que se desee.

Tope de potenciómetro izquierdo	=	sensibilidad mínima
Tope de potenciómetro derecho	=	sensibilidad máxima

Características Técnicas	
Gama de medición	0 – 300 cm/s (0 -150 cm/s) en agua
Reproductividad	1%
Punto de conmutación, histéresis	ajustable
Modelo	SW-600-G1/2"/28-IL
Número de artículo	544 140
Conexión de proceso	G ½"
Tensión de servicio	18...30V DC
Ondulación residual máx.	10%
Salidas analógicas	4(0) – 20mA , 2(0) – 10 V mediante 500 Ω
Salidas de conmutación min., máx.	PNP, NPN máx 300mA
Corriente en vacío	típica 60mA
Tiempo de reacción	2 s
Gradiente de temperatura	4 K/s
Presión de trabajo	200 bar
Temperatura ambiente permisible	0...70°C
Indicación	LCD display (32 x 16 pixeles), LED rojo/verde
Grado de protección	IP 67
Conexión	Clavija de enchufe M12 x 1, 5 bornes
Material en contacto con el medio	Acero fino No. 1,4571 (V4A)
Armazón	Acero fino No. 1,4504 (V2A)
Vidrio	Vidrio de mineral templado
Imán	Cobalto samario

Dimensiones (mm)

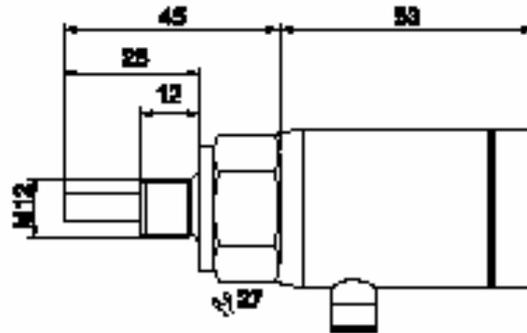
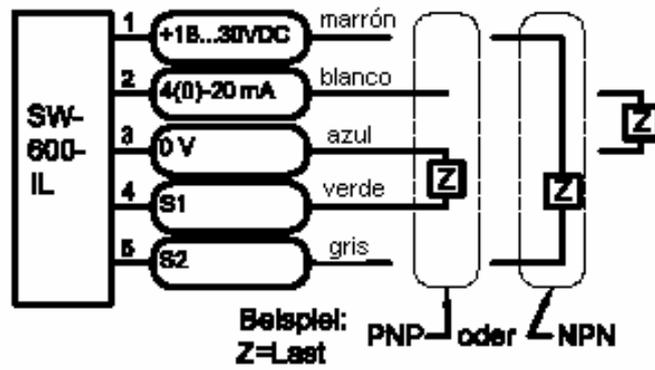


Diagrama de conexiones



CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente Proyecto de Grado fue entregado al Coordinador de Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control del Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica del Ejército, en la fecha escrita en esta certificación.

Sangolquí, 13 de junio del 2008.

Ing. Víctor Proaño
COORDINADOR DE CARRERA

Cristian Vallejo Carpio
AUTOR