

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

**FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y MANUFACTURERA**



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA  
AUTOMATIZADO SCADA DE UNA ESTACIÓN DE  
DOSIFICACIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO LÍQUIDO PARA  
LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA N° 2 SEDAPAL**

## **INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACIÓN DE  
CONOCIMIENTOS**

**PRESENTADO POR:**

**OSWALDO HERNAN VARGAS CUELLAR**

**LIMA -- PERU**

**2003**

## **DEDICATORIA**

EN ESPECIAL A MIS PADRES *PAULINA Y OSWALDO* QUE CON TANTO SACRIFICIO Y ESmero HAN HECHO REALIDAD MIS LOGROS.

A MI ESPOSA *SEFELMIRA E HIJITA EVA CAROLINA*, QUE ME DIERON LA FUERZA Y PERSEVERANCIA PARA LOGRAR UNA DE MIS METAS.

A MIS PRIMOS *ZENON, NIEVES, BERNANDINA, AGAPITO*, Y TIOS *TERESA Y MARIO*.

Y A TODOS MIS FAMILIARES EN GENERAL QUE HAN APOYADO A MIS INICIATIVAS CON "UN GRANITO DE ARENA".

## **RESUMEN**

Con la implementación de este sistema se realizará el monitoreo de las siguientes variables del proceso de coagulación dentro de una planta de tratamiento de agua, como son: Turbiedad y pH (las cuales se recogen de equipos sensores ubicados en planta). La colección de estas permiten al operador ubicado a una gran distancia de planta tenerlos presentes en tiempo real durante la toma de decisiones. En otro nivel se realizará una estrategia de control automático por medio de PLC que realice el encendido y apagado de las bombas dosificadoras, manejando de forma remota el actuador (servomotor) que regula (de acuerdo a las necesidades) el desplazamiento de la carrera. Se realizará un control de funcionamiento de válvulas open-close, para permitir la alternancia de las bombas dosificadoras, de manera automática. Como acápite del funcionamiento de la instalación, se implementará un sistema SCADA, con enlace de comunicación industrial tipo red FIPWAY, el cual basado en software y hardware permitirá el monitoreo y control en tiempo real del sistema dosificador, además de la recolección continua de datos en forma de históricos, gráficos y generación de alarmas activadas.

# INDICE

	Pág.
1. <b>INTRODUCCION</b>	1
2. <b>ANTECEDENTES</b>	2
3. <b>OBJETIVOS</b>	2
4. <b>GENERALIDADES</b>	3
4.1. Introducción al problema.	3
5. <b>DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS Y TECNICAS</b>	4
5.1. Dosificación de Sulfato de Aluminio.	4
5.1.1. Teorías emitidas sobre la formación del coágulo.	5
5.1.2. Potencial Z.	6
5.2. Coagulación de coloidales	8
5.3. Dosis de coagulante	9
5.4. Reactivo Sulfato de Aluminio	11
5.4.1. Tipos de Sulfato de Aluminio	13
5.4.2. La práctica de la coagulación con Sulfato de Aluminio	13
5.5. La turbiedad	15
5.5.1. Coagulación de la turbiedad	19
5.5.1.1. Alta turbiedad y alta alcalinidad	19
5.5.1.2. Alta turbiedad y baja alcalinidad	20
5.5.1.3. Baja turbiedad y alta alcalinidad	20
5.5.1.4. Baja turbiedad y baja alcalinidad	20
5.5.2. Coagulación del color y la turbiedad	21
5.6. El efecto del pH	23
5.7. El efecto de la temperatura	24
5.8. La cloración como ayuda de la coagulación	24
5.9. Elementos de los sistemas de dosificación de líquidos	24
5.9.1. Bomba dosificadora recíprocante	24
5.9.1.1. El mecanismo de manejo	28
5.9.1.2. Amplitud de modulación	28
5.9.1.3. Manejadores de pérdida de movimiento	29
5.9.1.4. El manejador primario	31

5.9.1.5.	Configuraciones del extremo líquido	32
5.9.1.6.	Cámara de desplazamiento con diafragma.	32
5.9.1.7.	Tipo de diafragma de disco	33
5.9.1.8.	Tipo de diafragma tubular	34
5.9.1.9.	Mecanismos para ajuste de carrera	38
5.9.1.10.	Rigidez	42
5.9.1.11.	Exactitud	43
5.9.1.12.	Densidad	45
5.9.1.13.	Eficiencia Hidráulica	48
5.9.1.14.	Sistemas de dosificación automáticos	51
5.9.2.	Dampers de pulsación	56
5.9.3.	Control de presión – válvulas de seguridad de sobreflujo – válvulas de retención de presión	58
5.9.4.	Instrumentación	59
5.9.4.1.	Instrumentos de medida de la turbiedad	59
5.9.4.1.1.	Instalación de línea de muestreo	60
5.9.4.1.2.	Medida de turbiedad on-line	62
5.9.4.2.	Instrumentos de medida del pH	62
5.9.4.3.	Instrumentos de medida del flujo	68
5.9.5.	Tuberías de descarga	69
5.10.	El Sistema de supervisión y adquisición de Datos	70
5.10.1.	Sistema SCADA	70
5.10.2.	Niveles de supervisión y control	70
5.10.3.	Elementos	71
5.10.4.	Controlador lógico programable	72
5.10.4.1.	Operación	73
5.10.4.2.	Control de procesos	74
5.10.4.3.	Sistema de control distribuido	74
5.10.4.4.	Implementación en sistemas SCADA	74
5.10.4.5.	Ventajas comparativas de los PLC's	75
5.10.4.6.	Consideraciones para la integración de los Procesos industriales	77
5.10.4.7.	Selección de controladores programables	77

5.10.4.8.	Alimentación eléctrica	77
5.10.4.9.	CPU (Central Process Unit)	78
5.10.4.10.	Interfases de entrada y salida discreta	78
5.10.4.11.	Interfases de entrada y salida analógica	80
5.10.4.12.	Programación de PLC's	82
5.11.	Red de comunicación Industrial	84
5.11.1.	Transmisión de señales digitales	86
5.11.2.	Instalación tradicional de cables de señal 4 - 20 mA.	87
5.11.3.	Cableado Fieldbus	88
5.11.4.	Enlace Fipway	89
5.12.	Software de supervisión y control de procesos	93
5.12.1.	Administración de configuración	95
5.12.2.	Diseño de gráficos	96
5.12.3.	Supervisión de línea	97
5.12.4.	Presentación y recolección de datos	97
5.12.5.	Alarmas	98
5.12.6.	Enlaces en tiempo real a otros softwares	98
<b>6.</b>	<b>DESARROLLO DEL TEMA</b>	<b>99</b>
6.1.	Diseño del sistema dosificador	99
6.1.1.	Sistema mecánico	100
6.1.1.1.	Selección de la bomba dosificadora	100
6.1.1.2.	Características requeridas de bombas dosificadoras de Sulfato de Aluminio en Solución	101
6.1.2.	Sistema de instrumentación	103
6.1.2.1.	Instalación del enlace Fipway	109
6.1.3.	Sistema de control y monitoreo	110
6.1.3.1.	Desarrollo del Software SCADA	110
6.2.	Economía de la instalación	113
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>118</b>
<b>8.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>120</b>
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>123</b>
<b>10.</b>	<b>ANEXO</b>	<b>124</b>

## **1. INTRODUCCION**

El uso del reactivo Sulfato de Aluminio ( $Al_2SO_4$ ) es muy frecuente dentro de plantas de tratamiento de agua, la aplicación de éste reactivo se realiza por medio de sistemas dosificadores. Los sistemas de dosificación de reactivos químicos en general son esenciales en la industria de los procesos, estos sistemas son variados y pueden formar líneas de grandes dimensiones.

Tales sistemas dosificadores pueden presentar dificultades en el control y supervisión del funcionamiento de los mismos, además de provocar alteraciones en los flujos dosificados, tiempo de respuesta lentos ante las perturbaciones, etc.

El presente tema trata de enfrentar los problemas de dosificación en distancias largas y de suministrar una técnica de monitoreo SCADA (Supervisor Control and Data Acquisition) de las variables fisico-químicas involucradas en un proceso de tratamiento de agua potable, que permita un trabajo ininterrumpido de los sistemas dosificadores de manera automática y mediante la supervisión por software.

Este estudio no se limita a líneas dosificadoras de Sulfato de Aluminio sino que de manera similar y con algunas modificaciones puede extenderse a sistemas dosificadores de otros reactivos químicos en estado líquido.

## **2. ANTECEDENTES**

Los sistemas de dosificación de reactivos líquidos son comunes en todo proceso de tratamiento de agua, pero conforme las dimensiones del proceso crecen, aumentan los problemas en el control del sistema, actualmente no existe en el Perú un sistema de dosificación automático empleado en una Planta de Tratamiento de agua, por lo que el presente trabajo surge de manera inédita para investigar y dar mayores alcances de las amplias perspectivas del presente trabajo.

### 3. OBJETIVOS

El presente trabajo, esta sustentado en la experiencia profesional del autor, dentro de un trabajo de riguroso carácter ingenieril e integrador de diferentes tecnologías modernas, que cuenta con los siguientes objetivos:

1. Estudio Teórico de los factores que afectan el proceso de la coagulación dentro de una planta de Tratamiento de Agua.
2. Estudio de los elementos de los sistemas de dosificación de reactivos líquidos.
3. Estudio de los elementos de los sistemas de supervisión y control en tiempo real (SCADA).
4. Diseño e instalación de un sistema de dosificación de sulfato de aluminio de precisión que incluya elementos a controlar y supervisar.
5. La implementación de un sistema de control que pueda escalar e integrarse a centrales de control principales de mayores dimensiones por medio de protocolos de comunicación industriales de estructura abierta.
6. La instalación de la línea de dosificación diseñada, incluye los aspectos mecánico, eléctrico, instrumental y evaluación de software a integrar, definiendo elementos del sistema y comparándolo con tecnologías actuales dentro de redes de comunicación industrial.
7. La necesidad de realizar un proyecto para actualizar las instalaciones de dosificación de reactivos químicos en las Plantas de Tratamiento de Agua del país y estar acorde al avance de la tecnología en dosificación del principal reactivo floculante, conocido como el Sulfato de Aluminio.
8. Establecer el estudio de la economía del sistema a implementarse.



## 4. GENERALIDADES

### 4.1. Introducción al problema.

El control automático de los equipos de dosificación de líquidos, requiere de una estructura totalmente adecuada para tal característica, por lo cual los equipos deben de tener las condiciones adecuadas para poder ser controlados, lo cual sale del esquema de las bombas dosificadoras convencionales de ajuste manual.

En la actualidad la mayoría de empresas de tratamiento de agua, utilizan equipos de dosificación de Sulfato de Aluminio regulados de forma manual (ya sean gravimétricos o volumétricos), lo cual limita las capacidades de los softwares SCADA. Para integrar éstos sistemas de dosificación a condiciones de control SCADA, se necesita reformular las bases de las instalaciones de dosificación de reactivos en general.

La base física sobre la que se presentará el presente trabajo, se ubicará en la Estación de Reactivos Químicos de la Planta de Tratamiento de Agua Potable N° 2, de La Atarjea, en la ciudad de Lima, Perú. En éste lugar el autor plantea la reestructuración del sistema dosificador y una estrategia de control y adquisición de datos para ser integrado en el sistema SCADA total de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de SEDAPAL.

El equipo de dosificación de sulfato de aluminio líquido de la Planta N°2, se encuentra compuesto por tres bombas dosificadoras de membrana con cabezal actuado hidráulicamente, que dosifican dosis variables de sulfato de aluminio a sus respectivos puntos de dosificación (ver anexo1). Las dosis varían ostensiblemente de acuerdo a la turbiedad, pH y caudal del agua tratada en la planta lo cual genera problemas de capacidad de las bombas puesto que estas trabajan bien dentro de un rango de caudal determinado, además si se cuenta con otros reactivos floculantes la dosis puede disminuir a pocos litros por minuto de sulfato de aluminio y/o se puede elevar desproporcionalmente a varios litros por minuto.

Al no existir bombas que actúen en rangos tan amplios a la misma precisión de dosificación, se hace necesario una alternancia de capacidades en las bombas.

De tal forma, el sistema de dosificación actual no se integra el sistema SCADA, de la Planta de La Atarjea, por no poseer características para su control a distancia, siendo el presente proyecto el primero en formularse en este sentido en la Planta de Tratamiento de Agua de Lima.

## **5. DESARROLLO DE CONCEPTOS Y TECNICAS**

En este capítulo se introduce dentro de los conceptos teóricos de la dosificación de Sulfato de Aluminio para procesos de coagulación y floculación indicando el método de obtener la dosificación adecuada aplicando conceptos modernos de turbiedad y pH.

También incluye la teoría de la mecánica de los sistemas de dosificación de líquidos y conceptos de instrumentación relacionada a las variables a monitorear (turbiedad y pH).

Es importante comprender el principio, la operación y el mantenimiento de equipos como bombas dosificadoras de reactivos químicos, dampers de pulsación, válvulas de seguridad, instrumentos de medida de turbiedad on-line, pH-metros on-line y medidores de flujo electromagnéticos.

### **5.1. Dosificación de Sulfato de Aluminio.**

Se sabe, por códigos antiguos, que los egipcios utilizaron muchos procesos para clarificar la lodosa agua del río Nilo. Se emplearon varios tipos de coagulantes, incluyendo almendras, frijoles y alumbre. También se ha dado crédito a los chinos por el uso de alumbre para clarificar el agua. En la literatura antigua aparecen muchas citas a este respecto, todas las cuales

confirman el hecho de que el uso de coagulantes químicos era bien conocido y ampliamente practicado antes de la Era Cristiana.

Las aguas superficiales que normalmente se encuentran en la naturaleza, contienen proporciones variables de sólidos suspendidos relativamente gruesos, sólidos más finos que aparecen como turbiedad y color, y algunos otros materiales coloidales. La coagulación en el tratamiento del agua reducirá las concentraciones de estos materiales a límites que pueden ser tolerados. Sin embargo, existen casos en los que la coagulación se lleva a cabo fundamentalmente para remover color y otros materiales del agua, con objeto de hacerla adecuada para un determinado uso.

La sedimentación natural removerá sólidos suspendidos relativamente gruesos, pero existe un límite práctico definido de la longitud del periodo de sedimentación. También se encuentra presente en aguas superficiales material muy finamente dividido en cantidades apreciables, como arcilla y sustancias similares.

Además, los procesos de coagulación-floculación-sedimentación son altamente eficientes para la remoción de bacterias vegetativas; la remoción de bacterias es directamente proporcional a la remoción de la turbiedad y se pueden lograr remociones de hasta 99.7 % cuando se obtiene una eficiencia muy alta en el proceso de coagulación y sedimentación.

La coagulación de las partículas coloidales en el agua usando numerosas formas de sulfato de aluminio ha sido conocida desde el siglo diecisiete. Aunque los detalles históricos han sido perdidos.

#### **5.1.1. Teorías emitidas sobre la formación del coagulo**

Dos modelos explican este proceso: el modelo de la doble capa, basado en las fuerzas electrostáticas de atracción y repulsión; y el del puente químico, que establece una relación de dependencia entre las fuerzas químicas y la superficie de los coloides, para una mayor información se debe de consultar

la literatura especializada, sin embargo en este trabajo haremos mención de la teoría del Potencial Z.

### **5.1.2. Potencial Z**

Como se ha visto anteriormente, por lo general los materiales suspendidos son de naturaleza coloidal y suspensiones ligeramente coaguladas. La estabilidad de estas suspensiones está relacionada al hecho de que la mayoría de partículas individuales poseen cargas eléctricas que producen su mutua repulsión y las mantienen suspendidas. La carga (potencial zeta) en la mayoría de estos sólidos orgánicos y biológicos es negativa cuando están suspendidos en agua. Dos excepciones que vale la pena mencionar son los óxidos y sulfuros metálicos.

La carga eléctrica y el tamaño de la partícula son importantes en cualquier proceso de clarificación de agua, y están interrelacionados. Cuando las partículas son grandes, las cargas no son lo suficientemente fuertes para apartarlas de manera que coalescen y decantan. Con partículas más pequeñas las cargas pueden producir repulsión entre partículas, así las partículas permanecen en suspensión.

Ya que la mayoría de partículas suspendidas en agua tienen un tamaño de 0.1 a 1 micrón, la clarificación mediante residencia podría no ser práctica. Además la filtración de estas pequeñas partículas podría requerir un medio fino de filtración tal, que las velocidades de filtración serían excesivamente lentas.

Los químicos orgánicos e inorgánicos son utilizados para la coagulación/floculación, con sulfato de aluminio que es el químico más importante de los inorgánicos. El sulfato de aluminio reacciona con alcalinidad en el agua formando un precipitado de hidróxido de aluminio. Estas partículas precipitadas están cargadas en forma positiva y por lo tanto se repelen unas con otras. La neutralización de la carga por medio de iones negativos y sólidos suspendidos produce la coagulación. Con una ligera

agitación las partículas coaguladas luego forman puentes para formar una precipitación gelatinosa/floco que atrapa más sólidos.

Z, es un potencial electrocinético, por oposición al potencial termodinámico E, calculable por la fórmula de Nernst, y que es igual a la diferencia de potencial entre la pared y el seno del líquido.

Z depende a la vez de E y del espesor de la doble capa. El aparato de medida correspondiente se llama Zetámetro.

Cuando una partícula se encuentra sometida a un campo eléctrico, alcanza casi instantáneamente, una velocidad tal que se establece un equilibrio entre la fuerza eléctrica de atracción y la fuerza de rozamiento debida a la viscosidad del medio. El cálculo lleva a la relación siguiente entre Z y la movilidad de la partícula:

$$Z = \frac{k\eta\mu}{D} \quad (1)$$

$\eta$  Viscosidad dinámica en dPa.s

D Constante dieléctrica del medio.

$\mu$  Movilidad de la partícula en  $\mu\text{s} / (\text{V} \cdot \text{cm})$

Z Se expresa en mV.

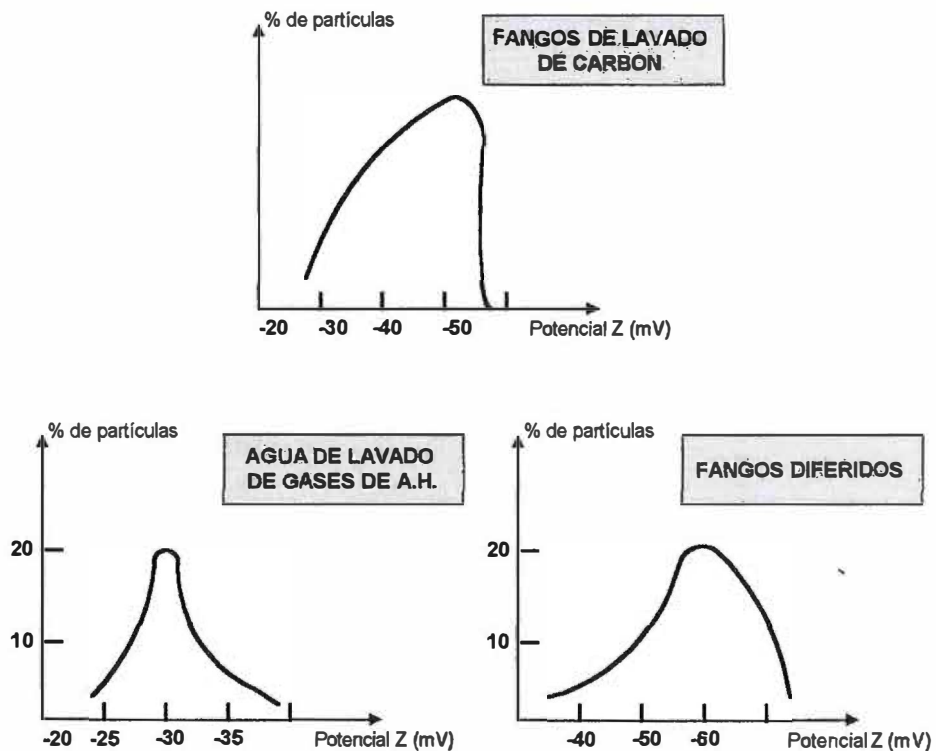
El factor K es función de los valores relativos del diámetro de la partícula y del espesor de la doble capa iónica.

**TABLA 5.1**

	K	Fórmula
Partícula relativamente gruesa	$4 \pi$	de Helmholtz
Pequeña partícula aproximada	$6 \pi$	de Huckel
Esférica		

La relación muestra que todas las partículas cuyo potencial electrocinético sea idéntico, tendrán la misma movilidad, cualquiera sea su radio.

Las curvas experimentales que se incluyen a continuación, correspondientes a aguas y fangos, indican el porcentaje de las partículas que se desplazan en un campo de potencial variable. El máximo de la curva da el potencial Zeta de los coloides contenidos en las aguas o los fangos experimentados.



*Fig. 5.1 Curvas Experimentales*

## 5.2. Coagulación de coloidales

La mayoría de las aguas pueden ser clarificadas por la adición de alumbre u otros materiales coagulantes seguida de sedimentación, durante un corto periodo que dura de 2 a 4 horas. Sin embargo, la efectividad de la clarificación

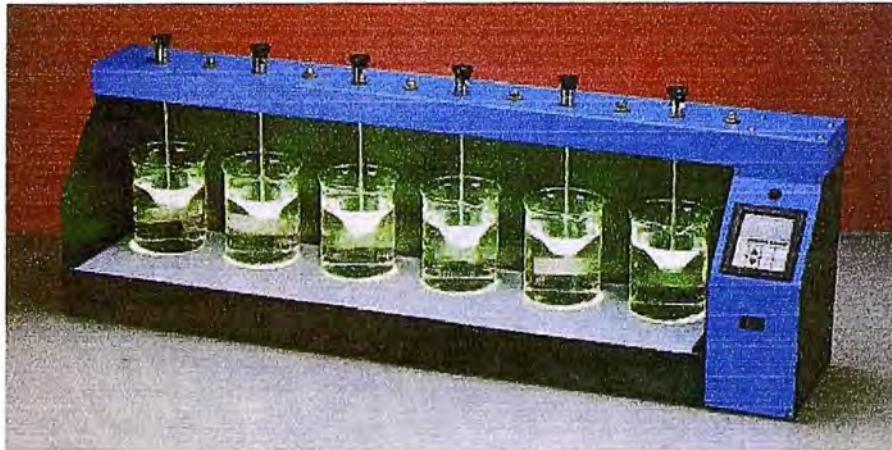
se retarda a menudo por algunas condiciones que tienden a inhibir la aglomeración de los sólidos suspendidos, dando por resultado una clarificación deficiente. Para acondicionar adecuadamente el agua en estas condiciones, se requiere un conocimiento de la fisico-química y la química coloidal, ya que la remoción de tales sustancias está regida por leyes químicas fundamentales en estos campos.

Los coagulantes más comunes son las sales metálicas y los denominados polieléctrolitos o polímeros. Los primeros tales como: el sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2\text{SO}_4$ ) y el cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) son los más usados y casi siempre son los que se denominan “Coagulantes Primarios”, ya que son los que se dosifican en mayor cantidad. Los polímeros son compuestos sintetizados, los que poseen un peso molecular muy grande, y son utilizados como “Ayudantes de la Coagulación” para mejorar la eficiencia de los primeros; siendo utilizados en nuestro medio los coagulantes tipo polímero catiónicos como el CAT-FLOC, Poliaminas, Aminas Cuaternarias, Copolímeros.

### **5.3. Dosis de coagulante**

Las dosis de coagulante se determina realizando ensayos con el agua conocidas como “Prueba de Jarras”. Es importante realizar ensayos a una temperatura próxima a la que se tendrá en el agua realmente durante su tratamiento.

En primer lugar, se ensaya un solo reactivo en diferentes dosis. Si el resultado no es satisfactorio, se efectúa un nuevo ensayo, repitiendo el tratamiento que mejor resultado ha dado en el primero, y experimentando otro tratamiento en paralelo.



***Fig. 5.2. Floculador de laboratorio donde se realizan las pruebas de jarras***

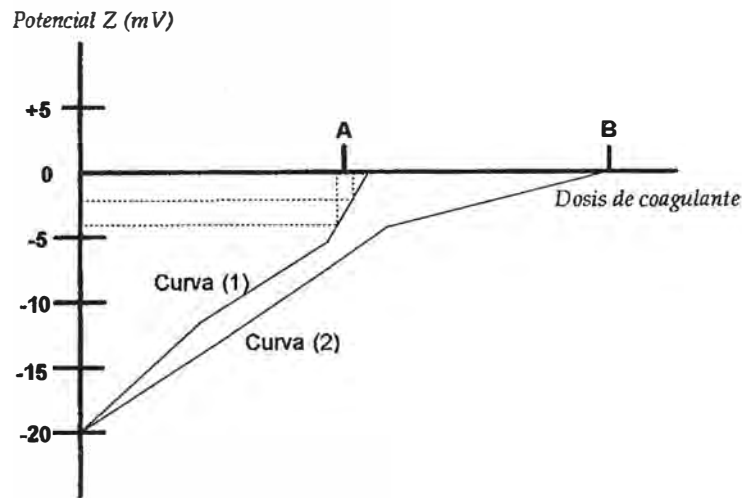
Se utiliza un floculador (fig.2.3), que permita agitar simultáneamente, a una velocidad determinada, el líquido contenido en una serie de vasos.

Para que los resultados sean comparables, es preciso, naturalmente, que la velocidad de rotación sea idéntica en todos los vasos, situándose el valor óptimo alrededor de 40 revoluciones por minuto para una pala de 1 x 5 cm que gire en un vaso de 1 litro.

Este ensayo se efectúa durante 20 minutos. Anotando los siguientes datos :

- a) Dosis de reactivos
- b) Aspecto de la floculación
- c) pH después de la floculación.
- d) Para los mejores resultados se completarán con los datos siguientes:  
porcentaje de fango, color, turbiedad del agua filtrada, otras medidas especiales.





**Fig.5.3. Determinación de la dosis de coagulante por medio del potencial Z**

Se puede complementar la prueba con el estudio del potencial Z. La curva que representa la evolución del potencial Z en función de la dosis de reactivo, puede tener características muy diferentes, según el agua examinada.

En el caso de una curva próxima a la curva (1), para obtener un agua de buena calidad, basta adoptar una dosis A de reactivo, que permita alcanzar un potencial comprendido entre -3 y -5 mV; por el contrario, para una curva del tipo (2), es preciso adoptar la dosis B, que anula al potencial Z..

#### 5.4. Reactivo Sulfato de Aluminio

- SULFATO DE ALUMINIO Y AMONIO

- Fórmula de MINERO PERU:  $Al.NH_4(SO_4)_2 \cdot 12 H_2O$

- Fórmula de la AWWA. (Manual Pág. 434) :  $Al_2(SO_4)_3(NH_4)_2.SO_4 n H_2O$

- SULFATO DE ALUMINIO

- Fórmula de la AWWA:  $Al_2(SO_4)_3 n (H_2O)$

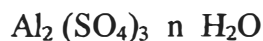
Peso Molecular:

Para  $n = 18$  - P.M. = 606

En los análisis se ha encontrado un porcentaje por peso de 10.67 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y valores muy bajos de fierro, basicidad, insolubles, cobre, zinc y manganeso, todos estos inferiores a los señalados por la AWWA lo que hace aceptable el producto.

El valor de 10.67% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  comparado con el 17% señalado en las especificaciones de la AWWA, está mostrando que el producto solo tiene 10.67 %:  $17 \times 100 = 0.63$  o sea solamente el 63% del principio activo. En otras palabras, debe disponerse de  $100: 0.63 = 0.62$  % mayor de producto para igualar al producto de 17% cuyo pago solo alcanza al porcentaje referido. Esto puede resultar en 63% de mayor procesamiento en planta, exceso de ensacado y transporte y manejo en el punto de aplicación. Es conveniente estudiar este punto con mayor detalle, como referencia se puede señalar según en la página 435 (AWWA-Sic) el sulfato de aluminio y amonio esta registrado con solo 11% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

La primera especificación fue publicada en 1925. Posteriormente fueron transformada en “menos exigentes” para dar prioridad al empleo de la bauxita en la producción de aluminio para su empleo en la guerra. Más adelante y después de varias revisiones en 1982 se aprobaron las que hasta hoy son las últimas especificaciones y llevan la nomenclatura AWWA B-403-82 sulfato de aluminio, líquido, granulado, o en bloque.



En donde n es aproximadamente 14 en lugar de 18 que es la verdadera formula cristalizada. El propósito de producir esta forma de sulfato de aluminio es doble, primero: gana o pierde lentamente moléculas de agua, bajo condiciones adversas de almacenamiento, segundo: el sulfato de aluminio con 14 moléculas de agua de cristalización es aproximadamente 12 por ciento más potente que el sulfato de aluminio con 18 moléculas de agua.

La utilización de la forma más “potente” reduce el tonelaje que debe manipularse y el espacio de almacenamiento del producto y ahorra los costos de transporte.

#### 5.4.1. Tipos de Sulfato de Aluminio

En el mercado se encuentran varios otros tipos de sulfato de aluminio (dry alums) que se utilizan en el tratamiento de aguas de piscinas y en ciertas industrias. Estos productos reciben el nombre de “true alums” (no traducido al español) y son doble sales conteniendo 24 moléculas de agua de cristalización. Estos productos son excelentes coagulantes pero tienen bajo contenido de  $Al_2O_3$  y su uso está relativamente limitado en comparación con el sulfato de aluminio.

Es importante anotar que la exigencia de que el producto que se compra tenga 17% , 8% ó cualquier otro porcentaje que se acuerde, tiene como primera razón de ser, la de exigir que se cumpla con la cantidad de sustancia activa que se ha contratado ya que todo lo que se entregue en porcentaje menor es material inerte o agua que descuidadamente se valoriza a precio del producto. Recuérdese también que 1% menos en el contenido de  $Al_2O_3$  es igual a 6% del total (17%) y este es el que se pesa o mide para el pago.

Para mejor explicación se puede decir que  $Al_2O_3$  es el producto final del proceso de laboratorio en el que se valora el contenido de aluminio de uno de los sulfatos de aluminio y siendo el aluminio el único elemento de la fórmula que actúa en la coagulación, un porcentaje de 17% es el representativo o producto final del procesamiento de laboratorio que corresponde a sulfato de aluminio en 14 moléculas de agua (n en la fórmula). Dicho en otras palabras se compra el aluminio contenido en la fórmula, los demás elementos son soporte o relleno.

Se inicia ahora el uso de polieléctrolitos con lo que se da un gran paso hacia la mejora de la calidad y costo del agua tratada. Es oportuno, a la vez continuar con nuevas aplicaciones de polieléctrolitos.

#### **5.4.2. La practica de la coagulación con Sulfato de Aluminio**

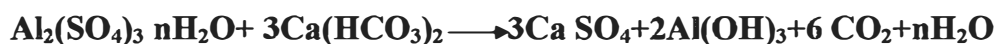
Las investigaciones de laboratorio han demostrado que el flóculo formado en una solución parcialmente alcalinizada es una función del pH de la solución y otras particularidades del comportamiento del sulfato de aluminio, no obstante hasta el momento no se ha llegado a una explicación integral del fenómeno de la floculación.

La presencia de otras sustancias inertes no es siempre detrimento para la calidad de la floculación, muy por el contrario algunos operadores han encontrado que las aguas con baja turbiedad floculan mejor añadiéndoles una pequeña cantidad de arcilla, la que hace "*cuerpo*" con el compuesto coagulante . Por último se sabe de algunas plantas en que se sustituye el sulfato de aluminio de 17% simplemente por arcilla que a veces es activada con ácido sulfúrico, arcilla que es indudablemente de la misma familia del sulfato de aluminio y que lleva gran ventaja de conseguirse a veces a solo el precio de manejo y de transporte.

Aún más, cualquier ion presente en el agua ejercerá un determinado efecto dependiendo de su concentración y de la cantidad y naturaleza de su carga, de lo que se deduce fácilmente que deben esperarse diferentes comportamiento en aguas de diferente origen. Estas particularidades se observan en los polieléctrolitos en lo que se puede decir que cada tipo de agua tiene su electrolito ideal ya que algunos de estos productos no tienen ningún efecto en determinada agua y que en el estado actual es tecnología, solo puede ser descubierta por experimentación.

La sección 2 de las especificaciones de la AWWA acepta la presencia en el producto de materia soluble e insoluble, estableciendo que la materia *insoluble* presente no debe exceder del 10% . Establece también la especificación y califica el producto como purificado el que contenga menos de 0.5 por ciento de material insoluble.

El sulfato de aluminio añadido al agua, reacciona con la alcalinidad natural de esta o con alcalinidad añadida en caso de ser la primera insuficiente para cumplir la reacción. La ecuación es la siguiente



La adición de otros coagulantes, como los compuestos de fierro, producen ecuaciones similares.

De acuerdo al manual de la AWWA, en realidad la coagulación no es tan simple como se expresa en la ecuación de reacción de los componentes. En la práctica la cantidad de  $\text{CO}_2$  formado y de alcalinidad necesaria es siempre menor que la teórica. Se tiene así que es práctica común añadir cantidades de coagulante mayores que las máximas que pueden precipitarse normalmente y continuar encontrando alcalinidad no reaccionada después de la coagulación. Es evidente que otros factores que los que se consignan en las ecuaciones de reacción intervienen en ella.

El resultado de muchos estudios al respecto han demostrado que las reacciones que ocurren en la coagulación son complejas involucrando no solamente la unión directa de los iones coagulantes con las impurezas si no también la formación de óxidos complejos.

### 5.5. La turbiedad

La *turbiedad* en el agua es causada por la presencia de materia en suspensión tal como arcilla, partículas orgánicas, plankton y otros organismos microscópicos. La medida en continuo de la turbiedad indica, en todo momento el grado de contaminación física del agua que se envía a un abastecimiento público o se vierte a la salida de una instalación de tratamiento de aguas residuales. Sin embargo en muchos casos esta medida de turbiedad no es suficiente, existiendo casos en los cuales se debe conocer la cantidad global de cuerpos disueltos o la concentración de algunas sustancias determinadas.

Los equipos usados en la medición de la turbiedad están basados en fenómenos físicos de dispersión de luz.

El primer intento real de cuantificar la turbiedad data de 1900 cuando Whipple y Jackson desarrollaron una suspensión standard usando 100 ppm de tierra diatomacea en agua destilada. Esta fue por supuesto una medida muy subjetiva aunque bastante remarcable para estos tiempos. En conjunto con la escala de silica, este aparato llegó a ser conocido como el Turbidímetro de Vela de Jackson y fue medido en Unidades de turbiedad Jackson (JTU's). Un JTU es equivalente a 1 ppm de silica.

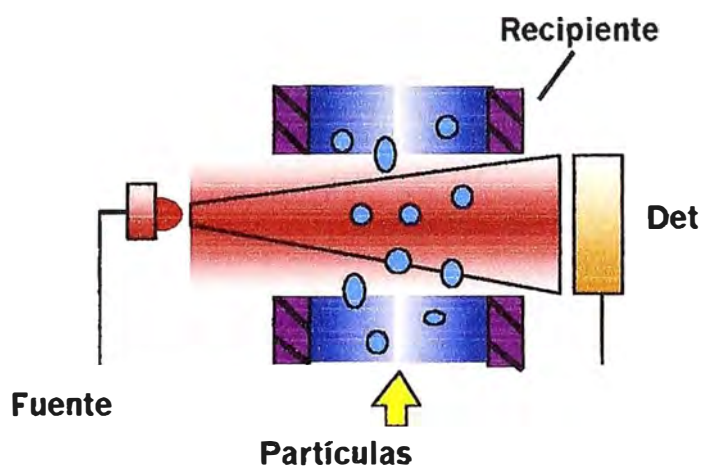
El descubrimiento de la formazina en 1926 por Kingsbury y Clark mejoro la consistencia en la formulación de standards para la medición de la turbiedad y una nueva unidad fue adoptada llamada Unidades de Formazina (FTU).

Sin embargo la solución para turbiedades pequeñas fue medir la luz dispersada en a un ángulo de detección de  $90^\circ$ , se había ingresado en lo que se conoce como las mediciones nefelométricas ( $1 \text{ NTU} = 2.5 \text{ JTU}$ ).

Los sensores de turbiedad se pueden describir además en tres tipos básicos: transmisivos, de dispersión y de ratio.

Cada una de las tres configuraciones tiene sus propias ventajas y desventajas. Para el diseño del ingeniero, cada uno representa una opción dependiendo del tipo y niveles de turbiedad a medir. Cada tipo también tiene sus propias características de salida. Las diferentes configuraciones incrementan el costo cuando los componentes eléctricos y mecánicos se incrementan. La selección de un sensor determinado se debe aceptar por lo mismo considerando la performance del equipo que se desea para alcanzar los mejores resultados. Todos estos tipos usan un fuente de luz visible, y asimismo ellos deben estar protegidos de la luz ambiental, fuentes de luz de bajo costo son utilizadas en estos equipos porque ellos ofrecen un costo y un comercio conveniente. Las fuentes infrarrojas también son usadas. Las fuentes de luz incandescente son preferibles porque ellos emiten diferentes amplitudes de onda de la fuente. Esto ayuda a reducir la sensibilidad del sensor de turbiedad ante las variaciones en el

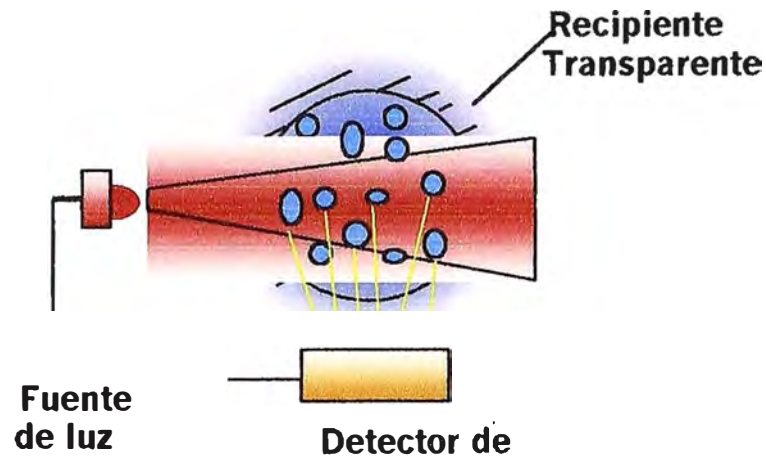
tamaño de la partícula. Los sensores de tipo transmisivo, figura 5.4, son de bajo costo, requiriendo solamente una fuente de luz y un detector. Este sensor es usualmente colocado de tal forma que atraviesa los lados de un tubo transparente mientras el medio bajo análisis fluye a través. La característica de la salida de esta configuración es una señal la cual decrementa monotónicamente con el incremento de la turbiedad.



*Fig.5.4.. Esquema de un sensor transmisivo.*

Los sensores de Dispersión, figura 5.5, son también conocidos por su bajo costo porque solamente requieren una fuente de luz y un detector. El sensor de dispersión difiere de los sensores transmisivos en el alineamiento de los componentes. Varios ángulos pueden ser usados para localizar el detector dependiendo de la sensibilidad deseada. Como el sensor transmisivo, este sensor puede ser usado para ver a través de los lados de un tubo transparente por el cual fluye el medio bajo análisis. Existen muchos factores críticos en el diseño de este sensor: intensidad de la fuente, sensibilidad del detector, camino óptico. La señal de salida característica de este sensor es una señal que se incrementa con el incremento de la turbiedad el cual demuestra una alta sensibilidad ante condiciones de turbiedad baja. La geometría es importante porque como la turbiedad del medio se incrementa, un punto

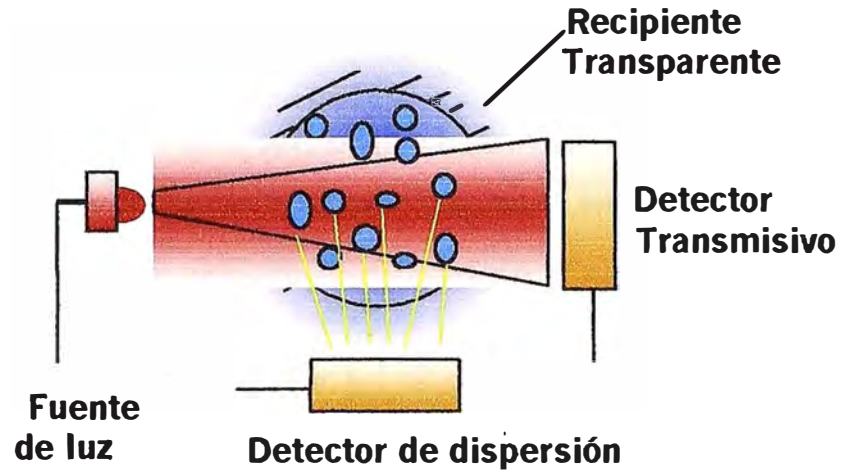
puede ser alcanzado donde el fenómeno de dispersión puede ser sustituido por la absorción del medio.



***Fig.5.5 Esquema de un sensor de dispersión***

El sensor de ratio , figura 5.6., muestra una mejor performance por medio de la combinación de una mejor baja sensibilidad característica de un sensor de turbiedad por dispersión y con la alta capacidad de un sensor transmisivo. El sensor de ratio también se beneficia de la medición de efectos comunes. El sensor de ratio ayuda a eliminar los efectos degradantes de la temperatura, intensidad de la fuente, y aberraciones menores al camino óptico debido al camino óptico. La salida característica de éste equipo es una señal monotónicamente incrementada por el incremento de la turbiedad.





*Figura 5.6. Esquema de un sensor de ratio.*

La medición de la *turbiedad* del agua se considera como el parámetro más importante para caracterizar el proceso. La medición de la turbiedad se logra mediante el uso de un turbidímetro convencional.

### 5.5.1. Coagulación de la turbiedad

Se presentan cuatro casos especiales:

#### 5.5.1.1. Alta turbiedad y alta alcalinidad

Es el sistema de más fácil tratamiento debido a que con esta agua muchos coagulantes son efectivos. Los polímeros catiónicos proveen una buena desestabilización y una concentración grande de partículas permite la fácil floculación en los aglomerados. Pueden ser también efectivos los polímeros aniónicos y iónicos, posiblemente a más bajo costo. Para tratar este tipo de agua se requiere materiales de alto peso molecular. Las sales de aluminio y hierro generalmente son efectivas. El sulfato de aluminio actúa mejor en una región del pH entre 6 y 7; las sales férricas en una región de pH entre 5 y 7. Cuando se emplean

estos coagulantes es posible que no necesiten ayudantes de coagulación o adición de alcalinizantes para controlar el pH.

#### **5.5.1.2. Alta turbiedad y baja alcalinidad.**

Aquí los polímeros funcionan como en el caso anterior. También son efectivas las sales de hierro y aluminio, pero se debe controlar cuidadosamente el pH durante la prueba. La coagulación se efectúa con mayor eficiencia en los mismos rangos de pH de las aguas del caso anterior. Puede ser necesaria la adición de alcalinizantes para prevenir que baje el pH por debajo de los niveles óptimos requeridos para la formación de los polímeros de aluminio y hierro.

#### **5.5.1.3. Baja turbiedad y alta alcalinidad.**

En este tipo de aguas los polímeros no pueden trabajar solos. Usualmente se deben adicionar partículas antes del polímero. Se requieren altas dosis de coagulantes para producir la precipitación del  $\text{Al}(\text{OH})_3(s)$  o el  $\text{Fe}(\text{OH})_3(s)$ . Los precipitados gelatinosos pueden ser ligeramente estables. Se puede reducir la dosis de alúmina si se adiciona arcillas o sílice activadas, produciendo un floc más pesado. De igual manera se puede lograr este efecto adicionando polímeros aniónicos.

#### **5.5.1.4. Baja turbiedad y baja alcalinidad.**

Estas aguas son las más difíciles de coagular, debido a la baja turbiedad los polímeros no trabajan solos. Como en el caso anterior, para aumentar la turbiedad se pueden adicionar arcillas. Las sales de aluminio y hierro generalmente son inefectivas si se usan solas, debido a que el pH puede bajar a niveles más bajos que el rango de precipitación de el  $\text{Al}(\text{OH})_3(s)$  y  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  para que se produzca floculación. Similarmente, la floculación es demasiado baja para

permitir la agregación si se forman los polímeros metálicos para alcanzar la carga de neutralización.

### **5.5.2. Coagulación del color y la turbiedad**

El color en el agua se debe en principio a la presencia de materia orgánica natural, especialmente de los ácidos húmicos y fúlvicos. Los ácidos húmicos son los componentes solubles en bases fuertes, pero insolubles en ácidos fuertes; los ácidos fúlvicos son solubles en ácidos y bases. Los primeros se pueden agregar naturalmente en partículas coloidales con los pesos moleculares más altos aparentemente, los segundos tienen pesos moleculares más bajos. Debido a la presencia de los grupos carboxílicos y fenólicos, las sustancias húmicas tienen una alta capacidad de intercambio catiónico y pueden concentrar o enlazar iones metálicos.

Debido a sus características orgánicas ellos pueden acumular compuestos orgánicos hidrofóbicos, incluyendo algunos pesticidas. Varios autores muestran buena remoción del color con las sales de aluminio y férricas, especialmente a valores de pH cerca de 5 para el aluminio, y 4 para el sulfato férrico. Ha sido demostrada una estequiometría definida entre la concentración del color y de la dosis de coagulante.

También los polímeros catiónicos se han usado con mucho éxito para remover el color. Puede obtenerse una buena remoción tratando un agua que contiene 160 unidades de color con 60 mg/l de polímero catiónico a un pH cerca a 5. Los valores de pH más altos y bajos permiten remociones menos eficientes. En la mayoría de los casos, los polímeros catiónicos parecen actuar del mismo modo que el aluminio. Un polímero es necesario para precipitar las sustancias húmicas cargadas negativamente.

El color y la turbiedad reaccionan de manera diferente en la coagulación por lo que resulta difícil el tratamiento de agua que contiene concentraciones objetables de ambos. Cuando hay suficiente cantidad de arcilla para absorber todas las sustancias húmicas del agua, la presencia de

los materiales orgánicos absorbidos incrementa la dosis de polímero para remover la turbiedad. Cuando existe un exceso de ácidos húmicos la turbiedad es cubierta con compuestos orgánicos y los ácidos húmicos y fúlvicos permanecen en solución. El polímero reacciona primero con los compuestos orgánicos solubles para formar precipitaciones coloidales. Después se completa con el polímero adicional que reacciona con la turbiedad y las partículas orgánicas coloidales. Las dosis de polímero adicional que reacciona con la turbiedad y las partículas orgánicas coloidales son más altas que las necesidades para remover sólo turbiedad. En otras palabras, las dosis de coagulantes son mayores para tratar aguas con solo el color o la turbiedad.

Entre las variables que influyen en la remoción de color y/o turbiedad, podemos citar: los diferentes tipos y origen del color y turbiedad y los tipos de dosis de ayudantes de coagulación.

Estos factores pueden ser determinados con mucha exactitud a nivel de laboratorio, pudiendo analizarse las siguientes variables químicas:

- a) Selección de coagulante más apropiado.
- b) Determinación de la influencia de pH en la coagulación.
- c) Determinación de la influencia de pH en la coagulación.
- d) Evaluación de la eficiencia de los ayudantes de coagulación y floculación.
- e) Determinación conjunta de dosis y pH óptimos.
- f) Forma y secuencia de aplicación de las sustancias químicas.
- g) Determinación de la influencia que la concentración de los coagulantes tiene en la coagulación.

Estos factores son función del tipo de problema existente en el agua, por lo cual la revisión indicada a continuación puede servir para ayudar a decidir que investigar en los ensayos mediante las pruebas de jarras y cómo interpretar algunos de los datos obtenidos.

## 5.6. El efecto del pH

Desde tiempos atrás es conocido que la efectividad de la coagulación tiene dependencia directa del pH, debido a ello la medición de este parámetro antes y después de la floculación tiene importancia básica; por lo cual debe disponerse de un medidor de pH de preferencia potenciométrico, como alternativa podría usarse uno colorimétrico.

El pH es un indicador de la concentración de los iones hidrógeno en solución

$$\text{pH}=\log_{10}[\text{H}^+]$$

y debería ser leído con una sensibilidad de 0.01 unidades en el medidor de pH con electrodos de vidrio y para referencia de calomel, que dispone de un compensador de temperatura. Este medidor debe ser calibrado con una solución amortiguadora fresca cuyo pH está en el rango de operación deseada, más adelante se detallará este método. En general, para medición a aguas naturales y tratadas en plantas de potabilización se requiere una precisión de 0.05 unidades.

Investigadores han reportado que la cantidad mínima de aluminio residual ocurre en el agua investigada aproximadamente a un pH 6.3 , mientras que el mínimo de hierro residual en otra agua se encontró a un valor menor de pH alrededor de 5.4 . Ellos también demostraron que existen márgenes de pH en los que el hierro precipita.

Petersen y Barthow\*, han demostrado que el intervalo de pH para la formación óptima de flóculo se amplía considerablemente por la presencia de ciertos iones comúnmente encontrados en aguas naturales. En general, los iones de mayor valencia, tales como los sulfatos, se ha encontrado que ejercen una influencia mayor a este respecto que los iones de valencia menor como los cloruros.

\* *Petersen, B.H. Barthow: Effects of Salts on the Rate of Coagulation and Optimun Precipitation of Alum Floc. Ind.Eng.Chem, (1928).*

### **5.7. El efecto de la Temperatura**

A mayor temperatura, mayor será el movimiento de los coloides, y mayor la posibilidad de que las partículas choquen unas con otras. Se recomienda que la coagulación se realice siempre por encima de los 4 °C.

### **5.8. La cloración como ayuda de la coagulación**

Aun, cuando el cloro no es un coagulante en el sentido estricto de la palabra, se emplea frecuentemente para ayudar en la coagulación acondicionando el agua al remover o destruir materiales que inhiben la formación de flóculos. Este pretratamiento se emplea frecuentemente en aguas contaminadas con compuestos orgánicos, tales como aguas de pantano fuertemente coloridas y también con las contaminadas por residuos sanitarios o industriales.

### **5.9. Elementos principales de los sistemas de dosificación de líquidos**

Los sistemas de dosificación de reactivos químicos en estado líquido se basan en configuraciones diversas de bombas dosificadoras (Metering Pumps), tanques, accesorios, etc. En éste apartado se brinda una teoría moderna sobre los elementos de uso frecuente en sistemas de dosificación y accesorios a usarse en la mejora del sistema de dosificación a implementar.

#### **5.9.1. Bomba dosificadora reciprocante**

Una bomba dosificadora es un mecanismo reciprocante de desplazamiento *positivo que ofrece una precisión de distribución en estado estacionario y una capacidad de ajuste dinámico.*



*Fig. 5.7 Bomba dosificadora reciprocante*

En sus varias configuraciones, son capaces de manipular fluidos desde el rango de los lodos abrasivos hasta fluidos altamente corrosivos y de generar altas presiones de descarga para las aplicaciones de inyección.

Las bombas dosificadoras contribuyen a la eficiencia de muchos procesos por medio de la inyección automática de un volumen predeterminado de fluido durante un periodo específico de tiempo. Están diseñados para alcanzar precisiones extremas (es típico  $\pm 1$  por ciento del *setpoint*) y pueden ser ajustadas manualmente o automáticamente mientras se encuentran en operación, para poder variar el flujo.

Las aplicaciones típicas de las bombas reciprocantes son:

***Carga de glicoles.*** El etilenglicol o el trietilenglicol se bombea a un absorvedor a unas 1000 psig para eliminar la humedad del gas natural. El glicol absorbe el agua, se lo estrangula a presión atmosférica y se lo calienta para eliminar agua. Después, se enfría y se devuelve con la bomba al absorbedor.

***Carga de aminas.*** La monoetanolamina, otras aminas y los absorbentes patentados eliminan el sulfuro de hidrógeno y el dióxido de carbono del gas

natural. Se bombea el absorbente hacia un absorbedor a unas 1 000 psig y produce una acción similar a la de los glicoles.

***Petróleo pobre.*** El aceite para absorción se utiliza igual que los glicoles y aminas pero absorbe los hidrocarburos como butano, propano y etano del gas natural.

**Inyección de aguas salada.** Un método que se utiliza mucho para la recuperación secundaria de petróleo y gas en los campos casi agotados, es inundar los yacimientos con agua, por lo general, agua salada en pozos periféricos para obligar a los hidrocarburos a moverse hacia el pozo central.

***Eliminación de agua salada,*** Se suelen utilizar bombas de potencia para bombear el agua salada a un pozo para eliminarla.

***Evitadores de reventones hidráulicos.*** Siempre están listos durante la perforación de pozos de petróleo y gas para cerrar el pozo si se inicia el llamado reventón. La potencia hidráulica se aplica con bombas reciprocantes, con motor eléctrico o neumático. La presión normal de funcionamiento es entre 1 000 y 3 000 psig.

***Sistemas de oleoductos y gaseoductos.*** Se utilizan bombas de potencia para inyectar amoniaco o hidrocarburos ligeros en estas tuberías. Se envían diversas pastas aguadas y petróleo crudo en las tuberías con bombas de potencia de pistón y émbolo.

***Sistemas hidráulicos.*** Se utiliza un líquido hidráulico, como aceite soluble y agua en laminadores de acero y petróleo diáfano (kerosene) y aceite en las laminadores de aluminio, para colocar los rodillos de las laminadores y emplean cilindros hidráulicos para mover el metal que se lamina. Estos sistemas de cargas con bombas de potencia con motor a una presión entre 1 000 y 5 000 psig.

***Pruebas hidrostática.*** Se utilizan bombas de potencia y de acción directa para las pruebas hidrostática de equipos y sistemas.

***Pastas aguadas,*** Se emplean bombas de potencia y de acción directa para manejar pastas aguadas como mantequilla de cacahuete, detergentes,



plásticos, carbón y minerales pulverizados en procesos y tuberías. Las presiones pueden llegar hasta unas 10 000 psig y las temperaturas a unos 700 °F.

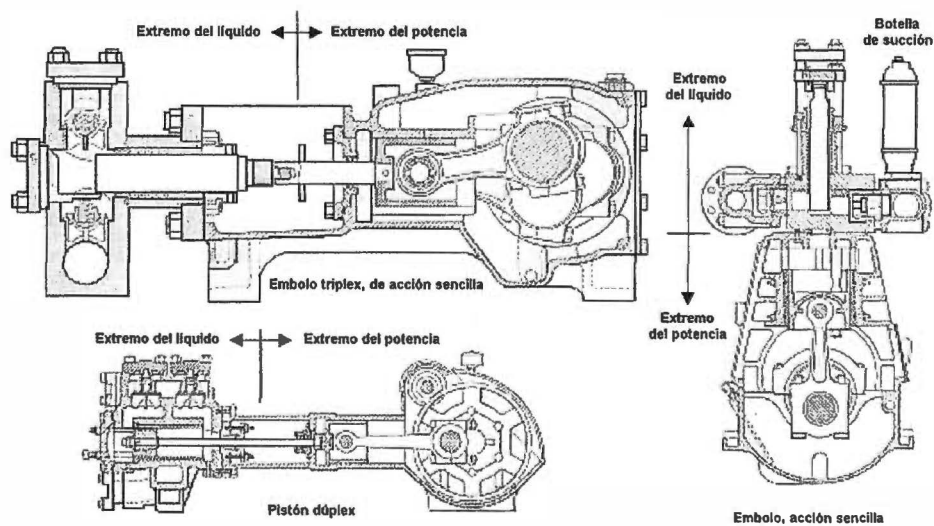
Toda bomba dosificadora emplea tres mecanismos básicos:

*Un mecanismo de manejo (drive mechanism)* - Es un arreglo mecánico o hidráulico que permite ajustar la capacidad durante la operación.

*Un desplazador primario (Prime mover)* - Es un motor de velocidad variable o constante o un cilindro neumático.

*Una cámara de desplazamiento o extremo del líquido (liquid end)* - Es la parte de la bomba en la que se efectúa el bombeo.

Muchas veces el mecanismo de manejo y el desplazador primario se identifican como *extremo de potencia, o power end* .(figura 5.8).



**Fig.5.8. Las bombas de potencia tienen motor eléctrico para el propulsor y pueden ser horizontales o verticales.**

### 5.9.1.1. El mecanismo de manejo

La operación de la bomba dosificadora depende de la acción de un pistón o de la flexión de un diafragma el cual cada vez desplaza directamente el fluido de proceso.

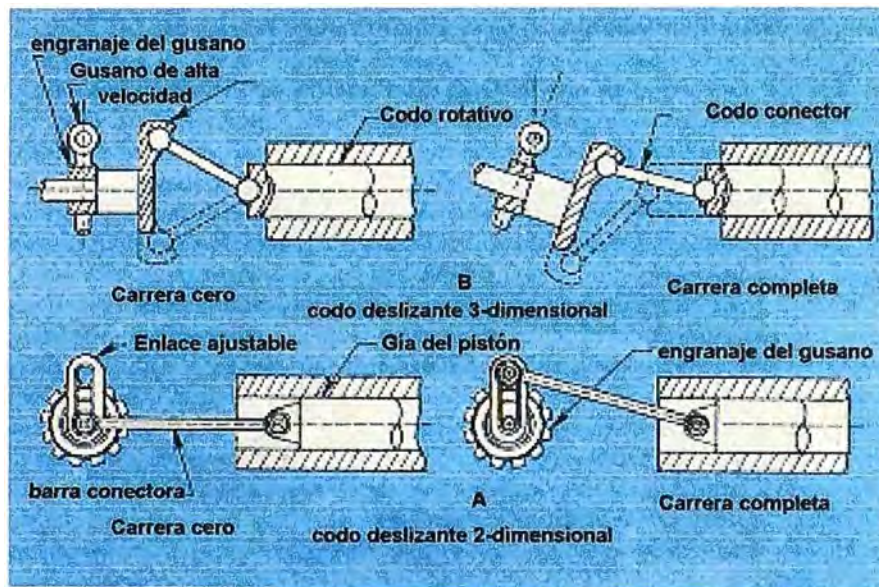
La capacidad de una bomba dosificadora es una función del área cross-seccional del pistón, la longitud efectiva de la carrera del pistón y de la velocidad del pistón. Debido a que el área es constante para una bomba prescrita, la longitud de la carrera y la velocidad del pistón son las únicas variables disponibles para ajustar la capacidad de salida mientras la bomba esta en operación. Los ajustes de velocidad y/o longitud de la carrera pueden ser efectuados directamente o automáticamente, en concordancia con la demanda del proceso, para variar el volumen del líquido dosificado.

Existen dos clasificaciones principales para los ajustes de la carrera del pistón. Uno varía el radio de excentricidad del mecanismo conductor del pistón, el cual esta algunas veces referido como la amplitud de modulación. El segundo método, llamado *movimiento perdido*, el cual varía la porción de viaje del codo fijo que es transmitido para lograr el desplazamiento efectivo del pistón.

### 5.9.1.2. Amplitud de modulación

El mecanismo del codo deslizante mostrado en la figura 5.9 (A) es el más moderno diseño de manejo. Consta de un ajuste de tipo articulación que permite alterar la carrera del pistón por medio del cambio en el largo del brazo pivot. Aunque muchas variantes de éste manejador han evolucionado, tal como el tri-dimensional o codo polar presentado en la figura 5.9 (B), todos comparten el mismo principio de operación básico y de empalme al pistón. Este

manejador es generalmente utilizado en las bombas de más alta capacidad que operan a mayores presiones.



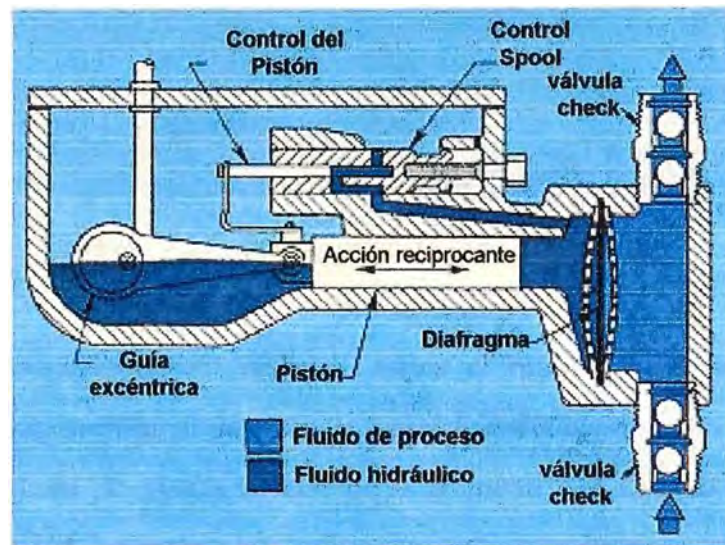
*Figura 5.9.- Ejemplos de mecanismos de codos deslizantes*

### 5.9.1.3. Manejadores de pérdida de movimiento

Para menores aplicaciones y demandas un método alternativo fué desarrollado para transferir el poder a los elementos de bombeo con igual precisión. Este método emplea el principio de pérdida de movimiento. Como el nombre sugiere, los manejadores de movimiento perdido proveen un método de alterar la carrera del pistón mediante la no utilización del empuje disponible de manejo sobre un ciclo completo de bombeo. Los manejadores de movimiento perdido incluyen los tipos hidráulicos y mecánicos.

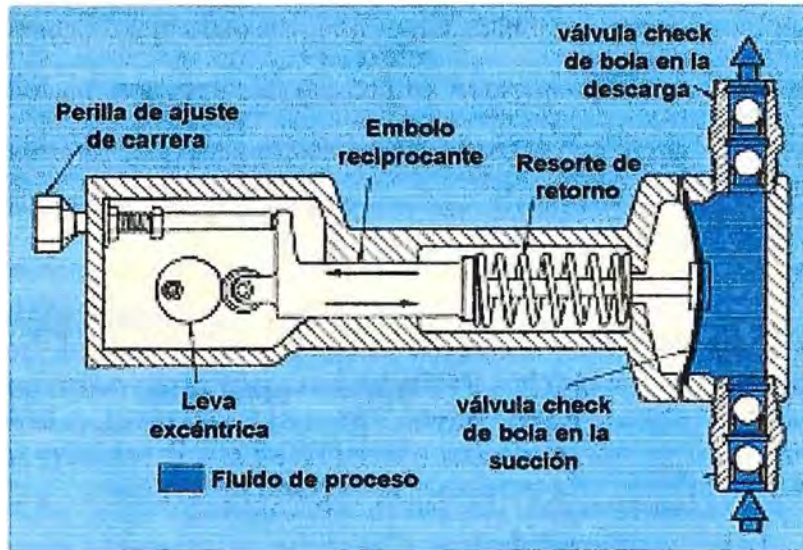
El movimiento perdido hidráulico (Figura 5.10) vincula un cambio y mejora la efectividad de la longitud de carrera. Aunque el pistón continua para reciprocarse el total de la longitud de la carrera en todo momento, algo del fluido hidráulico disponible para deflectar el diafragma escapa a través de una válvula de by-pass y regresa al reservorio de fluido hidráulico o a un sumidero. La válvula de by-pass

puede ser regulada externamente mientras la bomba está en operación. Aunque el mecanismo del manejador de movimiento perdido generalmente es menos costoso que el más complejo codo deslizador, este no debe ser especificado para capacidades en exceso de 100 gph, para evitar golpes hidráulicos excesivos.



*Fig. 5.10. Manejador hidráulico de movimiento perdido*

Una ventaja significativa de este manejador es que el diafragma está balanceado hidráulicamente, mejorando su duración a la fatiga y su capacidad de generar presión. El movimiento perdido mecánico difiere en principio; el diafragma está unido mecánicamente al pistón o al mecanismo deflectante. El mecanismo es conducido hacia adelante por medio de una leva, causando la deflexión del diafragma en una cantidad predeterminada. El flujo se varía limitando el retorno del mecanismo (Figura 5.11).



*Fig. 5.11. Manipulador de leva excéntrica*

Generalmente, un resorte causa el retorno del mecanismo a su posición original después de cada ciclo del eje de la leva. Si se permite regresar al pistón solamente a la mitad del camino de la posición original, la carrera y la deflexión será decrementada en un 50%.

Los diafragmas actuados mecánicamente no son usados para generar presiones por sobre los 250 psi, o en aplicaciones donde los requerimientos de capacidad exceden los 25 gph . Las aplicaciones típicas incluyen sistemas de tratamiento de aguas para torres de enfriamiento, calderos, plantas de tratamiento de aguas servidas y también en aplicaciones de laboratorio.

#### **5.9.1.4. El manipulador primario**

El más comúnmente usado para conducir la bomba dosificadora, es un motor de velocidad constante y corriente alterna; el tipo de motor es normalmente especificado por el comprador y dimensionado por el proveedor para alcanzar las máximas condiciones de operación.

Los manipuladores neumáticos usan un cilindro neumático recíprocante para proveer el empuje diferencial necesario entre la fuerza y la presión



generada. La presión al pistón del cilindro a menudo se provee por medio de una válvula de cuatro vías que alternativamente admite presión por los lados opuestos del pistón del cilindro. La actuación de la válvula de cuatro vías puede ser acompañadas por una válvula solenoide que cambia la dirección de ingreso de la presión que mueve el cilindro del pistón. Los manejadores neumáticos facilitan el control digital debido a los pulsos eléctricos ON - OFF a la válvula solenoide .

#### **5.9.1.5. Configuraciones del extremo del líquido**

Las bombas dosificadoras reciprocantes comúnmente utilizan dos tipos de elementos finales: pistones empacados y diafragmas. Los extremos de líquido, incluyen todas las piezas que contienen o están en contacto en alguna forma con el líquido que se bombea.

En una bomba con diafragma de accionamiento mecánico, el extremo de líquido incluye el diafragma, válvulas de retención de succión y descarga y extremo de líquido.

En una bomba con diafragma de accionamiento hidráulico, el extremo de líquido incluye uno o más diafragmas, la cámara de desplazamiento del diafragma, válvulas de retención de succión y descarga, el extremo de líquido y, a veces, un líquido intermedio.

#### **5.9.1.6. Cámara de desplazamiento con diafragma**

Las bombas dosificadoras de diafragma proveen una solución efectiva al problema de las rajaduras asociadas con las bombas de pistones y por eso se fabrican para manipular líquidos corrosivos. El pistón corre a través de un cilindro, pero en lugar de desplazar directamente el fluido de proceso, el pistón actúa sobre un diafragma que cumple la función de una interfase entre el pistón y el fluido de proceso. En el lado opuesto del diafragma, una cantidad proporcional de fluido de proceso

es impulsado dentro de la cámara de desplazamiento positivo y es descargado con cada ciclo del pistón.

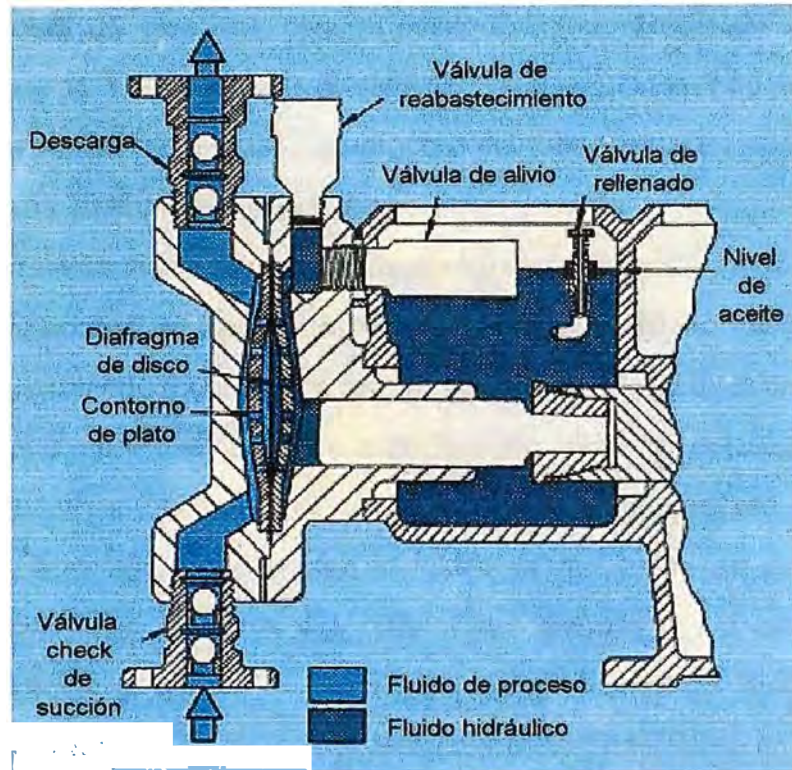
Los diafragmas actúan mecánicamente (acoplado directamente al pistón) o hidráulicamente . Como se mencionó previamente , el diafragma actuado hidráulicamente es inherentemente más adecuado para aplicaciones continuas debido a que el diafragma es balanceado entre dos fluidos, de esta forma se elimina los problemas de fatiga del diafragma y permite presiones más altas de descarga.

Los diafragmas actuados hidráulicamente mantienen la precisión así como el volumen propio del fluido hidráulico que se mantiene en la cámara hidráulica. Un sistema de tres válvulas se usa en conjunción con los manejadores moduladores de amplitud para asegurar que el fluido hidráulico este relativamente libre de aire o gases atrapados , y así proteger contra la sobrepresión al fluido hidráulico y al de proceso.

Las válvulas check localizadas en la succión y la descarga de la bomba admiten y expelen el fluido de proceso en respuesta a la presión negativa y positiva ejercida por la flexión del diafragma. Las válvulas de check doble a menudo son utilizadas para incrementar la precisión de la bomba y proveer una acción de sellado redundante.

#### **5.9.1.7. Tipos de diafragma de disco**

Los diafragmas de disco son hechos generalmente de TFE (Tetrafluoroetileno), y se flexiona entre dos soportes en forma de discos (contorno). Los platos de contorno proveen contención al diafragma y previenen de la ruptura bajo altas presiones (figura 5.12). Este diseño resuelve el problema de la rajadura por el fluido en los sellos de los pistones, y es muy efectivo para fluidos corrosivos tales como ácidos. Las bombas dosificadoras de diafragma principalmente son usadas para manipular líquidos en aplicaciones donde cualquier mínima fractura no es aceptable a presiones de descargas de 4 000 psi.



**Fig. 5.12. Bomba con diafragma de disco con accionamiento Hidráulico.**

El diseño del disco del diafragma puede causar problemas cuando se manipulan fluidos viscosos y lodos. Los fluidos viscosos causan una notable caída de presión a través de los pequeños huecos alrededor del contorno de los platos, a menudo causan cavitación en la succión. La formación resultante de burbujas de gas en el fluido usualmente reduce la precisión de la bomba en niveles aceptables. También, particularmente la materia puede depositarse fuera de los lodos y llegar a solidificarse entre el diafragma y el contorno del plato.

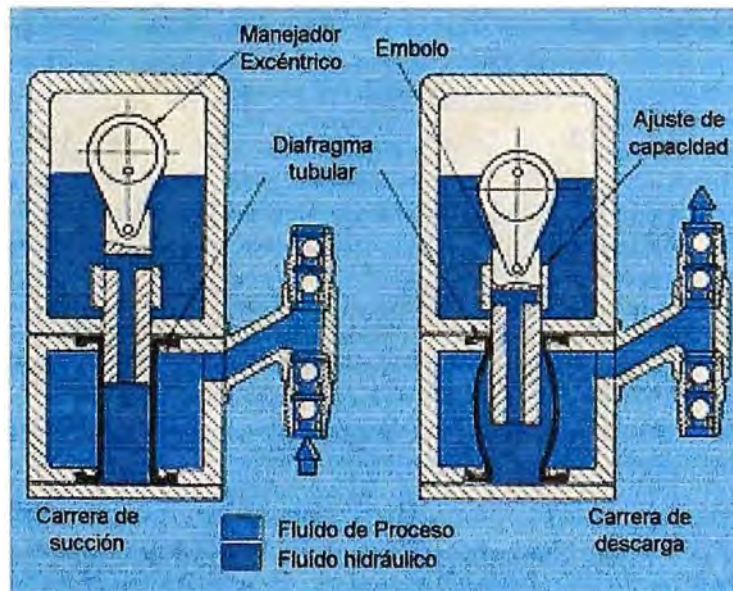
#### **5.9.1.8. Tipos de diafragmas tubulares**

En el diseño de diafragma tubular, un pistón reciproca de la manera como se ha descrito previamente, pero un diafragma elastomérico de la forma de un tubo se expande o se contrae con la presión proporcionada por un fluido hidráulico. La constricción o expansión del tubo,



combinado con la acción en un sentido de la succión y las válvulas check de descarga, crea un pulso de líquido dosificado a través de la bomba. Los problemas de cavitación son reducidos si no existe plato de contorno sobre el lado de proceso del tubo y las presiones de descarga para 3000 psi pueden ser generados.

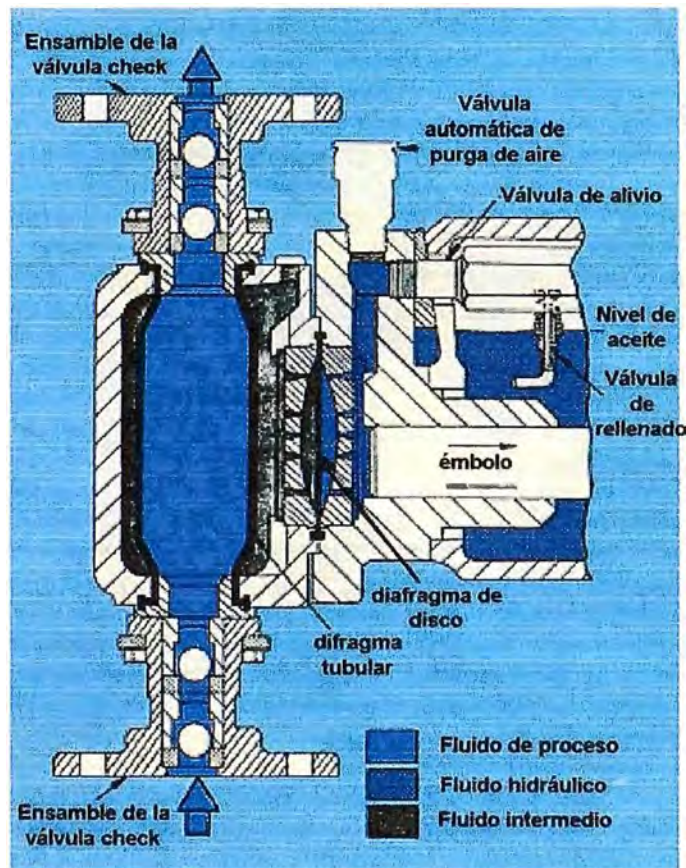
En la configuración de diafragma tubular (Figura 5.13) el pistón actúa hasta que el líquido hidráulico se ha localizado dentro del tubo elastomérico. Durante la carrera de succión, un vacío se crea dentro del tubo cuando el pistón es retirado. Esto causa la contracción del tubo, arrastrando una cantidad predecible de fluido de proceso a través de la válvula check de succión y dentro de la cámara de desplazamiento localizada alrededor del exterior del diafragma. Lo opuesto ocurre durante la carrera de descarga; la presurización del fluido hidráulico dentro del tubo causa la expansión y el desplazamiento en una cantidad proporcional del fluido de proceso a través de la válvula de descarga.



**fig. 5.13. liquid end de diafragma tubular simple**

Otras variaciones de diafragma tubular incluyen el de doble tubo, y la combinación disco/tubo (Fig. 5.14.) En aquellas bombas de diafragma

doble, el pistón imparte la presión hidráulica para flexionar un diafragma primario, el cual luego flexiona un diafragma secundario vía un líquido intermediario. El diafragma secundario (tubo) manipula el fluido de proceso mientras que lo aísla enteramente de la cabeza de la bomba, imposibilitando la corrosión debida al fluido de proceso. Tales bombas son ideales par usarse en dosificar líquidos viscosos y lodos abrasivos, y no es propenso a la acumulación de lodos.



*Fig. 5.14. diafragma disco- tubular*

Las bombas de diafragma doble, adicionalmente ofrecen la seguridad de un diafragma de apoyo, lo que asegura el sistema ante una falla del diafragma de proceso, y usualmente emplea un fluido hidráulico inerte entre los diafragmas. Esta última característica es muy útil cuando se manipulan productos que pueden reaccionar violentamente con los aceites hidráulicos,

o cuando la contaminación del químico de proceso debe prevenirse en el caso de una falla del diafragma secundario. La cámara intermedia entre los dos diafragmas algunas veces esta equipada con una vista de vidrio para permitir el monitoreo. Si la cámara se llena con un líquido que colorea a un pH conocido, el cambio de color advierte de una falla en el diafragma. Electrodo también pueden ser instalados dentro de la cámara intermedia para monitorear la conductividad de el fluido intermedio. Un cambio en la conductividad puede ser detectado por los electrodos y proveer de una alarma en caso de falla del diafragma.

La Tabla 5.2. provee una lista de la especificaciones típicas de una bomba dosificadora.

**TABLA 5.2. Especificaciones típicas para bombas dosificadoras.**

<b>TIPO DE BOMBA</b>	<b>PRES. MAX. (psig)</b>	<b>CAPACIDAD MAXIMA (gph)</b>	<b>MATERIALES DISPONIBLES DE CONSTRUCCION EXTREMO DEL DIAFRAGMA</b>	<b>DIAFRAGMA</b>
Pistón	7500	1500	A-K, Q	----
Diafragma de disco mecánica-mente actuado	150	60	H hasta Y	M-P
Diafragma de disco hidráulica-mente actuado	4000	750	A hasta L	N
Diafragma tubular	4000	300	A hasta K	M, O, P.
Diafragma disco/tubular	1000	750	A hasta J	M, O, P.
Diafragma tubular doble	300	250	A hasta K	M, O, P.
Diafragma de doble disco	4000	600	A hasta K	N, O, P.

Los fabricantes individuales pueden ofrecer diseños especiales que exceden la presión y capacidad de los valores mostrados, también como pueden disponer de otros materiales.

**Lista de materiales**

- A. Acero al carbono.
- B. Acero gris.
- C. Acero dúctil.
- D. 304 SS.
- E. 316 SS.
- F. Tipo 20 S.
- G. Aleaciones basadas en níquel A, B y C.
- H. PVC.
- Y. Polietileno.
- J. Polipropileno.
- K. Acrílico.
- L. Fluoruro de Polivinilideno.
- M. Hidrocarbón fluorado - VITON.
- N. Tetrafluoroetileno - TEFLON.
- O. Terpolímero propylene etileno- EPDM.
- P. Polietileno clorosulfonado - CSM.
- Q. Cerámica.

**5.9.1.9. Mecanismos para ajuste de carrera**

Para variar la capacidad de las bombas dosificadoras, se cambia la longitud de la carrera del pistón. El mecanismo para ajuste puede ser:

- a) Una manivela ajustable,
- b) Un mecanismo de juego muerto o movimiento perdido, o
- c) Una derivación hidráulica

El flujo producido por cualquiera de estos mecanismos de ajuste de carrera es semejante a una media onda senoidal con plena carrera, para succión y descarga.

Con el mecanismo de manivela ajustable, el flujo tiene modulación de amplitud; esto minimiza las aceleraciones y deceleraciones máximas. Esto

ocurre tanto en los mecanismos de la bomba y el líquido y suele ser la justificación para escoger este diseño de bombas de 1 hp o mayores. En bombas más pequeñas, se puede utilizar un mecanismo de juego muerto o una derivación hidráulica porque las masas son menores.

Las pérdidas de presión relacionadas con la aceleración del líquido en la tubería de succión pueden tener un marcado efecto en el funcionamiento de la bomba para que pueda alcanzar su capacidad. Durante la deceleración ocurren aumentos en la presión.

Con un ajuste de 100% de la carrera, la aceleración y velocidad máximas están desplazadas  $90^\circ$  entre sí, lo cual va en relación con la rotación del cigueñal. Para poder encontrar cuál es la energía necesaria para que el líquido llegue a la bomba es necesario encontrar la aceleración,  $\alpha$ , y la velocidad,  $V$ , del líquido durante la carrera de succión y relacionarla en vectores de componentes para producir la máxima pérdida de carga dinámica.

El movimiento del líquido en el sistema de tubería está en relación con el movimiento del pistón y éste se relaciona con la rotación del cigueñal, como sigue :

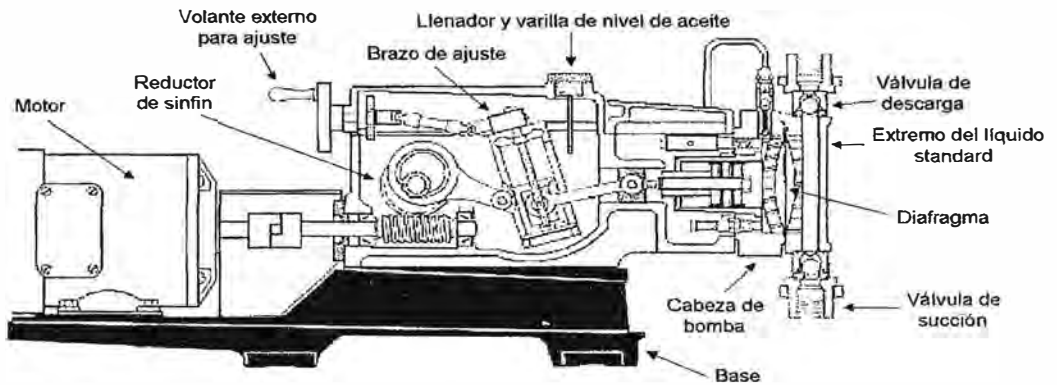
$$V = (\text{velocidad del pistón}) (A/A_p) \quad (2)$$

$$\alpha = (\text{aceleración del pistón}) (A/A_p) \quad (3)$$

en donde  $V$  = velocidad del líquido , ft/s y  $\alpha$  = aceleración del líquido, ft/s<sup>2</sup>, si no se tienen en cuenta la deformación y la compresibilidad.

El movimiento del muñón es una armónica simple pero el movimiento del pasador de pistón es una armónica deformada en la escala de tiempo debido a la cambiante distancia axial entre ellos. Puede ocurrir deformación adicional según sea el método utilizado para ajustar la longitud de la carrera. Por ejemplo, el ajuste del cigueñal hace que la rotación del ciclo de descarga ocurra a unos  $10^\circ$  de la carrera de succión. Esto reduce la aceleración durante la parte de admisión de la carrera y reduce la parte de

descarga de la carrera, en la cual hay más presión disponible para acelerar el líquido. Si se invierte la rotación del motor, se invierten esas reducciones.



**Fig. 5.15. La bomba de diafragma con acoplamiento hidráulico tiene acción simplex.**

La velocidad axial, ft/s , del muñón (fig 2.16) es :

$$\frac{0.5 / 2\pi\eta \text{ sen}\theta}{12 \times 60} = \frac{l \text{ sen}\theta}{229} \quad (4)$$

La aceleración axial, ft/s<sup>2</sup> del mismo muñón es :

$$\frac{0.5l}{12} \left( \frac{2\pi\eta}{60} \right)^2 \cos\theta = \left( \frac{l \eta^2}{2189} \right) \cos\theta \quad (5)$$

La velocidad axial aproximada, ft/s del pasador de pistón (Fig 2.16) es :

$$\frac{0.5l}{12} \left[ \text{sen}\theta + \left( \frac{0.5l}{2R} \right) \text{sen}2\theta \right] \left( \frac{2\pi\eta}{60} \right) \quad (6)$$

Con  $\theta = 77^\circ$  , la velocidad es máxima o sea :

$$\frac{\ln}{229} \sqrt{1 + \left(\frac{l}{2R}\right)^2} \quad (7)$$

La aceleración axial aproximada, ft/s<sup>2</sup> del pasador de pistón es :

$$\frac{0.5l}{12} \left[ \cos \theta + \left(\frac{0.5l}{R}\right) \cos 2\theta \right] \left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2 \quad (8)$$

Con  $\theta = 0^\circ$ , la aceleración es máxima o sea :

$$\frac{\ln^2}{2189} \left(1 + \frac{l}{2R}\right) \quad (9)$$

Estas ecuaciones están trazadas en la figura 2.16, para una bomba que funcione a 100 rpm con una longitud  $l$  de carrera de 3 in y una longitud  $R$  de la biela de 6 in.

Los datos de la figura 2.16 son importantes para el diseñador y el usuario de bombas porque la velocidad y la aceleración del pistón también se aplican al líquido que se bombea, como se indica en las ecuaciones (2) y (3) . Cuando la aceleración, la velocidad o ambas se vuelven excesivas, el líquido vaporizará o se desprenderán algunos gases disueltos y la bomba no se llenará en la carrera de succión. Con diafragma de accionamiento hidráulico, el líquido que se vaporice puede ser el que se bombea o el aceite hidráulico.

Aunque las velocidades del muñón y del pasador de pistón (fig 2.16) difieren solo en 3%, la diferencia en aceleración es del 25% . En este ejemplo se utilizó un cigueñal simplificado, sin mecanismo de control de carrera pues éste aumentaría más la diferencia entre las aceleraciones.

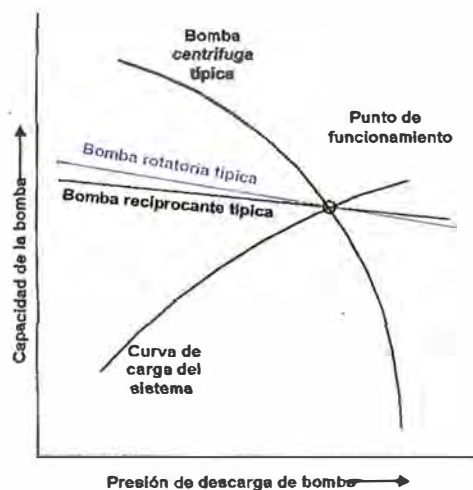
### 5.9.1.10. Rigidez

El flujo promedio debe permanecer constante cuando cambia la presión en el sistema. varía la capacidad de las bombas centrífugas, rotatorias y reciprocantes típicas en contra de una curva dada de carga del sistema, habrá un cambio en la capacidad de la bomba. Por ejemplo, una bomba para 10 gpm que puede descargar a 100 psi, podría tener los siguientes cambios en la capacidad con un cambio de 10 psi en la presión de descarga:

**TABLA 5.3**

Tipo de bomba	Cantidad de cambio
Reciprocante	0.01 gpm con 10 psi
Rotatoria	03 gpm con 10 psi
Centrífuga	3 gpm con 10 psi

Estos datos indican que la bomba reciprocante es la más rígida, es decir tiene mínima susceptibilidad a los cambios en la capacidad cuando varía la presión de descarga. La razón principal es que la fuga por las válvulas de retención y sellos de émbolos en las bombas reciprocantes es más o menos baja.



**Fig.5.16. Sensibilidad a los cambios en la capacidad en diferentes tipos de bombas**



#### 5.9.1.11. Exactitud

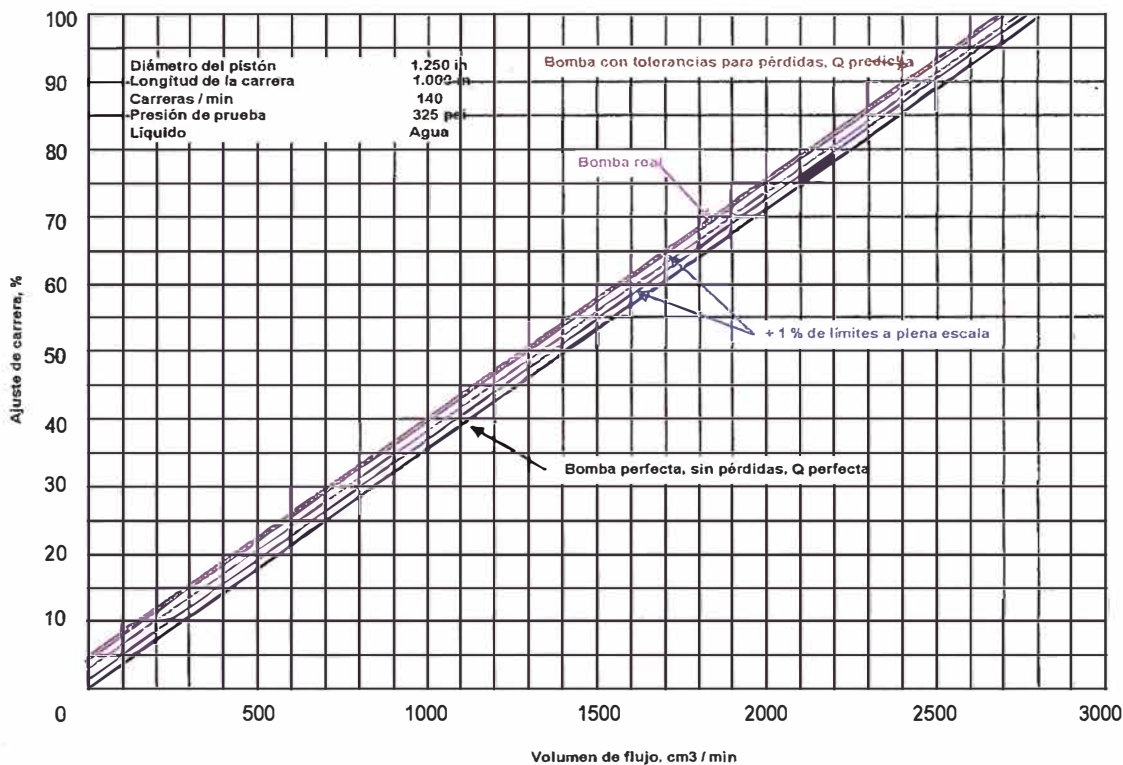
Es una razón para seleccionar una bomba dosificadora de diafragma es la facilidad con la cual se puede ajustar la capacidad con exactitud para las condiciones requeridas, como se indica en la figura 2.18. Se verá que la curva característica no pasa por cero.

La relación de reducción, linealidad, exactitud en estado estable y repetibilidad del flujo son lo que constituye la exactitud total de la bomba. Ahora se definirán éstos términos.

*Relación de reducción.*, es la capacidad nominal dividida entre la capacidad mínima que se puede obtener mientras se mantienen las especificaciones de *repetibilidad de flujo*, exactitud en estado estable y linealidad. Un valor típico es de 10:1.

*Linealidad* , es la desviación máxima de la línea recta ideal que se puede trazar a través de los puntos trazados para pruebas de calibración, un valor típico de esta desviación es  $\pm 1\%$

*Repetibilidad del flujo*, expresada como porcentaje de la capacidad nominal, describe la reproductibilidad del gasto de una bomba en condiciones determinadas cuando se varía la graduación de capacidad luego se vuelve al valor de referencia que se prueba. El valor típico es de  $\pm 1\%$ .



**Fig. 5.17. La curva de calibración de la bomba indica la respuesta del flujo a un cambio en la carrera.**

Cuando se aplican estas definiciones a cualquier bomba dosificadora se debe tener en cuenta la diferencia entre las exactitudes expresadas como porcentaje de la capacidad nominal (plena escala) y el posible error absoluto. En la *tabla 2.6* se presenta una comparación con el empleo de los datos de la figura 5.16. Se verá que la última línea de la *tabla 2.6*, no está dentro de la relación de reducción de 10:1. Por ejemplo, con el 3% de la carrera nominal, una bomba cuya exactitud es de  $\pm 27.3 \text{ cm}^3/\text{min}$  entrega  $2 \text{ cm}^3/\text{min}$ . No hay certeza de si la bomba esta entregando cero o  $29.3 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Por ello, no es posible operar una sola bomba dosificadora en una gama ilimitada de ajuste de carrera tal como 1000:1 ni siquiera 100:1 y mantener buena exactitud. Para obtener una alta relación de reducción, hay que sumar el ajuste de la velocidad de la carrera al ajuste de la longitud de carrera o bien dividir la gama de flujo entre dos o más bombas de diferente tamaño o hacer ambas cosas.

Ahora se examinarán las fuentes de errores que existen en las bombas dosificadoras de diafragma y se hará sobre la base del volumen de flujo de masa,  $M$ , porque el parámetro importante en la mayoría de las aplicaciones es la masa y no el volumen. El volumen de flujo de masa efectivo es :

$$M = \rho ALn\eta_H \quad (10)$$

en donde  $\eta_H$ , la eficiencia hidráulica, está compuesta por las pérdidas debidas a :

1. *Incompresibilidad* del líquido dosificado y del aceite hidráulico si se utiliza para accionar el diafragma,
2. la deformación de la cámara de bombeo cuando tiene presión y
3. las fugas por los sellos dinámicos, válvulas de retención, válvulas de desahogo, válvulas compensadoras de vacío y válvulas automáticas para purga, así como el flujo inverso en las válvulas de retención

El error medio en el flujo de masa es :

$$\frac{\Delta \dot{M}}{\dot{M}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n}{n}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \eta_H}{\eta_H}\right)^2} \quad (11)$$

A continuación se comentará cada uno de los términos de la ecuación (11) para ver la forma de controlarlo y minimizar el error. Esto permitirá seleccionar la bomba idónea para la aplicación.

#### 5.9.1.12. Densidad

Para controlar el cambio en la densidad,  $\Delta\rho$ , se mantienen constantes la temperatura, presión y contenido de gases del líquido bombeado y del aceite hidráulico, si se utiliza. Para eliminar este error reproducible se calibra la bomba mediante un diseño cuidadoso de la bomba y tubería.

En casi todos los sistemas hidráulicos se succiona algo de aire o gas que se mezcla con el aceite. En aceite se satura con el aire o gas y

puede tener volúmenes apreciables de burbujas de gas y su efecto es mayor si el líquido tiene tendencia a formar espuma. Las burbujas siempre ocasionaran problemas. Si el arrastre de aire es grande puede ser necesario desaerear el aceite y el líquido bombeado.

Con bajas presiones, hasta una burbuja pequeña aumentará mucho la compresibilidad de un volumen considerable de líquido. Cuando aumenta la presión o se reduce la temperatura, gran parte del aire se disolverá en el líquido. Durante la carrera de succión, la presión en la cámara de bombeo es más baja. Este es el momento clave para liberar el gas del líquido bombeado pues puede alterar seriamente la precisión de la dosificación. Para evitarlo se necesita:

1. Instalar la tubería de modo que no haya bolsas de gases.
2. Desaerear el líquido bombeado.
3. Seleccionar una bomba que no tenga cavidades donde se puedan acumular los gases.
4. Evitar condiciones de temperatura, presión y flujo que puedan facilitar la liberación de los gases disueltos.
5. Minimizar los volúmenes muertos en la cámara de bombeo y en las válvulas.
6. Proveer un sistema de purga para eliminar el aire.

El cambio en la superficie del émbolo,  $\Delta A$ , ocasionado por el desgaste influye en la exactitud de la dosificación. El cambio es insignificante salvo que el émbolo sea muy pequeño, digamos de 0.125 in de diámetro. En este tamaño un desgaste de 0.001 in en el diámetro cambiará la capacidad en 1.6% , sin considerar las pérdidas por fugas. El reemplazo de un émbolo gastado también introduce errores debido a las tolerancias de manufactura y se requiere volver a calibrar la bomba.

Para minimizar este error, se deben utilizar pistones de mayor diámetro que estén bien lubricados y tengan buenas propiedades de resistencia al desgaste para los diámetros que requieren más control en los émbolos. Esto implica la selección de una bomba que tenga carrera lenta.

El cambio en la longitud de la carrera,  $\Delta L$ , influye en la exactitud de la dosificación debido al juego muerto en las uniones, flexiones y deformaciones por la carga, por un pequeño ajuste y el espesor de la película de lubricante. Las piezas bien ajustadas, diseñadas para alta rigidez producirán pequeños errores. Cuanto más larga sea la carrera mejor será la resolución. Sin embargo, no se puede confiar en los ajustes de la carrera como indicadores de la exactitud de ella.

El cambio en la eficiencia hidráulica,  $\Delta \eta$ , como causa de errores en la dosificación se puede considerar como relacionado con las velocidades del propulsor. Aunque la mayor parte de las bombas dosificadoras tienen motores de inducción monofásicos o trifásicos, algunas tienen motores Diesel o de gasolina, motores síncronos, motores neumáticos o hidráulicos, motores lineales y solenoides. Salvo el motor síncrono todos los demás tienen velocidades que dependen, hasta cierto grado, de la carga. La velocidad de los motores eléctricos varía con el voltaje y frecuencia de la corriente. En la tabla 5.5, se indica la variación de un motor de inducción típico de  $\frac{1}{2}$  hp con arranque por capacitor según sea la longitud de la carrera, el voltaje y la frecuencia. El motor para esta aplicación es 16% más grande para que no sé. Para reducir el error en la velocidad de carrera se pueden emplear motores asíncronos o de mayor tamaño. Como se indica en la tabla II no hay error detectable entre 0 y 50% de carrera. Por supuesto el error aumentaría si se permitiera la variación en la presión, voltaje y frecuencia.

**TABLA 5.4- Exactitud y Error Absoluto en bombas dosificadoras.**

<i>Carrera</i>	<i>Flujo</i>	<i>Error típico a</i>	<i>Error</i>	<i>Error</i>
<i>%</i>	<i>Principal</i>	<i>capacidad nominal</i>	<i>Absoluto</i>	<i>Absoluto</i>
	<i>cm<sup>3</sup> / min</i>	<i>con relación de</i>	<i>cm<sup>3</sup> / min</i>	<i>%</i>
		<i>carga de 10:1, %</i>		
<b>100</b>	2 735	± 1	± 27.3	± 1.0
<b>50</b>	1 325	± 1	± 27.3	± 2.1
<b>25</b>	620	± 1	± 27.3	± 4.4
<b>10</b>	200	± 1	± 27.3	± 13.7
<b>3</b>	2	± 1	± 27.3	± 1.367

**TABLA 5.5. Variación de velocidad en motor de inducción con arranque por capacitor.**

Longitud de carrera, %	100	70	50	20	0
Velocidad, rpm	1 760	1 770	1 780	1 780	1 780

Entre 50% y 100% de la longitud de la carrera, el error es de 1.1% .

El motor es de ½ hp y trabaja con voltaje y frecuencia constantes e impulsa una bomba que funciona con presión constante.

### **5.9.1.13. Eficiencia hidráulica**

El cambio en la eficiencia hidráulica,  $\Delta\eta_H$ , es el último término de la ecuación (11) que influye en la exactitud de la dosificación. Una  $\eta_H$  elevada indica que la bomba fue diseñada y fabricada con normas estrictas. La compresibilidad, la deformación y las fugas son los factores que alteran la eficiencia hidráulica y se hará un breve examen de cada uno :

La compresibilidad ocurre en el líquido dosificado y en el aceite hidráulico que acciona el diafragma. El error debido a la compresibilidad se puede medir y como es reproducible si se mantienen constantes la temperatura y la presión, se puede aplicar un factor de corrección. Este error se puede limitar con un diseño cuidadoso que minimice el volumen muerto en la cámara de bombeo. Este sistema también ayuda a la rapidez con la cual se puede cebar la bomba.

- La deformación es la medida del cambio en el volumen de la cámara de bombeo con respecto a la presión. Es el estiramiento elástico que ocurre en la estructura. En las bombas con diafragma mecánico, puede ser grande y, a veces, no lineal con relación a los cambios en la presión. En las bombas con diafragma de accionamiento hidráulico, el error por deformación puede volverse reproducible y lineal respecto a la presión y también en este caso se puede aplicar un factor de corrección. La deformación se vuelve importante cuando la carrera de la bomba es corta, por ejemplo  $\frac{1}{4}$  in y la presión de descarga es alta, digamos 1 000 psi. Hay disponibles bombas que minimizan los efectos del error por deformación.
- Las fugas del líquido bombeado y el aceite hidráulico también introducen errores e incluyen las fugas y flujo inverso del líquido por las válvulas de retención ; en los diafragmas hidráulicos , incluyen las fugas por los sellos dinámicos, válvulas de desahogo, válvulas compensadoras de vacío y válvulas automáticas de purga.

No deben existir fugas por los sellos estáticos que se puedan ver o localizar con una prueba de burbujas a la presión de funcionamiento. Las fugas son función de la viscosidad, velocidad de carrera, presión y temperatura.

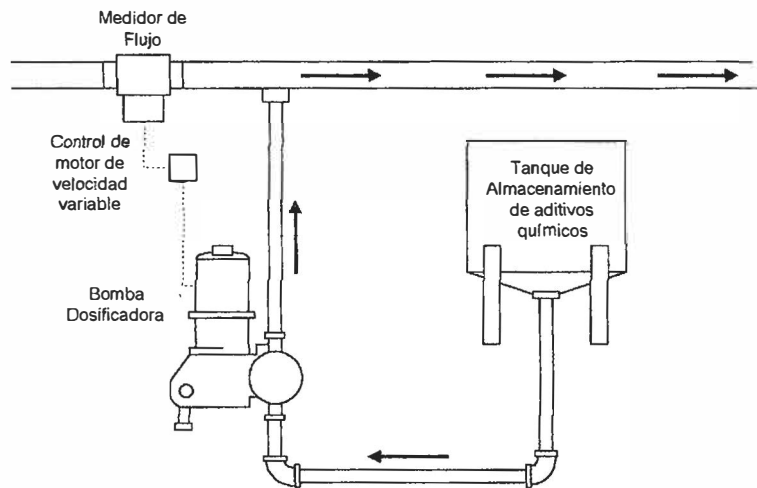
- La experiencia es la base para seleccionar válvulas de retención para el control de fugas. Cuando esta válvula está cerrada, es indispensable que forme un sello hermético a prueba de burbujas. El desgaste, la corrosión y los sólidos atrapados tendrán poco efecto en el funcionamiento de la válvula durante meses o años de servicio, si se selecciona la válvula más adecuada para el servicio.
- La selección incorrecta puede producir grandes errores. Los materiales más difíciles son los que se bombean a alta presión y las pastas aguadas corrosivas y abrasivas a altas temperaturas. Las velocidades en la válvula se deben mantener lo bastante altas de modo que impidan la sedimentación de sólidos. A bajas velocidades, se pueden acumular sólidos en las cavidades de la bomba que ocasionarán mal funcionamiento. Quizá no se puedan emplear asientos de elastómero o válvulas de disco que tengan buena resistencia al desgaste cuando se manejan abrasivos, debido a las temperaturas, presión y corrosión.
- La configuración de la válvula de retención debe permitir apertura y cierre positivos y rápidos ; se pueden lograr con válvulas del tamaño, tipo de guía, alzada, fricción y flotabilidad necesarias. La apertura y cierre lentos producirán grandes errores en la dosificación porque el líquido pasará en sentido inverso por la válvula mientras está cerrado. Por lo general. 1) el aumento de la viscosidad por baja temperatura del líquido bombeado y una carrera reducida hacen más lento el cierre de la válvula de retención y 2) una fuerte carga de resorte, baja presión de bombeo y el peso excesivo del elemento móvil de la válvula de retención producen cierre rápido y positivo.

En una instalación en la cual se emplea la válvula de retención con fuerte carga de resorte ocurrirán problemas porque la bomba requerirá una presión de succión más elevada que la disponible en el sistema. Una bomba de carrera lenta puede costar mucho más que una de carrera rápida pero tendrá mayor duración.



#### 5.9.1.14. Sistemas de dosificación automáticos

Las bombas de dosificación a menudo son empleadas en sistemas de lazo abierto o cerrado. Dentro de un proceso medianamente complejo que no dicta cambios frecuentes en la capacidad, se puede usar una técnica sencilla, en la cual el flujo de químico se puede variar manualmente. Los sistemas de lazo abierto (Fig.5.17) son caracterizados por la ausencia de retroalimentación o acción correctiva por medio de los controles; el sistema de operación es estrictamente proporcional. Una buena sensibilidad y un alto grado de linealidad en los controles son características necesarias de éstos sistemas (incluyendo el control en la carrera del pistón de la bomba).

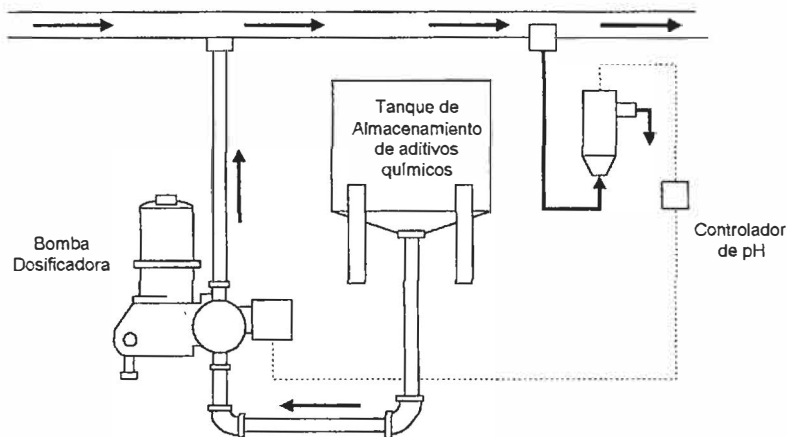


***Fig.5.18. Sistema de control típico de lazo abierto con bomba dosificadora como elemento final de control.***

Los sistemas de lazo abierto, requieren de alguna forma de ajustar la dosificación para mantener el rango propio entre la corriente del flujo de proceso medido y el flujo de la bomba dosificadora. Como ésto usualmente no es necesario para lograr condiciones de flujo cero en aquellos sistemas, el control de la velocidad del motor

resulta bastante práctico. Esto libera el control manual de la carrera para ajustes sencillos de dosificación.

Los sistemas de lazo cerrado (Fig.5.19) se caracterizan por la retroalimentación, o acción correctiva de los controladores. Tales controladores son bastante sofisticados, y leen las variables de operación después de la adición de reagentes químicos por medio de la bomba. La precisión de la bomba y su control (neumático o eléctrico) es relativamente importante para mantener la variable de proceso cerca al *setpoint*, dentro de las condiciones deseadas, sin modulación considerable por medio del controlador.

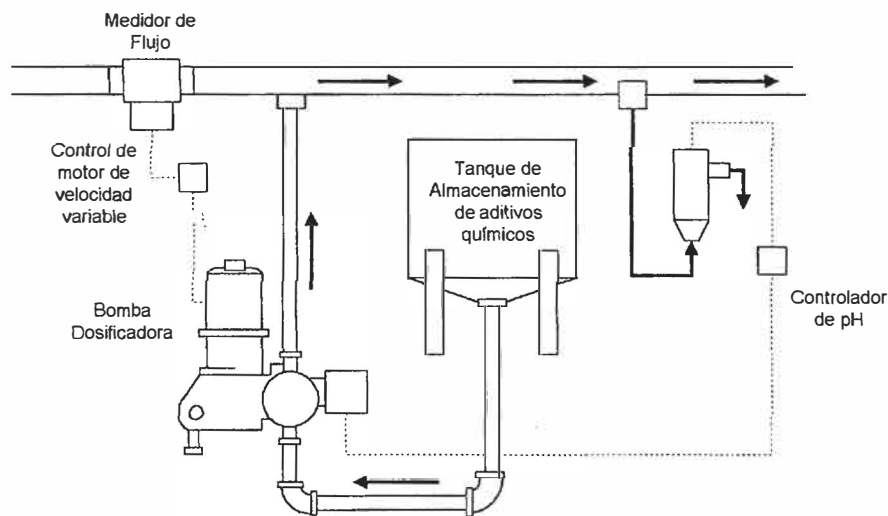


**Fig.5.19 . Sistema de control de lazo cerrado con bomba dosificadora como elemento final de control.**

En los sistemas de lazo cerrado, es esencial que la capacidad de la bomba permita alcanzar el cero. Es más práctico alcanzar la salida cero con el control de la carrera que por medio de la variación de la velocidad del motor, como muchas variables que manejan velocidad no pueden ser satisfactoriamente operadas a baja velocidad. La capacidad de los controles en los sistemas de lazo cerrado usualmente son neumáticos o dispositivos eléctricos análogos.

Una bomba dosificadora puede ser usada como un elemento final de control para dos controladores variables de proceso. Por ejemplo, cuando el flujo de líquido principal de proceso varía considerablemente, entonces un sistema retroalimentado de lazo cerrado no es adecuado para seguir las grandes variaciones en el rango de flujo tanto como los cambios en las variables del proceso, sin embargo, una combinación de la velocidad del motor y el control de la capacidad pueden ser usadas para alcanzar el rango deseado. Un sistema alimentado proporcional de lazo abierto en cascada con un sistema de proceso de lazo cerrado, se ejemplifica por la combinación en el control, en la figura 5.20..

Muchas bombas dosificadoras son de control automático. Esto introduce un error adicional en la longitud de la carrera debido a los sistemas de retroalimentación, las excéntricas y también produce ruido, fricción y falta de linealidad. Es casi seguro que este error en los sistemas electrónicos, neumáticos e hidráulicos agregará un error de, cuando menos  $\pm 0.5\%$ . Los sistemas electrónicos digitales pueden representar un mejoramiento en este aspecto.

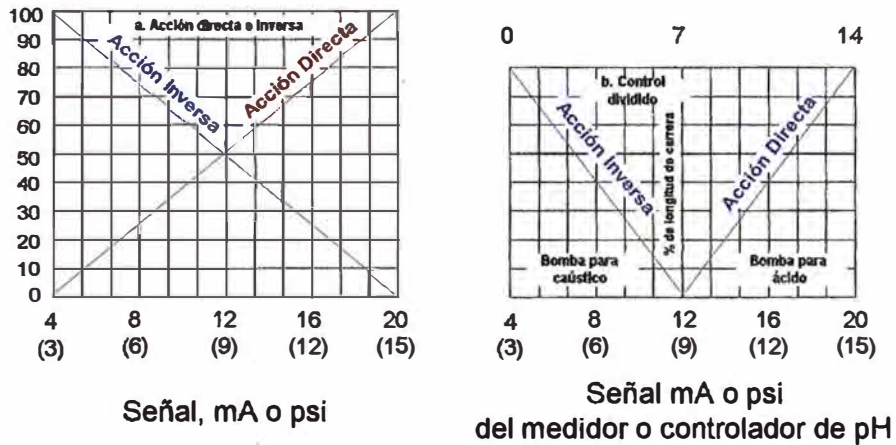


**Fig. 5.20, Sistema de lazo de control combinado: abierto y cerrado con bomba dosificadora como elemento final de control.**

Por lo general, el flujo de salida de la bomba controlada, se ajusta de forma automática mediante señales de control del proceso para mantener un valor de referencia o cumplir con los requisitos del proceso. Por ejemplo, el flujo de ácido a una reacción de neutralización se puede controlar en forma automática con una señal de un medidor de pH (generalmente 4-20 mA) colocado en la descarga de la cámara de reacción. Para variar el flujo se cambian la velocidad del propulsor o la carrera de la bomba.

Las unidades motrices de velocidad variable cambian el volumen de la bomba por medio de componentes externos. Las unidades motrices mecánicas de relación ajustable son de limitada utilidad. Los controles electrónicos para el motor no tienen la mayor parte de las limitaciones de las unidades motrices mecánicas ajustable. Para ciertas aplicaciones se emplean actuadores neumáticos, en especial en atmósferas peligrosas y así eliminar el riesgo de chispas eléctricas, pueden ofrecer ventajas en el costo. La carrera se ajusta con un cilindro neumático y se controla con un posicionador, el cual compara la señal de control del proceso para impulsar el actuador.

Casi todos los actuadores eléctricos funcionan con servomotores y se controlan con circuitos amplificadores lineales de estado sólido. La posición del actuador, que controla la longitud de la carrera, se mide con un potenciómetro impulsado por el eje del motor. Si existe un error entre la señal de control y la del potenciómetro, el servomotor modificará la longitud de la carrera para lograr cero error.



**Fig. 5.21. Modos de control para sistemas automáticos**

En muchos actuadores eléctricos se utiliza una fuente externa de corriente. Los actuadores eléctricos son compatibles con otras señales de control lineal tales como las de 1 a 5 o de 4 a 20 mA de cc y de 0 a 10 volts cc así como con un control externo con potenciómetro. Los actuadores y controles eléctricos se construyen para cumplir con las normas NEMA 4 (sellado contra agua y polvo) y como opción NEMA 7 (a prueba de explosiones).



**Fig5.22. Bomba dosificadora ProMinent de diafragma, con servomotor para control remoto de carrera.**

Los interruptores limitadores (limit switch) en casi todos los actuadores cortan la corriente en caso de un recorrido excesivo para proteger el actuador y la bomba. Estos interruptores también pueden producir señales de alarma. A veces, los actuadores pueden tener cancelación manual para permitir utilizarlos para ajuste manual de la carrera. Hay disponibles aparatos para convertir las señales de control a fin de tener compatibilidad con sistemas neumáticos, los electrónicos digitales y analógicos.

La señal de salida (posición de la bomba) generada en el circuito de retroalimentación, se utiliza a veces para enviar

### 5.9.2. Dampers de pulsación

Una bomba reciprocante produce flujo a pulsaciones. Una forma de suavizar las pulsaciones es con un amortiguador de pulsaciones, que no es más que una cámara de aire u otro gas que amortigua el flujo mediante compresión y dilatación alternadas del aire atrapado. La cámara, a menudo, tiene una membrana flexible para aislar el aire del líquido de proceso, a fin de que el aire amortiguador no se disuelva en el líquido.

En especial cuando se trata de bombas reciprocantes simplex, la amortiguación del flujo también puede permitir la reducción del diámetro del tubo necesario para una aplicación dada. En cada carrera de la bomba, se debe acelerar el líquido que hay en el tubo. Si el tubo es largo esta aceleración requiere una diferencia instantánea en la presión mucho mayor que la requerida para mover el líquido en forma continua con el volumen promedio del flujo.

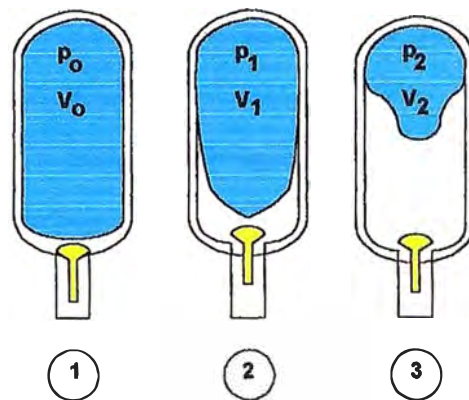
$p_0$  = presión de gas de llenado

$p_1$  = presión de operación min.

$P_2$  = presión de operación máx.

$V$  = volúmenes de gas

$\Delta V$  = cambio en el volumen por compensación de pulso.



**Fig.5.23. Damper de pulsación del tipo diafragma.**

Aunque el tubo sea corto y el efecto de aceleración no sea grande, el flujo instantáneo máximo de una bomba simplex sin amortiguador es unas tres veces mayor que el flujo promedio. Esto a su vez, requiere una presión diferencial instantánea más alta de la que se necesitaría con el mismo flujo promedio, pero estable. Si se utiliza el amortiguador de pulsaciones para suavizar el flujo a pulsaciones y volverlo estable, se reducirá la caída de presión en un tubo de tamaño dado.

En la figura 5.23, se ilustra un amortiguador sencillo en el cual la carga inicial de aire está a presión atmosférica. El volumen de la cámara antes de que entre el líquido del proceso es lo que indica el “tamaño” del amortiguador o sea su volumen  $V$ , cuando está vacía. Antes de que empiece el bombeo, la válvula en la parte superior de la cámara está cerrada y atrapa el aire atmosférico en la cámara. Cuando empieza el bombeo, el líquido de proceso entra al amortiguador y comprime el aire atrapado. Este “cojín” de aire comprimido se dilata y contrae en forma cíclica con cada impulso de la bomba.

El amortiguador o damper puede estar localizado en el lado de la descarga de la bomba ; pero se puede usar con las mismas ventajas en el lado de la succión.

En suma los dampers son necesarios cuando se requiere

- Flujo de baja pulsación, por ejemplo por razones de proceso.
- Dependiendo de la situación de la tubería, si es necesario reducir impermisiblemente picos de alta presión durante la operación de las bombas de desplazamiento positivo o evitar la pérdida de presión; en este caso, es necesario usar dampers de pulsación en el lado de ingreso como en el lado de salida.

### **5.9.3. Control de presión - válvulas de seguridad de sobreflujo - válvulas de retención de presión**

Las válvulas de control/sobreflujo proveen un control ajustable para instalaciones dosificadoras. Son usados para producir una presión de retorno constante para asegurar la precisión de la dosificación con salida libre, para presión de admisión en el lado interno para las presiones negativas fluctuantes o en dosificación al vacío, también son usadas como válvulas de seguridad de sobreflujo. Para prevenir la resonancia si usan como válvulas de control de presión se debe cuidar que la presión al final de la línea dosificadora sea mayor que la pérdida de presión en la línea.

Las válvulas de control de presión y/o sobreflujo son elementos de corte los cuales no cierran de manera absolutamente ajustada. Se utilizan en conjunción con los dampers de pulsación solamente con salida libre y en líneas de dosificación cortas.

Ciertos modelos de válvulas no son sujetas el efecto de la presión negativa y son de ésta manera de uso permisible en casos de presión negativa fluctuante en la salida de la tubería y para usarse con dampers de pulsación en en líneas dosificadoras más largas y pueden ser localizadas en cualquier punto a lo largo de la línea de dosificación. Dado que las



bombas dosificadoras con motor pueden producir altas presiones de descarga en una o dos carreras, los detectores de sobrecarga térmicos o aparatos similares de seguridad en el circuito de arranque del motor, quizá actúen demasiado tarde y no protegerán.

Si se obstruye el tubo de descarga se dañarán la bomba, el tubo o el equipo del proceso. Para evitarlo, el tubo de descarga entre la bomba y la primera válvula de corte o de contrapresión corriente abajo. La salida de la válvula de descarga se conecta con el tanque de succión o a un drenaje. El extremo abierto del tubo de retorno debe estar en donde sea visible, para detectar cualquier fuga por la válvula de seguridad.

#### **5.9.4. Instrumentación**

##### **5.9.4.1. Instrumento de medida de la turbiedad**

La medida en continuo de la turbiedad juega un rol esencial en el objetivo de alcanzar el standard más alto de calidad durante todas las etapas de tratamiento del agua potable; indica, en todo momento el grado de contaminación física del agua que se envía a un abastecimiento público o se vierte a la salida de una instalación de tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, en muchos casos, en que debe conocerse la cantidad global de cuerpos disueltos o la concentración de algunas sustancias determinadas, esta medida de turbiedad no es suficiente.

Entre las variables que influyen en la remoción de color y/o turbiedad, podemos citar: tipos y origen del color y turbiedad y tipos de dosis de ayudantes de coagulación.

Estos factores pueden ser determinados con mucha exactitud a nivel de laboratorio, pudiendo analizarse las siguientes variables químicas:

- a) Selección de coagulante más apropiado.
- b) Determinación de dosis óptima de coagulante.
- c) Determinación de la influencia del pH en la coagulación.
- d) Evaluación de la eficiencia de los ayudantes de coagulación y floculación.
- e) Determinación conjunta de dosis y pH óptimos.
- f) Forma y secuencia de aplicación de las sustancias químicas.
- g) Determinación de la influencia que la concentración de los coagulantes tiene en la coagulación.

Estos factores son función del tipo de problemas existente en las aguas, por lo cual la revisión indicada a continuación puede servir para ayudar a decidir qué investigar en los ensayos mediante las pruebas de jarras y cómo interpretar algunos de los datos obtenidos.

La eficiencia de la clarificación puede ser monitoreada por medio de la medida de la turbiedad, la cual también puede dar una alarma temprana de la ruptura del manto de lodo o de la dosificación incorrecta del coagulante.

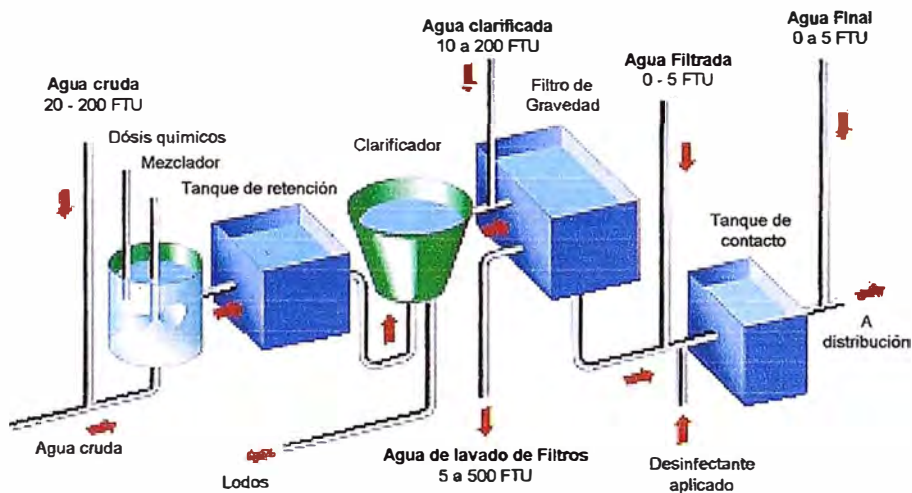
La turbiedad en el filtro sigue un ciclo predecible, el cual puede ser monitoreado para asegurar la mínima cantidad de agua necesaria para alcanzar el lavado. La medida de la turbiedad del agua filtrada es importante en el monitoreo de la eficiencia de los filtros, la turbiedad aparecerá conforme los filtros se vuelvan ineficientes. El monitoreo del agua filtrada resguarda contra el mal funcionamiento de los filtros los cuales permiten que los microorganismos ingresen en el suministro.

#### **5.9.4.1.1. Instalación de líneas de muestreo**

Las líneas de muestreo al cuerpo del turbidímetro deben correr con un pequeño diámetro del tubo para minimizar el tiempo de retraso para un flujo de muestra desde el punto de muestreo hacia el instrumento. Se recomienda una tubería de 1/4" de tubo rígido o

semirrigido. El tubo debe seguir la ruta, lo más directamente posible entre el punto de muestreo y el turbidímetro. Las líneas de muestreo largas resultan en una significativa demora entre las condiciones del proceso en línea y lo que el instrumento mide. Las tomas de la línea deben ser instaladas a lo largo de la tubería, de tal forma que se minimicen las oportunidades de depósitos de sedimentos o de burbujas de aire. Una llave ubicada en el centro de la tubería es ideal.

En la figura 5.24, se muestra los puntos típicos de monitoreo de la turbiedad en una planta de tratamiento de agua potable, en la cual, la medida en



**Fig. 5.24. Puntos de monitoreo típicos para la turbiedad en el tratamiento del agua potable.**

cada punto es una guía para monitorear la eficiencia de las varias etapas del tratamiento.

#### **5.9.4.1.2. Medida de turbiedad on-line**

Los turbidímetros On-line proveen el principal control para un monitoreo continuo de los procesos. Actualizan la información sobre la turbiedad del proceso y permite la inmediata reacción para corregir los estados fuera de control.

El monitoreo continuo de la corriente de proceso presenta retos en su diseño, bastante diferentes de los que se encuentran con un instrumento de laboratorio.

La medida de la turbiedad en línea requiere de un instrumento diseñado para sobrellevar muchos problemas prácticos, incluyendo el ensuciamiento del sensor, interferencia de burbujas de aire y de calibración. En suma , un turbidímetro que debe presentar performace de operación de acuerdo al requerimiento de cada proceso.

#### **5.9.4.2. Instrumentos de medida del pH**

Entender la teoría de medida de cualquier instrumento es el requerimiento de una calibración y resolución de problemas de manera exitosa. Es fácil si es que dividimos el sensor de pH en tres distintas entidades : 1. El sensor; 2. El compensador de temperatura y, 3. El analizador.

##### **El sensor**

Un sensor de pH es un aparato electroquímico que produce un voltaje proporcional al pH de la solución dentro del cual es colocado. En esencia el sensor de pH es una batería con una capacidad de corriente extremadamente baja.

Como en todas las baterías el sensor tiene dos medias celdas.

Una de aquellas dos medias celdas es el electrodo de medida que reacciona al pH de la solución. Asimismo su potencial es variable, pero de una manera repetible. (Ver la tabla 5.6).

El electrodo de referencia, es la otra celda de la batería, que completa el circuito. Esta tiene dos propósitos: 1. Completar el circuito eléctrico de tal manera que la corriente pueda circular. 2. Producir un voltaje estable y comparativo de tal forma que cambia el potencial total del sensor como una función solamente del electrodo de medida. Muchos electrodos de referencia de laboratorio están compuestos de sales de KCl (cloruro de potasio) en solución que tiene una cantidad controlada de sales disueltas de AgCl (cloruro de plata). Dentro de este electrolito se coloca un electrodo de Ag/AgCl. El potencial producido por esta media celda depende de la concentración de KCl y AgCl. Como un ejemplo : un electrolito 1.0 M KCl produce 8 mV mientras una solución 3.3 M KCl produce -45 mV. Este potencial, debe ser estable en todos los valores de pH, como se puede observar en la Tabla 5.6 :

**Tabla 5.6. Salida de un electrodo de medida de pH. (25°C)**

<b>pH</b>	<b>mV</b>
<b>0</b>	<b>+414.0</b>
<b>1</b>	<b>+354.9</b>
<b>2</b>	<b>+295.8</b>
<b>3</b>	<b>+236.6</b>
<b>4</b>	<b>+177.5</b>
<b>5</b>	<b>+118.3</b>
<b>6</b>	<b>+59.15</b>
<b>7</b>	<b>0</b>
<b>8</b>	<b>-59.15</b>
<b>9</b>	<b>-118.3</b>
<b>10</b>	<b>-177.5</b>
<b>11</b>	<b>-236.6</b>
<b>12</b>	<b>-295.8</b>
<b>13</b>	<b>-354.9</b>
<b>14</b>	<b>-414.0</b>

**Tabla 5.7. Comparación de salidas de un sensor de pH, incluido el Potencial de Referencia**

<i>pH</i>	<i>mV Corría</i>	<i>mV con 1.0M KCl</i> <i>Referencia</i>	<i>mV con 3.5M KCl</i> <i>Referencia</i>
<b>0</b>	<b>+414</b>	<b>+406</b>	<b>+369.0</b>
<b>3</b>	<b>+236.6</b>	<b>+228.6</b>	<b>+191.6</b>
<b>6</b>	<b>+59.15</b>	<b>+51.15</b>	<b>+14.15</b>
<b>7</b>	<b>0</b>	<b>-8</b>	<b>-45</b>
<b>8</b>	<b>-59.15</b>	<b>-67.15</b>	<b>-104.15</b>
<b>11</b>	<b>-236.6</b>	<b>-244.6</b>	<b>-281.6</b>
<b>14</b>	<b>-414.0</b>	<b>-422.0</b>	<b>-459.0</b>

Los sensores están hechos con diferentes concentraciones de electrolitos dependiendo del uso al que se empleen. Los sensores de procesos realizan una mejor operación y un mayor periodo de vida si están hechos con altas concentraciones de electrolitos.

A simple vista, podría parecer que las tres columnas de salida son completamente diferentes (Tabla 5.7) Sin embargo, un observador agudo notará que las columnas tienen algo en común. Para un cambio de pH hay 59.15 mV de diferencia en el sensor de salida. La única diferencia es que cada columna esta fuera de la otra por 8 mV, 33 mV o 45 mV. Esta diferencia u “offset” se elimina por medio de un procedimiento de calibración llamado “standarización”. Sobre un analizador de pH este puede ser llamado el ajuste del “Zero”.

Ahora que tenemos un gráfico que representa un offset de referencia que no afecta la pendiente de la salida del sensor, nosotros pueden tener una idea de las pendientes de las líneas.

La pendientes de las líneas son determinadas por la eficiencia del electrodo de vidrio que trabaja en la medida del pH. A pesar de todo los electrodos nuevos

raramente están al 100% de eficiencia. Esto significa que ellos no producen cambios de 59.15 mV por cada unidad de pH. Como regla de oro, se puede asumir que todo sensor nuevo de pH debe estar en por lo menos 98% de eficiencia, pero con el tiempo y el uso la eficiencia cae.

Para materias compuestas, no todos los electrodos de vidrio son iguales. Muchos exhiben una interferencia ante el sodio que deprime la salida en altos pH. Dependiendo del tipo de vidrio, esta interferencia puede presentarse en valores tan bajos como 10 pH, aunque todos los sensores especificados como de baja o ninguna interferencia de sodio exhiben alguna interferencia por encima del pH 13. Inversamente muchos sensores de pH exhiben un error ácido bajo 1.5 pH. Este error es presentado como un incremento en la salida.

Esto puede convertirse en algo muy crítico por lo que el estar seguro del tipo de electrodo de vidrio usado en el laboratorio o en el proceso así como la diferencia en sus características principales puede ser considerado motivo de una comparación entre ellos. Una ruta más eficaz es gastar unos cuantos dólares en usar sensores que tengan un rango de medida real de 0 a 14 pH. La figura 3 compara las pendientes de un nuevo sensor con el de uno usado y también muestra los efectos de el error por sodio y por ácido exhibido por algunos sensores.

La pendiente de un electrodo puede ser calculado solamente de una manera, por medio de la comparación de la salida de un sensor de pH en dos puntos separados en soluciones conocidas. Tales soluciones conocidas son llamadas "buffers". Los ajustes sobre el analizador son llamados "pendiente, span o eficiencia". El procedimiento es bastante simple si se realiza con corrección. Desafortunadamente, como veremos adelante a menudo el procedimiento se realiza inapropiadamente. Estos errores pueden venir de miles de fuentes por lo que debemos considerar las interferencias antes que considerar los procedimientos.

Mas allá de la discusión centrada en el sensor de pH de laboratorio, la descripción se verifica para los sensores de proceso también. Existe un punto que

ha sido discutido y que es un componente llamado "Junta líquida" (Liquid junction).

La junta líquida en un sensor de pH es el punto donde el KCl en la referencia encuentra la solución a ser medida. La junta líquida mantiene la solución salina de KCl/AgCl separada de la referencia mientras que al mismo tiempo permite a este electrolito formar un puente salino con la solución medida. Esta interfase puede tener la forma de un pequeño agujero, una fibra, una pieza de cerámica porosa, teflón, kynar o madera. A través del cual existe una vía de corriente desde el elemento de referencia Ag/AgCl hacia el elemento de Ag/AgCl en el electrodo de medida y pasa a través del analizador de pH.

La junta líquida en los electrodos de laboratorio son muy pequeños. En los electrodos de procesos la medida se incrementa. La obstrucción de la junta de referencia puede traer potenciales indeseables en el circuito de medida. En casos extremos este puede provocar el cese del paso de la corriente eléctrica como en la batería de un auto con terminales corroídos. Aunque generalmente, las lecturas de pH avisan cuando la batería va a morir. Esto se debe a los potenciales de la junta que se desarrollan en la interfase con la solución. Estos potenciales pueden venir de cambios en la velocidad de difusión de los iones cargados positiva y negativamente a través del puente salino. Este problema afecta mayormente a los sensores de proceso que a los de laboratorio. Esto se debe a que los sensores de laboratorio trabajan más del 90% de su tiempo de vida en condiciones controladas de limpieza, mientras que los de proceso gastan más del 99% de su tiempo en entornos severos y sucios.

Existen también otras fuente de potenciales de junta. Cualquier reacción química causa potenciales de voltaje. El movimiento de un sensor de una solución química a otra causa potenciales indeseables. En el tiempo estos potenciales se equilibran y llegan a ser estables. Sin embargo el movimiento del sensor de su entorno de laboratorio y el proceso usualmente lleva a que el equilibrio no se alcance rápidamente lo mismo sucede en el caso inverso.



Finalmente, detrás de la junta líquida existe un reservorio de KCl mezclado con AgCl. Este es un entorno controlado con un potencial determinado y medible. De cambiar este entorno, el potencial cambiará. La junta líquida, en consonancia con el reservorio, debe mantenerse libre de químicos indeseables. Los sensores de laboratorio tienen una facilidad para esto, ellos no encuentran grandes cambios en la temperatura y la presión que pueda agotar el reservorio de sal. Los sensores de proceso sí. Para combatir este envenenamiento del reservorio existen cientos de trucos. Aquellos incluyen la presurización de el reservorio de electrolito; la gelificación del electrolito, para impregnarlo en una matriz de estado sólido. Cada uno tiene sus ventajas y sus desventajas.

### **La temperatura**

La tabla 1 muestra la salida teórica de un sensor de pH al 100% de eficiencia, no se menciona que esta tabla es asumida a 25°C. La actividad del electrodo de medida cambia con la temperatura.

Es bastante obvio que la medida de +175 mV a 25°C será totalmente diferente en pH a aquella de +175 mV a 90°C. Pero por fortuna: 1. El efecto de la temperatura sobre el sensor es repetible y puede ser eliminada si se mide y se compensa, y 2. No existe efecto en el pH igual a 7.00 y un pequeño efecto dentro de 2.0 unidades de pH a partir de 7.00. Este deja dos elecciones, compensar los efectos de la temperatura o si la medida esta alrededor del pH 7.00, ignorarlo.

Los fabricantes de analizadores de pH para procesos, han precavido cuidadosamente el efecto de la temperatura, y proveen de un compensador automático que elimina su efecto.

### **El analizador**

La función del analizador de pH es recibir la señal de voltaje del sensor de pH y convertirlo en una señal visible en el display. Esto parece simple si toda la señal de voltaje se convierte a una unidad de ingeniería (una simple función antilog) compensar l a temperatura (una función de ganancia) y realizar una una

standardización (zero) y ajuste de pendiente (Span). Todo parece simple, pero la implementación no lo es.

Como se recuerda, un sensor de pH es una batería. Uno de los puntos que se debe tener en cuenta es que esta batería tiene vidrio en su lazo de corriente. La impedancia de el vidrio esta típicamente entre 100 y 1 000 megaohms a 25°C.

Si se asume que la impedancia del electrodo de vidrio es de 500 megaohms entonces el voltaje producido por el sensor es de 115.2 mV.

Bajo estas condiciones el sensor solamente produce 232 picoamps de corriente. Seguramente un voltímetro típico no podrá medir en esos muy bajos niveles. También, esa señal de alta impedancia esta sujeta a una considerable degradación provocada por fuentes externas. Tal señal no puede ser simulada por un generador de voltaje standard.

Para muchas instalaciones se requiere un analizador de pH que haga más que solo mostrar un valor de pH. Este también puede transmitir una señal a un registrador o a un sistema de control.

#### **5.9.4.3. Instrumentos de medida del flujo líquido**

Casi todos los sistemas de medición de flujo tienen dos partes; un elemento primario que produce el fenómeno de medición tales como los diferenciales de presión, la turbina de rotación, los de área variable, etc, y un segundo dispositivo que es el que detecta este fenómeno, para cambiar la fuerza interna por un signo de transmisión, éste último puede variar casi siempre sin limitaciones, mientras que los primeros dependen de los principios físicos.

Si bien existen muchas clases de medidores de flujo, el autor piensa que profundizar en este tema corresponde a una bibliografía especializada y solo haremos un estudio del medidor de flujo electromagnético que fué usado en ésta experiencia.

### **Principio del medidor de flujo electromagnético**

La medida se basa en la ley de Faraday de inducción electromagnética. El líquido que pasa a través del medidor de flujo electromagnético llega a convertirse en un conductor eléctrico. Como éste fluye a través de un campo magnético generado por los electromagnetos del medidor de flujo., un voltaje eléctrico (U) se induce en el líquido el cual es directamente proporcional a su velocidad

Este voltaje inducido es perpendicular al líquido conductivo y al campo magnético generado por los carbones del medidor de flujo. El voltaje es captado por los electrodos magnéticos para su transmisión a un convertidor adecuado.

La densidad de flujo en un campo magnético en un magneto dado y la distancia entre los electrodos es constante, asimismo el voltaje inducido es solo función de la velocidad del líquido. El voltaje inducido no es afectado por la temperatura, viscosidad o conductividad, en tanto que la conductividad del líquido este por encima del umbral de nivel mínimo. Para medidas confiables, la tubería debe estar completamente llena.

#### **5.9.5. Tubería de descarga**

Las pérdidas excesivas de presión durante la carrera de descarga se pueden evitar con la instalación de tuberías de descarga del diámetro correcto. La presión nominal del tubo debe ser mayor que la graduación de la válvula de seguridad. El exceso de alimentación puede ocasionar problemas con bajas presiones de descarga. Esto se puede evitar con la reducción de los diámetros de los tubos de succión o descarga o con la instalación de una válvula de contrapresión dentro del tubo de descarga. Las válvulas de contrapresión son obligatorias cuando se bombean líquidos a un proceso que se efectúa al vacío.

Cuando se instalan válvulas de compresión para tener una carga artificial en la descarga, se necesita un acumulador o un amortiguador de pulsaciones en

la tubería de descarga. El acumulador suaviza el flujo desde la bomba hasta la válvula de contrapresión, con lo cual se prolonga la duración de ella y se tiene un flujo más uniforme.

### **5.10. El sistema de supervisión y adquisición de datos**

Se ha considerado un capítulo aparte para el estudio teórico del sistema de Supervisión, Control y Adquisición de datos, para así tener una idea precisa de este campo moderno y especializado dentro de la ingeniería de los procesos en general. Se estudiarán los diferentes elementos de hardware y software, así como la comunicación industrial.

Se incluyen estructuras de supervisión y control en diferentes niveles, así como su relación con centros de control principales.

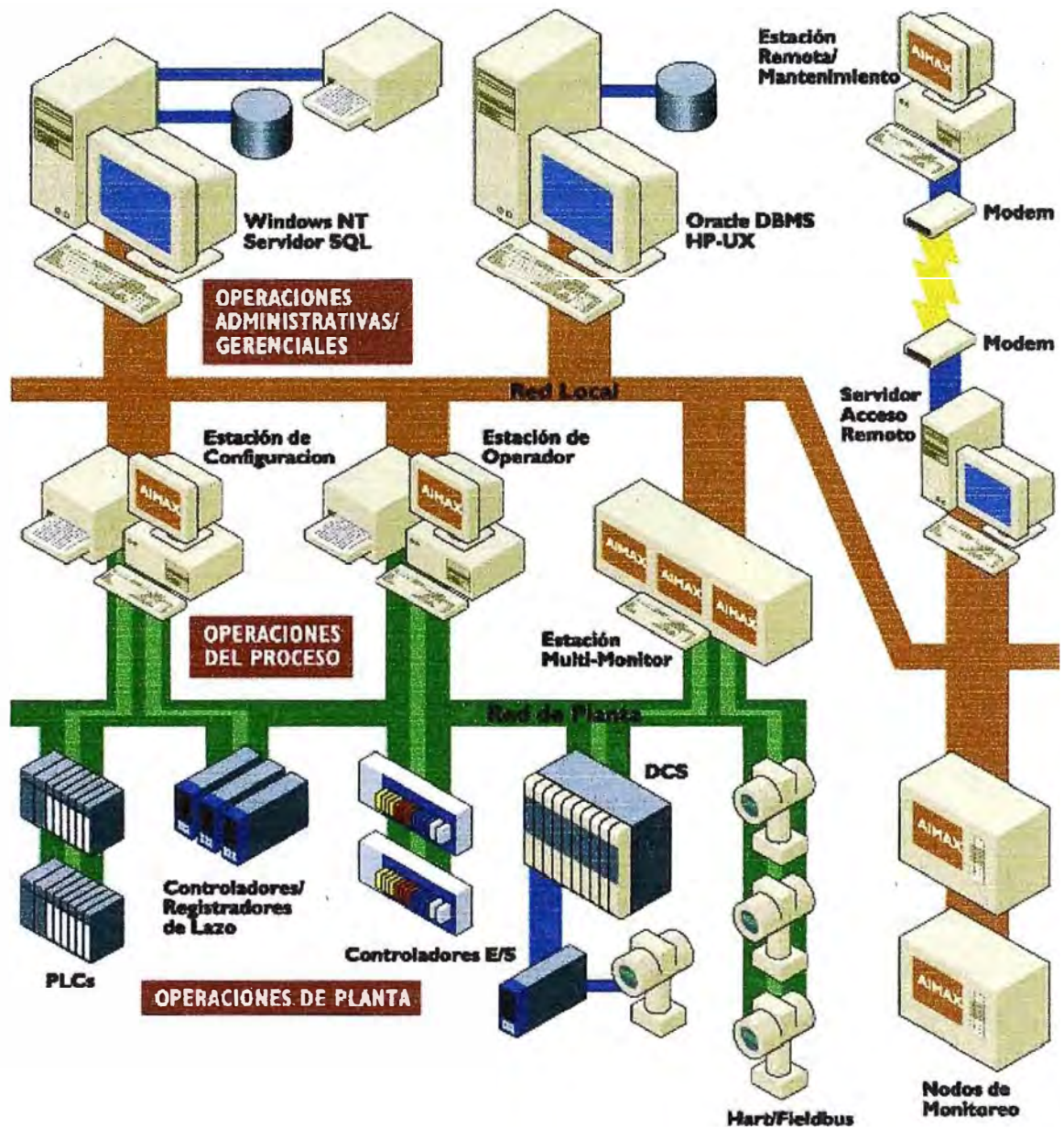
#### **5.10.1. Sistema SCADA**

El sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) es un concepto que se refiere básicamente a la adquisición de datos y control a larga distancia donde se involucra comunicaciones, típicamente entre una computadora central y un número de dispositivos de recolección de datos remotos llamados RTUs.

Los sistemas SCADA han estado referidos a los sistemas de control energético que por su naturaleza requerían datos de las diferentes subestaciones de centrales hidroeléctricas, etc. Para su procesamiento y control desde un terminal central.

#### **5.10.2. Niveles de supervisión y control**

Todo sistema debe ser capaz de integrar todos los diferentes componentes de control instalados en su planta. Logrando concentrar toda la información en un sólo sistema, de alta confiabilidad, muy fácil de configurar y compatible con la mayoría de los equipos y sistemas de control de existentes en el mercado.



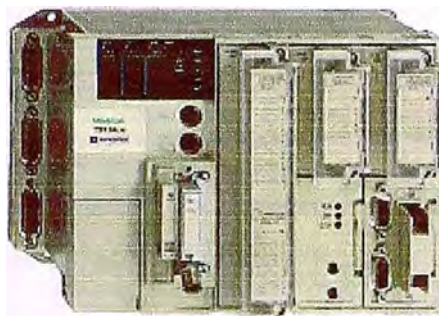
### 5.10.3. Elementos

De acuerdo a la estructura convencional de los sistemas SCADA, se pueden identificar elementos típicos de estos sistemas, pero nos centraremos en el estudio de los que se utilizarán en la presente experiencia, como son :

- 1) PLC (Programming Logic Controller).
- 2) Red de Comunicación Industrial, y
- 3) Software de Supervisión y Control de Procesos.

#### 5.10.4. Controlador lógico programable

La pieza clave de la integración del proceso productivo con el sistema administrativo es el “PLC” (Programmable Logic Controller) no más pero tampoco menos, que un computador de propósito industrial.

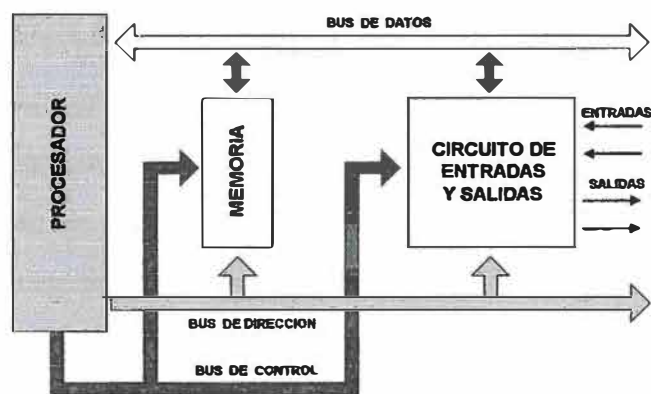


*Fig. 5.25. Controlador lógico programable modelo TSX Micro de Telemecanique se puede observar la CPU y las tarjetas de adquisición de datos.*

Haciendo una analogía con un computador común, en lugar que se ingresen datos a través de un teclado, el PLC recibe señales eléctricas (señales de entrada) de “sensores” que se encuentran instalados en diferentes partes de las máquinas o procesos; pueden ser sensores de presión, nivel, flujo, temperatura, pH, etc. Las señales de salida del PLC no son el tradicional monitor o la impresora sino “actuadores” que permiten tomar una acción sobre el proceso o máquina a través del PLC como por ejemplo: un arranque de motor, el control de una electroválvula dando un porcentaje de cierre o apertura para manejar el flujo de un líquido, el encendido de una lámpara indicadora, etc,

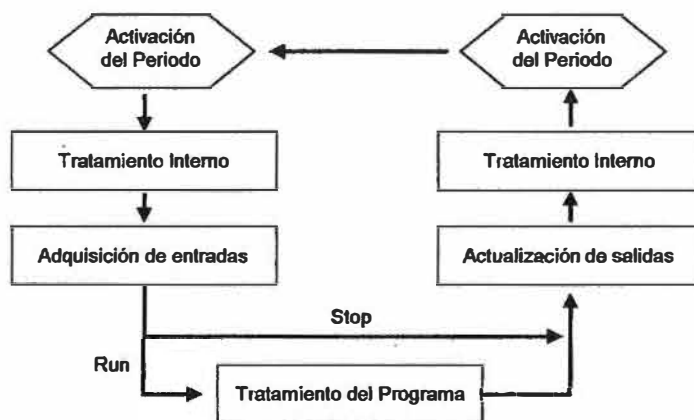
### 6.10.4.1 Operación

Conociendo las señales de entrada y salida éstas se conectan al PLC a través de un programa suministrado, se establecen las condiciones de funcionamiento como secuencias, “lazo de regulación”, etc. Permittedle al PLC controlar el proceso de una forma eficiente, eliminando los antiguos sistemas de control de lógica cableada (relés, temporizadores, contadores, controladores independientes, etc.).



*Fig.5.25. Estructura de un PLC.*

El PLC constantemente lee las entradas y de acuerdo al programa decide el manejo de las señales de salida, de esta forma puede controlar diferentes procesos y hacer cálculos muy precisos y sofisticados. Así se manejan eficientemente infinidad de datos que antes se captaban manualmente.



*Fig.5.26 Ciclo de funcionamiento y control del ciclo de un autómata*



Desde su aparición en la década de los 70 hasta la actualidad el PLC ha sufrido grandes cambios. En un inicio su aplicación específica era el reemplazo de los tableros de control electromecánico (Relay Panels); se utilizaba para un control secuencial de los altos costos asociados al mantenimiento y el stock de repuestos de los dispositivos de control como relés, temporizadores, etc. En la actualidad hablar de PLC's es hablar de un sistema que permite la integración total de la planta y manejar diversos tipos de control y sistemas como por ejemplo:

#### **6.10.4.2 Control de procesos**

Es utilizado generalmente cuando se usan variables analógicas y se requiere utilizar diversas estrategias de control tales como control proporcional PI (Proporcional Integral), PID (Proporcional Integral y Derivativo) y hacer diferentes lazos de control. También tiene la capacidad de comunicación con diferentes controladores de lazo cerrado (Loop Controller) que le permite al PLC controlar totalmente el proceso.

#### **6.10.4.3 Sistema de control distribuido**

Es aquel que posee múltiples unidades de procesamiento. Tiene un alto grado de interacción entre ellas y dan la idea de un sistema único.

El sistema implementado con PLCs es un sistema de control porque puede tener un crecimiento horizontal y vertical a medida que el sistema o proceso lo requiera. En un proceso, dependiendo de la estrategia de control, pueden existir varios PLCs y otros equipos de control, cada uno de ellos trabajando como una unidad inteligente porque hace su propio control; tienen un alto grado de interacción y dan idea de un sistema único.

#### **6.10.4.4 Implementación en sistemas scada**

El sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) es un concepto que se refiere básicamente a la adquisición de datos y control a larga distancia



donde se involucra comunicaciones, típicamente entre una computadora central y un número de dispositivos de recolección de datos remotos llamados RTUs.

Los sistemas SCADA han estado referidos a los sistemas de control energético que por naturaleza requerían datos de las diferentes subestaciones de centrales hidroeléctricas, etc. Para su procesamiento y control desde un terminal central.

Actualmente el PLC es considerado un RTU por su gran capacidad de comunicación a largas distancias vía modem, alta capacidad de adquisición de datos, procesamiento y control.

El PLC, a través de unos módulos que miden todas las variables y parámetros de energía (Power Monitor), ingresa al sistema energético como una alternativa para controlar, supervisar y optimizar todo el sistema.

#### **6.10.4.5 Ventajas comparativas de los PLC's**

Los datos que nos da el PLC son en "tiempo real" . Nos permite conservarlos como históricos dándonos una idea más real del proceso e involucra una infinidad de análisis en la búsqueda de soluciones al proceso productivo.

En la actualidad es muy común hablar de "Redes Industriales" que básicamente están formadas por PLCs, terminales de plantas, variadores de velocidad, monitores de energía, etc. La idea de esta Red Industrial es controlar y supervisar los diferentes procesos de planta y el sistema energético a través de una computadora donde se instala el "Software de Supervisión y Control" que permite captar todos los datos del proceso a través de PLCs que están en la Red y procesar esa información para mostrar las tendencias de la producción, consumo de energía, etc. Al permitir ver el proceso en tiempo real a través de gráficos y controlar - actuar sobre - el proceso directamente desde la computadora, reduce los tiempos de maniobra, *optimiza el control de la planta y mejora la calidad.*

Adicionalmente permite el "Ingreso del Proceso Productivo al Sistema Administrativo" a través de la computadora donde se está manejando el software de supervisión y control, considerando a esta computadora como un nodo más de la Red Administrativa o, en algunas configuraciones, un terminal de la

computadora central, desde donde cualquier usuario de la red accederá a los datos del proceso productivo previamente definidos por el sistema y dentro de las consideraciones de seguridad establecidas. Esto permite la transferencia de datos y el control del sistema productivo directamente desde la red administrativa, llegando así a integrar los procesos industriales con las redes administrativas.

A esta labor se le denomina “integración de sistemas” porque se trata de diferentes tecnologías (sensores y actuadores de PLCs, computadoras centrales, telecomunicaciones, etc.) que tienen que caminar juntas, por ello es relevante su compatibilidad y conectividad.

**TABLA 5.8. : Comparación de algunos sistemas de control.**

<b>Característica</b>	<b>Sistema de relé</b>	<b>Lógica Digital</b>	<b>Computadoras</b>	<b>PLC</b>
Precio por función	Muy bajo	Bajo	Alto	Bajo
Medida Física	Grande	compacta	compacta	muy compacta
Velocidad de operación	Lenta	Muy rápida	muy rápida	rápida
Inmunidad al Ruido Eléctrico	Excelente	Buena	Bastante buena	Buena
Instalación	mucho consumo de tiempo	consumo de tiempo en diseño	consumo de tiempo en programar	Simple de programar e instalar
Capacidad de operaciones complicadas	No	Si	Si	Si
Facilidad de mantenimiento	Pobre - gran número de contactos	Pobre	Pobre	Buena, pocas tarjetas.

#### **5.10.4.6. Consideraciones para la integración de los Procesos industriales**

La Integración de los Procesos Industriales trata de una tecnología de propósito general, son sus aplicaciones, las que constituyen un verdadero *know how* para cada empresa. No obstante, no basta comprar el hardware y software, es un proceso creativo y continuo, tanto como el dinamismo que la empresa quiera tener.

Embarcarse en un proyecto tecnológico como el de la automatización de una planta industrial requiere de garantía de soporte de mantenimiento.

La experiencia ha demostrado que los proveedores de esta tecnología terminan convirtiéndose en un socio del negocio y el éxito de la solución depende en gran medida de que sus conocimientos y experiencias estén sintonizados con la realidad del mercado local junto con el internacional y sobre todo que esté “disponible” permanentemente; existen casos en que el obviar este hecho ha sido motivo de fracasos muy costosos.

#### **5.10.4.7. Selección de controladores programables**

La selección de un PLC puede ser una tarea bastante delicada en función de las exigencias de la aplicación en particular. Los criterios esbozados a continuación son los básicos a tener en cuenta, probablemente suficientes para una gran cantidad de aplicaciones de tipo general, pero no debe pensarse que son todos.

#### **5.10.4.8. Alimentación eléctrica**

Este punto puede parecer trivial pero tiene su importancia.

Debe tenerse en cuenta el tipo de suministro de energía (AC o DC) así como la calidad del mismo (tolerancia a las fluctuaciones eléctricas).

Existen equipos para alimentación eléctrica tanto en AC como en DC. Estos últimos son usados principalmente en aquellas aplicaciones de naturaleza tal que el PLC va a estar alimentado permanentemente desde un banco de

baterías. Un ejemplo de este tipo de aplicaciones podría ser un tablero de transferencia automática.

Para el caso de los equipos de AC, son mucho más adecuados a nuestra realidad los equipos de autovoltaje. Estos equipos se alimentan en AC en un rango muy amplio de tensiones. Su fuente de poder es una fuente conmutada que se adecua a las variaciones de la tensión de alimentación. Esta característica es muy importante si tenemos en cuenta que en nuestro país el suministro eléctrico es de muy mala calidad y que los equipos electrónicos son muy sensibles a las sobretensiones.

#### **5.10.4.9. CPU (Central Process Unit)**

Este controla y supervisa todas las operaciones dentro del PLC, llevando a cabo instrucciones programadas en la memoria. Un bus del sistema o Highway transporta la información desde y al CPU a través de la memoria y de las unidades I/O. El CPU esta provista de un reloj de frecuencia que funciona por medio de un cristal de cuarzo o un oscilador RC. El reloj determina la velocidad de operación del PLC y provee una sincronización para todos los elementos del sistema. Virtualmente todos los controladores modernos están basados en microprocesador. Algunos PLC más grandes también emplean microprocesadores adicionales para controles complejos, funciones que consumen tiempo tales como el procesamiento matemático, PID, etc.

#### **5.10.4.10. Interfases de entrada y salida discretas**

El papel de las interfases de **entrada discretas** es permitir el flujo de información digital (1 ó 0) desde los transductores discretos hacia la CPU del PLC.

Es preferible usar entradas discretas en 24 VDC ya que estas, comparadas con las entradas en 110 o 220 VAC, ofrecen mayor seguridad al personal además de ser más económicas y mucho más compactas.

La mayoría de los sensores y detectores que envían las señales de entrada discretas al PLC no son otra cosa que un contacto electromecánico que puede operar tanto en AC como en DC.

Ejemplos de este tipo de sensores son los presostatos, termostatos e interruptores de posición.

En estos casos es necesario verificar la compatibilidad entre el detector y la interfase en entrada.

Las **interfases de salidas discretas** controlan generalmente bobinas de contactores o de electroválvulas, o lámparas de señalización, sirenas y elementos similares, con la función de permitir el flujo de información digital (1 o 0) desde el PLC hacia los pre-actuadores en el campo, por ejemplo un arrancador estático u otros equipo basados en microprocesador, igual que un PLC. En síntesis, la interfase de salida discreta debe acondicionar la señal digital de nivel lógico (dentro del microprocesador) de tal manera que sea capaz de excitar la bobina de un contactor (externo).

Los módulos de salida deben ser seleccionados teniendo en cuenta los siguientes criterios básicos:

Tensión de alimentación: siendo las mas usuales 24 VDC, 110 AC y 220 VAC.

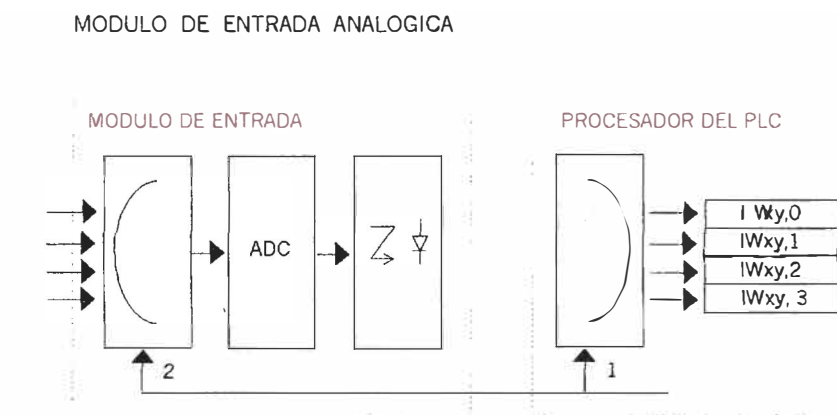
Consumo: ya que las interfases de salida tienen limitaciones en cuanto a la carga que pueden conmutar. Este consumo se especifica en vatios (W) para el caso de DC y en voltamperios (VA) para el caso de AC. A veces en amperios (A).

Número de operaciones: las interfases de salida de tipo estático, a transistores en DC y a triacs en AC, tienen un número de operaciones garantizado prácticamente ilimitado, a diferencia de las de tipo relé cuya vida útil esta limitada a varios millones de maniobras.

En un mismo PLC, y en función de las necesidades pueden combinarse módulos de salida de diversos tipos. En estos casos son interesantes las salidas de tipo relé, ya que permiten trabajar tanto en DC como en AC y en diversos niveles de tensión.

#### 5.10.4.11. Interfases de entradas y salidas analógicas

Las **interfases de entradas analógicas** vienen en módulos que contienen varias interfases similares. Los módulos de entradas analógicas son básicamente un conjunto formado por un *Convertidor Análogo Digital* (ADC) y un multiplexor. Ver figura 5.27.



**Fig. 5.27**

El multiplexor transmite al ADC, por turnos, una de las varias señales analógicas que el módulo recibe del campo.

El ADC genera una cierta cantidad de señales digitales (bits) en función del nivel de la señal analógica que recibe. Este conjunto de bits es información digital que es transmitida al procesador principal del PLC traduciéndose en una variable numérica que puede ser usada en el programa de aplicación.

Los módulos de entradas analógicas de un PLC se pueden dividir en dos grandes familias en función del tipo de señal que reciben: señales de alto nivel y de bajo nivel.

Las **interfases de salida analógicas** también vienen agrupadas en módulos. Los módulos de salidas analógicas se basan en un *Convertidor Digital Analógico (DAC)*.

El DAC recibe un conjunto de bits, que refleja una variable numérica calculada por el programa del PLC, y en función a este genera una señal analógica. Obviamente, la señal de salida no evolucionará continuamente sino mediante pequeños saltos. A mayor cantidad de bits en el DAC más pequeños los saltos.

Los PLC's utilizan las señales de salida analógicas para comandar elementos de mando de potencia o actuadores de tipo continuo, tales como un variador de frecuencia o una válvula proporcional.

Las **señales de alto nivel**, son de tensión (V) o de corriente (mA), que evolucionan dentro de ciertos rangos de variación estandarizados. Generalmente este tipo de señales proviene de transmisores. Algunos rangos típicos de las señales de alto nivel son los siguientes.

Señal de corriente: 0-20 mA, 4-20 mA.

Señal de tensión: 0-10 V, 0-5 V, 0-2 V.

El uso de señales de corriente está muy difundido ya que este tipo de señales es suficientemente robusta como para ser transmitida fiablemente en un ambiente hostil como suele ser el industrial, mientras que las señales de tensión presentan los problemas de la distorsión por efecto del ruido eléctrico y de la caída de tensión.

Las **señales de bajo nivel**, son generalmente de tensión, del orden de los milivoltios. Proviene mayoritariamente de termocuplas, sondas de temperatura, celdas de carga y otros transductores similares.

Los módulos de entradas analógicos por lo general son del tipo inteligente, es decir, cuentan con su propio procesador y software especializado. Esto es necesario ya que muchas veces la información proveniente del transductor debe ser procesada antes de ser puesta a disposición del programa del PLC

Por ejemplo, en el caso de la medición de caudal mediante una placa de orificio, la señal enviada por el transmisor de presión diferencial debe ser procesada (extracción de la raíz cuadrada) para obtener una medida del caudal. Similarmente, en el caso de la medición de temperatura por termocupla, es necesario realizar la compensación por junta fría.

Características importantes en seleccionar un módulo de entradas analógicas son la resolución y el tiempo de escrutación.

El **tiempo de escrutación** se refiere al tiempo que transcurre entre dos lecturas sucesivas sobre una misma interfase del módulo. Este aspecto puede parecer intrascendente si pensamos, por ejemplo, en el procesamiento de una señal de temperatura, variable esta última que por lo general evoluciona muy lentamente. Pero sería fundamental en el caso del procesamiento de una señal proveniente de un potenciómetro lineal que refleja la posición de un móvil relativamente rápido.

#### **5.10.4.12. Programación de PLC's**

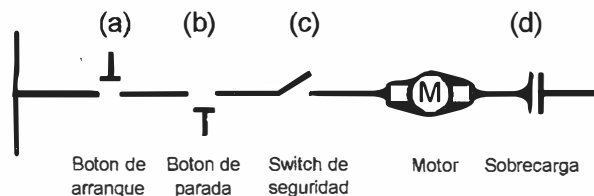
El principal requerimiento de cualquier lenguaje de programación de PLC es que este debe ser fácilmente entendible y usado en una situación de control. Esto implica la necesidad de un lenguaje de alto nivel que pueda proveer elementos muy cercanos a las funciones requeridas por un ingeniero de control, pero sin la complejidad y tiempo de estudio asociado a los lenguajes de alto nivel.



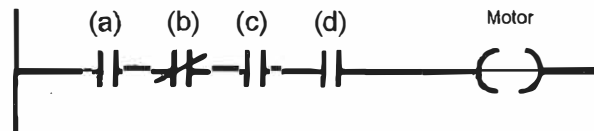
Los diagramas Ladder, son los más comunes métodos de describir la lógica de los relays, y es el más utilizado en la programación de los PLC's.

Los símbolos Ladder son usados para construir cualquier forma de sistema de control lógico y los diagramas pueden ser tan complejos según la aplicación particular a la que se orienten. Una parte esencial del diseño Ladder es la documentación del sistema y su aplicación. Para permitir a cualquier usuario entender la solución Ladder rápidamente.

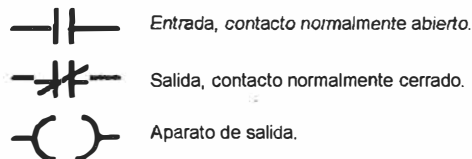
Para presentar la relación entre un circuito físico y una representación Ladder, considere el circuito eléctrico del motor en la Fig.5.28. El motor esta conectado a una fuente de poder vía tres switches en serie más un switch (a), (d) . El motor encenderá si todos los switches son cerrados. (b) muestra el equivalente diagrama ladder. El ladder usa símbolos estándares para representar los elementos de circuito y funciones que se encuentren en un sistema de control.



El diagrama ladder puede ser representado como sigue :



Símbolos de relés lógicos :



**Fig. 5.28 . Ejemplo de ladder**

El diagrama ladder consiste de dos líneas verticales representando los caminos de la tensión eléctrica, más los símbolos que forman un escalón del ladder. En el diagrama mostrado los símbolos representan tres switches normalmente abiertos, un contacto normalmente cerrado y una bobina de salida - el motor.

Virtualmente cualquier función puede ser programada, usando los símbolos ladder vía un terminal gráfico o computadora. Los parámetros pasan a módulos dedicados (tales como PID) incorporando constantes dentro del ladder.

Existe un progreso hacia la estandarización de los lenguajes de programación.

### **Numeración de I/O**

Estas instrucciones son usadas para programar los circuitos lógicos de control que han sido diseñados en forma de diagrama ladder, asignando todas las entradas y salidas físicas con un operando, dirección o Address, de acuerdo al PLC que se este usando. La numeración de los sistemas difiere entre fabricante, pero existe cierto término en común.

## **5.11. Red de comunicación industrial**

Uno de los mas anticipados cambios en la industria del control de procesos ha sido la introducción del field-bus. El field-bus es un enlace de comunicación digital entre el nivel inteligente del campo y los instrumentos de control que reemplaza al standard 4 - 20 mA.

Un sistema field-bus (bus de campo) de comunicación, puede ser usado para propósitos de control y de medida en los procesos industriales.

Las ventajas de un field-bus son consideradas como sigue:

- Permite una alta densidad de datos; esto es una condición vital en el interlazado de los procesos de producción industrial.

- Un field-bus permite una mayor flexibilidad en la producción.

- Es posible una comunicación con computadoras a través de todos los niveles de control.
- Es posible un mayor nivel en la precisión de la medida y transmisión que con la tecnología análoga.
- Un almacenamiento rápido y simple por computadora.
- Planeamiento a bajo costo de la instalación
- El autodiagnóstico del field bus permite menos esfuerzo de servicio por fallas.

El modelo de referencia de Open System Interconnection (OSI) fue desarrollado por la ISO para servir como standard que permitiera la compatibilidad entre varios aparatos, interfaces y fabricantes. Para este propósito, la comunicación se hace posible en forma jerárquica por medio de capas de protocolos y existen en el medio muchos field-bus con sus datos característicos (Tabla 5.9).

**TABLA 5.9 .Referencia a los más importantes field-buses**

Field bus	Base física	Tiempo de respuesta	Rango de transmisión	Disposición de datos (preferencia)	Long. max por segmen./ Long. total
DIN-Measurement bus	RS-485	3.4 ms	110 Baud a 1 Baud	Datos de medida	500 m
Bitbus	RS-485	> 1 ms	62.5 kBaud a 2.4 Mbaud	Datos de medida binarios	1200m / 4800 m
Interbus S	RS-485	> 2 ms	a 500 kBaud	Datos de medida	400 m / 13 km
Profibus	RS-485	> 1 ms	9.6 kBaud a 2.5 Mbaud	Datos de medida, datos generales	1200m / 4800 m
World-	RS-485	> 1 ms	9.6 kBaud a	Datos de	1900m /

FIP			2.5 Mbaud	medida, datos generales	4800 m
CAN-bus	RS-485	> 1 ms	9.6 kBaud a 1 Mbaud	Datos de medida	100 m / 1000 m
P-Net	RS-485	2.8 ms	76.8 kBaud	Datos de medida	1200 m / 5000 m
FIP	RS-485	> 1.5 ms	32 kBaud a 1 Mbaud	Datos de medida	1200 m / 5000 m
ASI	2 wire 24V-/pulsos	5 ms	9.6 kBaud	Binario	100 m
Meter-bus	2 wire corriente/pul	10 ms	9.6 kBaud	Datos de medida	1000 m
EIB	2 wire 24V-/pulsos	5 ms	9.6 kBaud	Binario	700 m

### 5.11.1. Transmisión de señales digitales

Muchas interfaces standard, que ha sido desarrollado con otros propósitos, han llegado a establecerse para los diferentes casos de aplicación de medida de sistemas con ayuda de computadoras. Básicamente aquellas interfaces pueden ser clasificadas con interfaces seriales o paralelas de acuerdo a su transmisión de datos.

**Interfase serial**, transmite palabras (llamados bytes) un bit cada vez. Un bit es la unidad más pequeña de datos transmisible y puede tener valores de “cero” y “uno”. El receptor tiene que reensamblar los bits que llegan un aquellos bytes o palabras. Un byte consiste de ocho bits.

**Interfase RS232C**, se define en el standard DIN Parte 1. Aquellos estándares corresponden al standard RS232C. La interfase RS232 es una conexión uno a uno basada en voltaje con solo dos participantes. Dos líneas de datos son usadas para la comunicación: Para transmitir datos (TxD) y para recibir datos (RxD). El asignamiento lógico no esta asignado

para voltajes fuera de los niveles de 3V a 15V y de -15V a -3V. Una velocidad de transmisión de datos standard de 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600 y 19200 baudios (1 Baudio = 1 bit/s) puede ser usado con Pc's. Sin embargo esta interfase puede ser usada para cubrir una longitud máxima de 10m y no puede ser usada en condiciones de alta interferencia electromagnética.

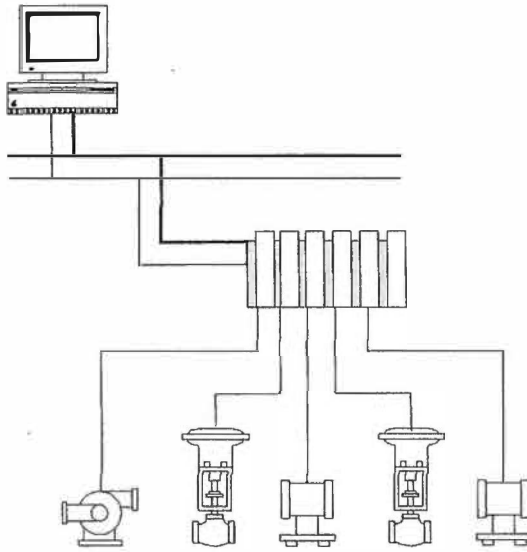
*Interfase RS485*, las desventajas de la interfase RS232C, particularmente es su falta de inmunidad a la interferencia y su restricción a 2 participantes, condujeron al desarrollo de la interfase RS485. Esta interfase es capaz de transmitir el mismo dato serial que de la interfase RS232C, pero esta interfase esta físicamente definida para permitir un máximo de 32 participantes standard con quienes conectarse. Una mayor inmunidad a la interferencia así con rangos de baudios alto, permiten por lo menos 500 metros de alcance y a menudo se alcanzan hasta 750 metros. Muchos de los field-bus modernos se basan en esta definición de interfase.

Interfaces paralelas digitales, a diferencia de la interfase serial, la interfase paralela transmite por lo menos uno o dos bytes completos, simultáneamente en paralelo sobre el correspondiente número de líneas de datos. Mayores líneas se requieren para propósitos de control. Las interfaces paralelas permiten un intercambio más rápido de los datos que las interfaces seriales. *La operación paralela de muchos aparatos puede ser implementada a bajo costo.* Infortunadamente, la instalación y el cableado son mayores que para las interfaces seriales sobre la base de numerosas líneas.

### **5.11.2. Instalación tradicional de cables de señal 4 - 20 ma**

Las ventajas del tradicional cableado 4-20 mA incluyen estándares y procedimientos bien establecidos.

La mayor desventaja del cableado 4-20 mA es que se encuentra restringido a instalaciones punto a punto.

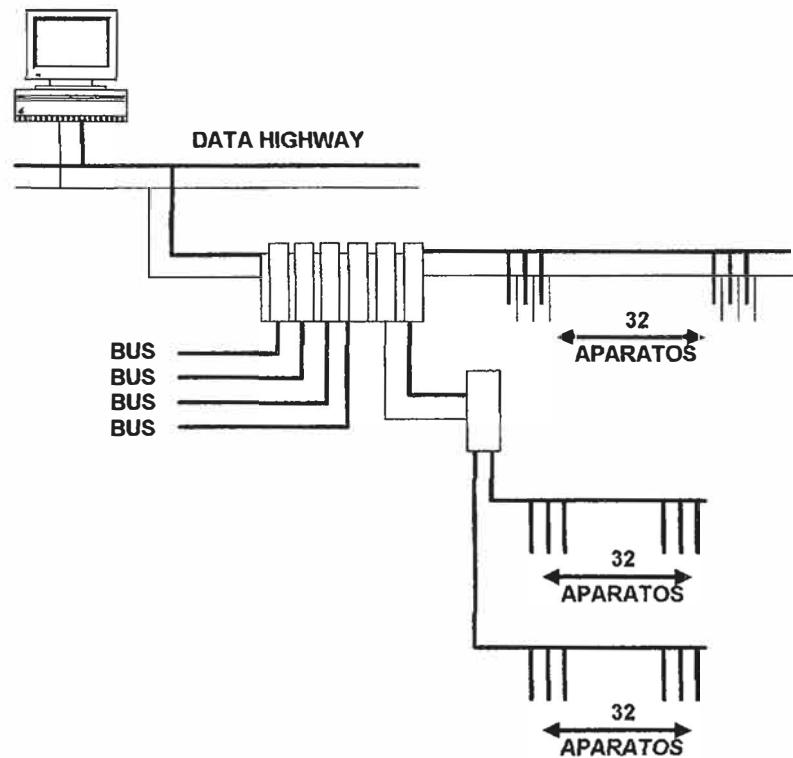


**Fig.5.29 - Cableado tradicional 4-20 mA**

### 5.11.3. Cableado field-bus

Un field-bus expande grandemente las opciones topológicas de los equipos cableados. Donde el cableado tradicional esta limitado, un field-bus incluye comunicación punto a punto, bus com, encadenados y arboles.

El que un segmento de field-bus pueda soportar 32 aparatos no significa que el diseñador de planta conecte 32 aparatos en un segmento simple. Debido a consideraciones de seguridad, sería inusual para un segmento exceder de doce aparatos.



*Fig 5.30 Cableado Fied-bus*

#### 5.11.4. Enlace fipway

FIP constituye un conjunto de normas de la UTE adaptado a las exigencias de comunicación “en tiempo real”, e indispensable para la instalación de automatizaciones reflejas. Fipway es un protocolo de comunicación industrial similar al Profibus, Interbus, Ethernet, etc.

La norma se basa en una arquitectura de comunicación reducida a tres capas, a las que viene a agregarse la gestión de red.

Para descentralizar la periferia, la inteligencia y los servicios a grandes distancias. AEG Schneider Automation ofrece la red de célula simple y económica FIPWAY, conforme a la norma FIP.

Para constituir una arquitectura FIPWAY, permitiendo en consecuencia, la conexión de los diferentes equipos entre sí, AEG Schneider Automation proporciona los elementos siguientes:

- Cable principal TSX FP Caxxx, comercializado en 100, 200 o 500 m.

- Cable de derivación TSX FP CCxxx, comercializado en 100, 200 o 500m.
- Cordón TSX FP CE 030 para la conexión de los terminales.
- Enchufe TSX LES 65 o TSX LES 75 para la conexión de los autómatas Telemecanique TSX 7 modelos 40.
- Enchufe TSX FP ACC2 para la conexión por encadenado o derivación de los microautomatas Telemecanique TSX 17.
- Tarjetas PCMCIA TSXFPP20 y cable TSX FP CG10 para la conexión de los autómatas Telemecanique TSX 37.
- Caja de derivación TSX FP ACC4.
- Terminal de línea TSX FP ACC7.

La conexión de los equipos a un segmento se puede hacer:

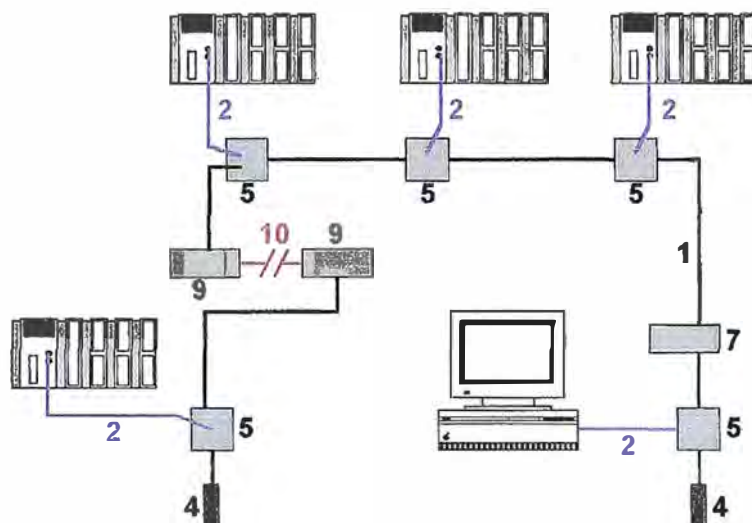
- Por encadenado: sencillamente se conecta cada equipo al que le precede mediante el cable principal.

Por derivación: se conecta cada equipo en derivación al cable principal con el auxilio de una caja de derivación TSX FP ACC4, bien mediante el cable de derivación TSX FP CCxxx, bien mediante el cable principal TSX FP Caxxx.

Por una topología mixta, que incluye tanto equipos conectados por encadenado como por derivación

*Una red FIPWAY se constituye con uno o varios segmentos interconectadas por repetidores. La longitud máxima de un segmento de bus es de 1000 metros y el número máximo de estaciones por segmento es de 32 (más los posibles repetidores). Para conectar más equipos o para conseguir una longitud superior a 1 000 metros, es preciso utilizar repetidores eléctricos TSX FP ACC6 o de repetidores ópticos TSX FP ACC 8. En cada segmento hay opción a conectar el repetidor por encadenado o por derivación.*





**Fig. 5.31 Sistema de cableado FIPWAY.**

1. TSX FP CA Cable principal.
2. TSX FP CG Cable de conexión en derivación para tarjeta PCMCIA TSX FPP 20 para autómatas TSX 37-21/22, terminal FTX 417-40 y compatibles PC. La conexión al bus se realiza a través del conector SUB-D de 9 contactos de la caja TSX FP ACC 4.
3. TSX FP CC Cable de derivación, doble par trenzado blindado de  $150\Omega$  (diámetro 8 mm).
4. TSX FP ACC 7, Fin de línea, instalarlo en cada final de segmento.
5. TSX FP ACC 4, Caja de derivación.
6. TSX LES 65/75, Bornero de conexión, para autómatas TSX/PMX
7. TSX FP ACC 6, Repetidor eléctrico, permite aumentar el número de estaciones y la longitud de la red.
8. TSX FP ACC 2, Conector para autómatas TSX 17-20
9. TSX FP ACC 8 M, Repetidor óptico/eléctrico.
10. TSX FP JF 020, Cable conector óptico,, la longitud máxima de la fibra óptica entre 2 repetidores es de 3000 metros.

- El uso de sistemas electrónicos y cables de transmisión de señales, principalmente en mV y mA, son susceptibles de ser alteradas en sus funciones por efecto de la interferencia electromagnética \*, en toda instalación industrial que cuente con equipos electrónicos debe verificarse la vigencia de las normas CE (o similares), que eviten o atenúen la influencia de las interferencias. La interferencia electromagnética (EMI) puede ser causada a bajas frecuencias por acoplamiento capacitivo o inductivo parásito. En tal caso pueden reducirse o eliminarse los efectos, mediante un diseño minucioso y con la utilización de blindajes eléctricos y magnéticos. A frecuencias elevadas, la emisión de energía electromagnéticas se vuelven importantes. Las RFI son una amenaza importante para todos los sistemas electrónicos modernos, La razón fundamental es la creciente proliferación de transmisores de radio. Como valor orientativo, cabe tener presente que un walkie-talkie de 1 W a 1 metro de distancia provoca un campo eléctrico del orden de 3 a 4 V/m, pudiendo producir problemas de compatibilidad electromagnética (CEM) con facilidad.

El cableado FIPWAY se realiza a través de cable del tipo par trenzado con terminadores de bus (cuando no se utilizan convertidores a fibra óptica), la característica del par trenzado radican en que las corrientes inducidas se anulan entre sí evitando que los campos magnéticos parásitos generen corrientes en los hilos.

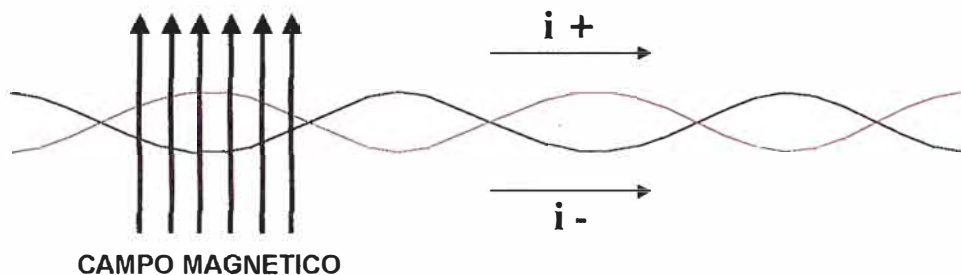
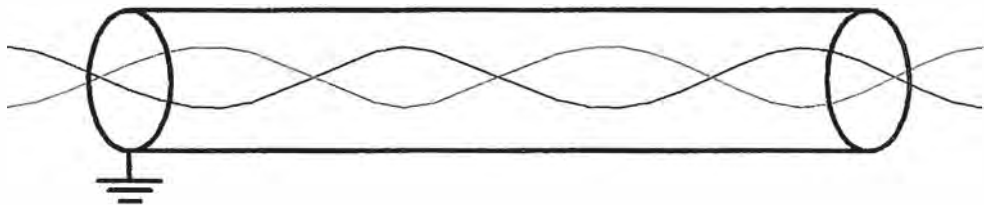


Fig. 5.32

Asimismo, la instalación adecuada de la toma a tierra debe ser solamente una y sería como se muestra en la figura.

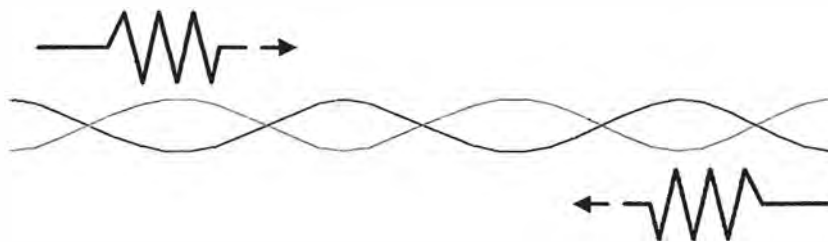
### 1 TIERRA



*Fig. 5.33*

El objetivo principal del terminador de bus radica en que este evita la reflexión de las señales, como se muestra:

**SIN TERMINADOR - Se producen reflexiones.**



**CON TERMINADOR - No se producen reflexiones.**



*Fig. 5.34*

## 5.12. Software de supervisión y control de procesos

Dieciséis años atrás, el software para Adquisición de datos fue el dominio de una élite de científicos en computadoras, quienes típicamente trabajaron con lenguajes como C y Fortran o lenguajes ensambladores de bajo nivel, los

cuales escribieron muchas funciones de software para aplicaciones específicas, siendo la plataforma de la elección el microcomputador.



***Fig.5.35 Las herramientas SCADA se utilizan en el monitoreo y control de procesos industriales.***

El software de Adquisición, Supervisión y Control de datos sirve en aplicaciones como la automatización de máquinas, monitoreo y control de procesos, instrumentación y exámenes electrónicos.

En la actualidad existe gran variedad de productos de software orientados al proceso industrial desde los sofisticados MRP (Manufacturing Requirement Planning), las ayudas al diseño de productos y plantas mediante CAD, así como los diferentes productos especializados para el control de procesos, de energía, simuladores y otros. Porque son una herramienta moderna fundamental para el especialista y el Gerente de Planta.

### 5.12.1. Administrador de configuración

La gran mayoría de software SCADA para Windows ofrecen máxima capacidad para generar bases de datos con una gran variedad de herramientas provistas en un ambiente orientado a objeto, con facilidades como Arrastrar y Soltar (drag-and-drop) de Windows, que aceleran y facilitan la ingeniería de desarrollo.

Las Bases de datos son configuradas en proyectos, o sea ordenamientos lógicos de archivos y directorios con todas las definiciones de bases de datos, tendencias, reportes, gráficos, etc. En trabajos de gran magnitud, muchas personas pueden trabajar a la vez y crear sub-proyectos, que luego son combinados para formar un gran proyecto maestro. Puede Importar/Exportar bases de datos relacionales ODBC para duplicar información fácilmente y acelerar aún más el proceso de configuración

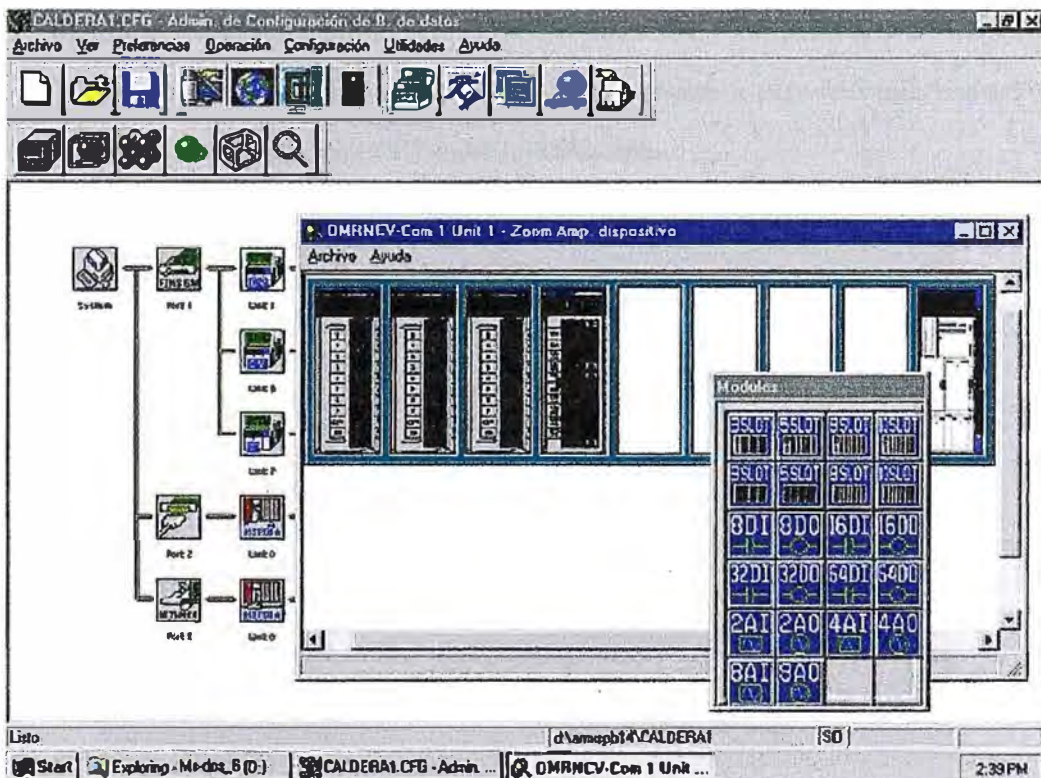


Fig. 5.36



### 5.12.2. Diseñador gráfico

El Diseñador Gráfico de un software SCADA provee un poderoso ambiente similar a graficadores avanzados como AutoCAD para construir los gráficos y pantallas del proceso. Al utilizar bibliotecas de símbolos y objetos en 2D y 3D se puede generar automáticamente gráficos de vista general, portadas, módulos, detalles de bloques y recetas basándose en etiquetas.

El Diseñador Gráfico permite importar dibujos en CAD que pueden asignárseles atributos de movimiento y animación con datos en tiempo real. Esto puede ahorrar muchas horas de configuración.

La Barra de herramientas para Run-time es configurable, facilitando la navegación y el uso del sistema. Se puede incorporar Macros en objetos como botones de comando, que permiten al operador ir rápidamente de una pantalla a otra, abrir válvulas o cambiar Puntos de ajuste. Los objetos gráficos pueden asociarse a etiquetas de puntos dinámicos, para mostrar distintos estados, colores, movimiento e incluso indicaciones en texto. Los Scripts de acción pueden asociarse con pantallas y proveen una insuperable flexibilidad para la Interfaz Hombre-Máquina.

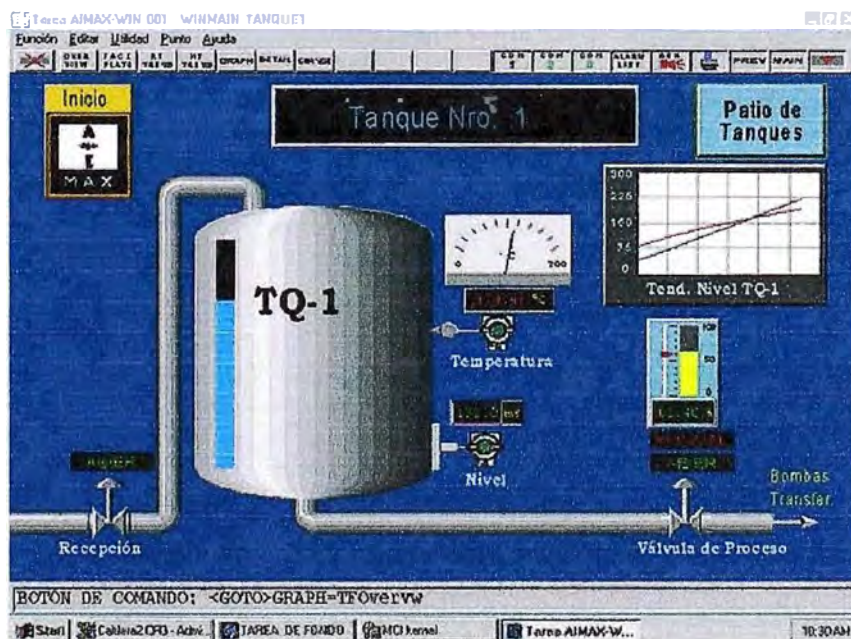


Fig 5.37

### 6.12.3 Supervisión en línea

El Software permite localizar rápidamente y en línea de todos los puntos definidos en la base de datos, para visualizar todos sus valores y parámetros en tiempo real. Facilita la presentación de información de los puntos de E/S, como: Dispositivo asociado, Dirección de E/S, Descripción, Rangos, Detalle de Punto y también permite al operador navegar fácilmente entre las diferentes pantallas, gráficos y tendencias.

### 5.12.4. Presentación y recolección de datos

Las tendencias permiten recolectar y guardar información de planta a la velocidad de muestreo que el usuario desee. Permite visualizar tendencias desplazándolas en el tiempo. Tanto las funciones de tendencias (variable vs. tiempo) como de Diagramas X-Y están incluidas en cada sistema.

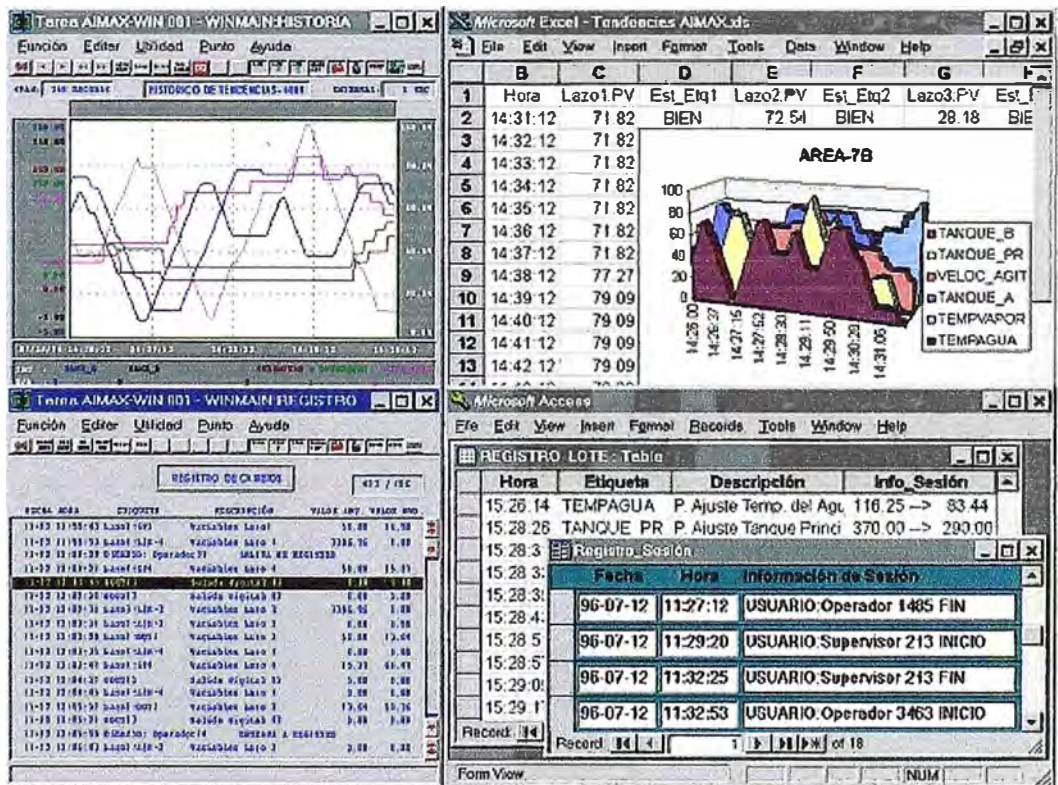


Fig. 5.38

#### **5.12.5. Alarmas**

Las alarmas analógicas pueden reportarse como HI/LO, HI/HI-HI, LO/LO-LO, tasa-de-cambio, desviación, etc. Las digitales son generadas en base a estados. Permite establecer niveles de prioridad de alarmas. Se generan resúmenes de las alarmas actuales e historia de alarmas. La información de alarmas puede ser filtrada y clasificada en base a prioridad, hora, reconocimiento, etc. Pueden imprimirse y/o guardarse en archivos.

#### **5.12.6. Enlaces en tiempo real a otros softwares**

Permite la alternancia con otros softwares aplicativos (Incrustación y Vinculación de Objetos) y provee soporte para varios objetos OLE (Hojas de cálculo, documentos, imágenes gráficas, etc.) a ser mostrados.

cada estación



## 6. DESARROLLO DEL TEMA

### 6.1. Diseño del sistema dosificador

El flujo de proceso dentro de una Planta de tratamiento de agua, se ha representado dentro del Plano N°1, de los Anexos. Para nuestro caso de estudio se ha definido la Planta de Tratamiento de Agua N° 2 de La Atarjea, SEDAPAL, en donde la dosificación de reactivo sulfato de aluminio se aplica en la Obra de reparto N° 1 y Obra de reparto N° 2, con lo cual se definen dos puntos de dosificación.



Fig. 6.1

La instalación de la estación dosificadora hasta el punto a dosificar es de 100 metros y la distancia de la estación hasta el punto de monitoreo es de 200 metros, se puede tener una referencia de las distancias respectivas observando la Fig. 6.2; de los anexos, de las fotografías y planos, se puede tener una idea precisa de el entorno de la instalación.

La nueva instalación deberá sustituir a la antigua, que consta de dos bombas dosificadoras marca MILTON-ROY (Fig. 6.2), que carecen de control automático para la dosificación y que no tienen las facilidades de dosificación adecuadas por haber cumplido su periodo de vida útil.



Fig. 6.2

### 6.1.1. Sistema mecánico

#### 6.1.1.1. Selección de la bomba dosificadora

Se ha estandarizado el empleo de los coagulantes de sulfato de aluminio en el rango de dosificación de 28 a 32 ppm (épocas de baja turbiedad o aguas con una turbiedad menor o igual a 200 JTU) y el cloruro férrico (épocas de alta turbiedad o mayores de 200 JTU) en cantidades variables de acuerdo a la turbiedad siendo la dosis más alta no mayor de 30 ppm; cada uno de estos coagulantes se utilizan combinados con polielectrolito catiónicos, en el rango de 0.20 a 0.30 ppm, para mejorar la eficiencia del proceso.

Estos principios determinan en un 70% la bomba a utilizar.

Sin embargo se solicitó a los ingenieros de planta, la elaboración de ciertas características de la bomba a implementar, siendo ellos los usuarios finales y los que están en contacto con las necesidades del sistema, por lo cual nos brindaron los siguientes requerimientos:

### **6.1.1.2. Características requeridas de bombas dosificadoras de Sulfato de Aluminio en solución**

- Uso : Coagulante para el proceso de clarificación de agua.
- Color : Pardo Amarillento.
- Concentración de óxido de Aluminio (% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) = 7.8 - 8.5
- Densidad (gr./ml) : 1.3 - 1.35
- pH = 2.65 - 2.67

#### **Planta N° 2**

- Caudal máximo de inyección = 500 lt/h
- Caudal mínimo de inyección = 100 lt/h
- Potencia mínima = 0.75 HP

Con éstas características se hicieron las verificaciones respectivas.

De acuerdo a los requerimientos necesarios, se eligió una configuración de bomba dúplex con un cabezal de diafragma hidráulico con servomotor y un cabezal de pistón y servomotor.

Las características fueron las siguientes:

#### **Bomba principal con cabezal de diafragma hidráulico**

Marca: Prominent (Alemania)

Modelo : MAKRO TZ 20 HMM 101 90-20 PP

material : Polipropileno.

Precisión : ± 1 % en el rango de 10 a 100 % de la longitud de carrera.

Caudal máximo: 1204 l/h

Presión de operación: 10 bar

Diafragma: Developan, alma de acero vulcanizado con EPDM.

Sellos : Teflón

Conexiones : 1 ½"

Motor : 1.5 kW, 230/400 V, 60 Hz, Trifásico, IP55.

Servomotor: 220 V, 60 Hz, 40 W, IP54, señal analógica de entrada de 0 / 4-20 mA , regulación automática.

**Cabezal secundario de pistón**

Marca : Prominent (Alemania).

Modelo : MAKRO TZ 20 AK 10-60 S

Caudal máximo: 569 l/h

Presión máxima: 11 bar

Precisión :  $\pm 0.5$  % (10 - 100% de longitud de carrera)

Material : Acero inoxidable 1.4571

Sellos : Teflón

Asientos : Acero inoxidable

Conexiones : 1 ½"

Este sistema de Bombas Dúplex permitirá la mejor y más variada combinación de flujos dosificados, cumpliendo con la máxima precisión de dosificación.

La línea de tuberías que se instalarán, se debe tender a partir de la Estación de Reactivos Químicos hasta la Obra de Reparto N°1 y N°2.

La tubería de 1 1/2", es de material PVC, clase 10 pesado.

Luego de instalada la tubería, y acopladas a la bomba y a los accesorios, ésta debe de ser sometida a pruebas de presión de acuerdo a norma, alcanzando presiones internas de 10 bar, para poder verificar que los sellos y empalmes de la instalación se encontraran exentos de fugas.

Cuando se trabaja con reactivos corrosivos y degradantes de estructuras como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico, se debe tener cuidado sobre las instalaciones de concreto, pues estos ejercen un efecto destructivo sobre las instalaciones. Tomando las previsiones de los mismos se recubrirán las instalaciones donde se ubica la bomba dosificadora con un nuevo polímero composite el *CHEMICAL RESISTANT QUARTZ 988*, de la firma Chesterton\*, un compuesto de alto rendimiento, reforzado con cuarzo, diseñado para la protección contra sustancias altamente agresivas, incluyendo ácidos, álcalis y una amplia variedad de solventes orgánicos.

### **6.1.2. Sistema de instrumentación**

La instrumentación corresponde a la medición de caudales de dosificación, turbiedad y pH, los cuales se deben de instalar en los puntos determinados a continuación:

**Medida de caudal de sulfato de aluminio**, ubicados a la salida de cada línea de dosificación, algunos metros antes de la dosificación. Son unidades electromagnéticas que miden en unidades de lt/hr. Esta señal de caudal es retransmitida en miliamperios, la cual sirve para corregir el dato de la dosificación. Estos instrumentos son de la marca TECFLUID modelo FLOMID, con rango de 0 a 1400 lt/hr. Las especificaciones técnicas de el equipo solicitado son las siguientes:

#### **Características técnicas del convertidor**

Protección : IP67

Tensión de alimentación: 220V  $\pm$  10% 50 - 60 Hz

Campo de medida: 0 - 10 m/s.

Precisión de medida:  $\pm$  1 % del valor medido.  $\pm$  0.15 % del valor de la escala

#### **Características técnicas del captador**

Diámetro nominal:

Presión del fluido: 16 bar

Electrodos : Hastelloy C

Alimentación de bobinas : Impulsión de corriente continua.

Conductividad mínima del líquido : Montaje compacto  $> 5 \mu\text{S/cm}$ .



*Fig. 6.3*

La instalación y conexionado del equipo debe tener en cuenta el diámetro del captador a seleccionarse, de tal forma que el final de la escala a medir esté entre 3-4 m/s máximo, lo cual puede variar en otras marcas y modelos.

El caudal inferior deberá ser siempre que le permita la instalación superior a 0.5 m/s.

La velocidad aconsejable de trabajo es de 1 a 3 m/s.

En líquidos con sólidos en suspensión o pastas, es aconsejable trabajar con velocidades entre 3 - 5 m/s en el captador, para evitar las sedimentaciones de las partículas.

El diagrama muestra las velocidades del líquido en función del caudal circulante y del DN captador.

En instalaciones que por razón del caudal a medir, debe montarse un medidor de diámetro inferior al de la tubería, se efectuará dicha reducción siempre con un ángulo inferior a  $8^\circ$  ( $\alpha < 8^\circ$ ). Evitar que las turbulencias falseen las lecturas.

El gráfico muestra la pérdida de presión  $\Delta P$ , para agua  $d = 1 \text{ Kg/l}$  según las diferentes velocidades de circulación del fluido.

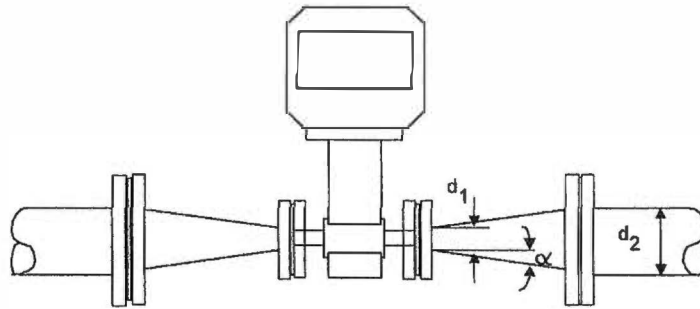


Fig. 6.4

Algunas recomendaciones importantes para el montaje:

Evitar el vacío en las tuberías de conducción, ya que puede producir deformaciones en los productos de revestimiento interior de los captadores.

Una puesta a tierra correcta, constituye la premisa más importante para una medición precisa del caudal.

Se debe asegurar a través de la toma a tierra, que no exista ningún potencial complementario que falsearía las lecturas.

La toma de tierra no debe transmitir tensiones parasitarias, por lo que no debe utilizarse la toma de tierra de otros aparatos eléctricos. Los cables montados en el captador deben estar en contacto conductor con las contrabridas de la instalación.

La resistencia a tierra no deberá ser menor de 10 ohm ( la I máxima del fusible de alimentación es de 250 mA/250V).

Si las tuberías son de PP, PTFE, PVC o material plástico aislante, deberán montarse los anillos o discos metálicos de toma a tierra a ambos lados del captador. No montar el captador con los electrodos en el plano vertical de la tubería 90°. El captador debe estar en todo momento lleno de líquido, sin bolsas de aire.

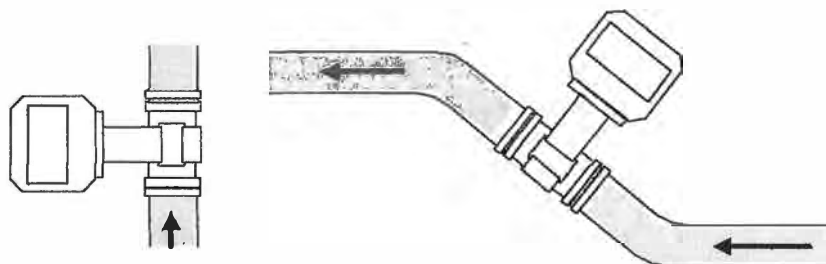
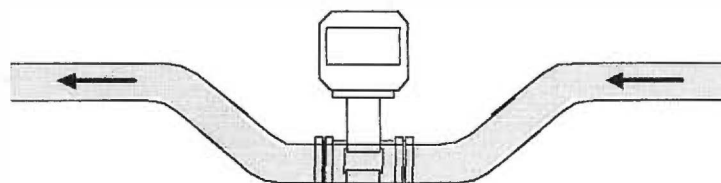


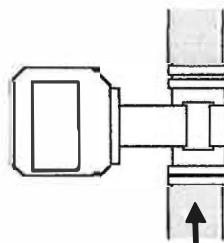
Fig. 6.5

En tuberías parcialmente llenas y con salida libre, montar el captador en un tramo en U para obtener lecturas correctas.



*Fig. 6.6*

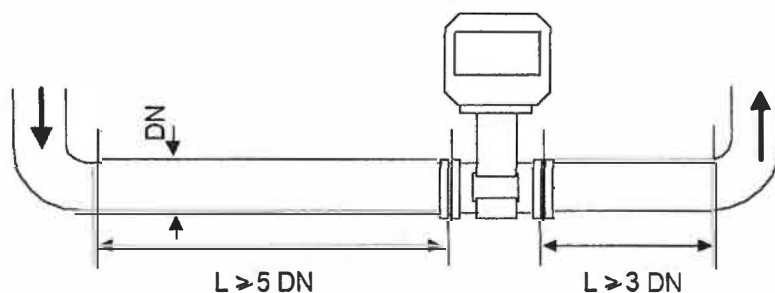
En tuberías verticales líquido ascendente, la influencia de las burbujas de gas es mínima. El error es igual al volumen ocupado por el gas.



*Fig. 6.7*

El montaje del captador debe ser siempre de forma que los electrodos estén en el plano horizontal de la tubería.

Elementos de control y bombas de impulsión deben estar montados a una distancia mínima para una lectura con precisión.



*Fig. 6.8*

No efectuar el montaje en puntos máximos de las tuberías con fácil embolsamiento de aire. Ni tampoco en tramos descendentes con salida libre, pues la entrada de aire es segura y falseará las lecturas.



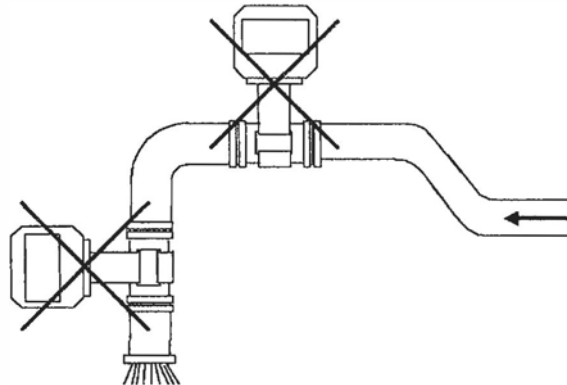


Fig. 6.9

Para líquidos abrasivos o con partículas en suspensión es recomendable instalar el captador en tuberías verticales o inclinadas. En tuberías horizontales es conveniente efectuar el montaje según el esquema y con un sistema de válvulas de limpieza.

**Turbidímetros.** estos instrumentos monitorean permanentemente el valor de la turbiedad que es la medida que nos muestra la eficiencia del proceso de tratamiento de agua. Los instrumentos seleccionados son de la marca HACH, utilizándose el modelo SS6 (para turbiedad de agua cruda, y el modelo 1720C (para turbiedad de agua decantada y filtrada)

#### **Turbidímetro Surface Scatter 6 - Ss6**

Rango : 0 - 9999 NTU

Precisión:  $\pm 5$  % de la lectura 0 - 2000 NTU;  $\pm 10$  % de la lectura, 2000 - 9999 NTU.

Resolución : 0.01 NTU, bajo 100 NTU; 0.1 NTU de 100-999.9 NTU; 1.0 sobre 1000 NTU.

Repetibilidad :  $\pm 1.0\%$  o  $\pm 0.04$  NTU.

Tiempo de respuesta: Tiempo de respuesta inicial en 1.7 minutos. Varía con la velocidad del flujo.

Flujo de muestra: 1.0 - 2.0 L/minuto.

Rango de Temperatura de muestra: 0 - 50 °C

Alarmas : Dos puntos de alarmas programables.

Protección : NEMA 4X.

### **Turbidímetro 1720c**

Rango : 0 - 100 NTU

Precisión:  $\pm 2$  % de la lectura o  $\pm 0.020$  NTU, 0-30 NTU;  $\pm 5$  % de la lectura, 40 - 100 NTU.

Resolución : 0.001 NTU.

Repetibilidad :  $\pm 1.0\%$  o  $\pm 0.002$  NTU.

Tiempo de respuesta: Tiempo de respuesta inicial en 1 minutos.

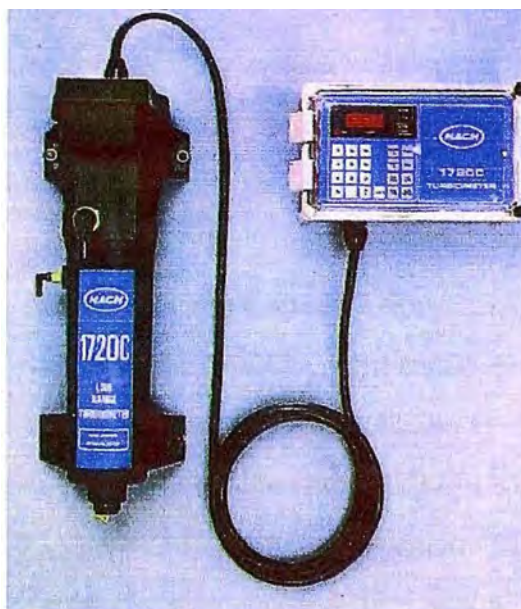
Varía con la velocidad del flujo.

Flujo de muestra: 250 - 750 ml/minuto.

Rango de Temperatura de muestra: 0 - 50 °C

Alarmas : Dos puntos de alarmas programables.

Protección : NEMA 4X / IP66.



*Fig. 6.10*

**Ph-metros**, éstos instrumentos permanentemente nos presentan el estado de una variable importante en la eficiencia del proceso de coagulación-floculación, se encuentran ubicados en el ingreso de agua cruda, salida

promediada de agua decantada y salida de agua filtrada. Son equipos DULCOMETER, de rango de medida de 0-14

Las especificaciones correspondientes a éste equipo son las siguientes:

Display : Backlit dot matrix LCD

Rangos de medición: 0.00 - 14.0 pH

Resolución: 0.01 pH/ 1 mV

Precisión : 0.5 % del rango de medición.

Entrada del electrodo: SN6.

Variable de corrección: Temperatura, vía Pt100

Salida de señal de corriente: mínimo 1 electricamente aislada de 0/4...20mA.

Power supply: 250 V - 3 A.

Protección : IP 54

Sensor de Temperatura: Pt 100, rango: 0...80°C, max. pres: 10 bar, con conector SN6.

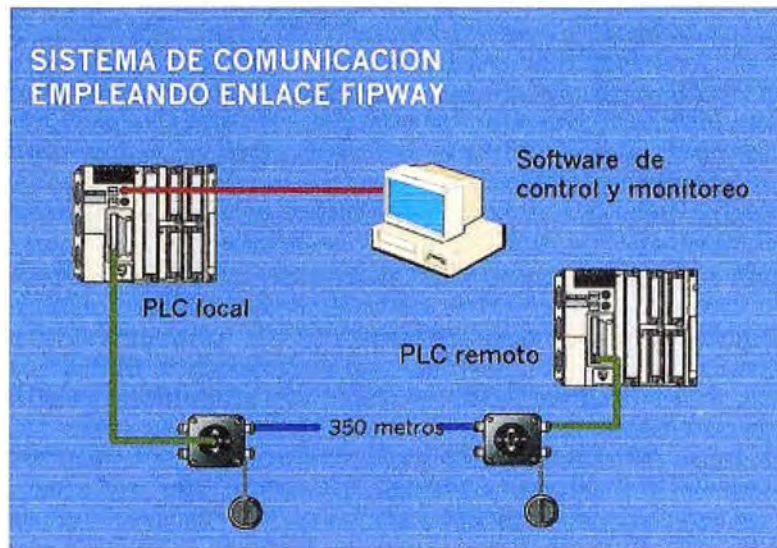
Sensor de medida: de rango mayor o igual a 1..12. De vidrio. Con conector SN6. Diafragma cerámico.

De acuerdo a las normas de instalación eléctrica, todos los instrumentos deberán contar con una toma a tierra, de tal manera que se atenúen las alteraciones en la medida por causa de interferencias electromagnéticas.

#### **6.1.2.1. Instalación del enlace Fipway**

Se implementa un enlace FIPWAY, utilizando un bus de comunicación entre dos PLC, el listado completo de lo utilizado es el siguiente

- 02 PLC, Telemecanique modelo 1730 Micro.
- 02 Tarjeta PCMCIA de comunicación FIPWAY - TSX FPP 20
- 02 Cables par tarjeta-caja de derivación
- 02 Cajas de derivación para red FIPWAY - TSX FP ACC 4
- 01 Cable de comunicación PC-PLC - TSX FP CG 0
- 01 Cable de comunicación doble par trenzado apantallado.



*Fig. 6.11. Representación del enlace fipway implementado, el PLC terminal envía-recibe las señales de los posicionadores y válvulas automáticas.*

### 6.1.3. Sistema de control y monitoreo

La Estación de Control y Monitoreo esta conformada por: 01 computador IBM Pentium con Sistema Microsoft Windows 95 (como mínimo) y mouse instalado, además cuenta con un puerto serial RS232C para la comunicación a la red industrial., 16 Mb de memoria RAM como mínimo, espacio de disco duro de 10 Mb, como mínimo y Controlador de Video Gráfico - VGA o Super VGA.

#### 6.1.3.1. Desarrollo del software SCADA

Se ha considerado el software P-CIM propiedad de la firma AFCON de Israel. El P-CIM para Windows es una poderosa herramienta de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA) que permite proveer de alarmas, monitoreo de eventos, también como de adquisición de información, análisis y presentación.

P-CIM para Windows corre sobre computadoras IBM o compatible y esta conectado a varios Controladores Lógicos Programables (PLCs) y otros aparatos periféricos. No se requiere ningún hardware especial.

P-CIM permite generar aplicaciones para los requerimientos que demandan los ingenieros de planta, operadores, supervisores y gerentes.

Se pueden construir aplicaciones en representaciones gráficas dinámicas de casi todo proceso de manufactura, cuando la aplicación se encuentra trabajando, el operador observa la información sobre los displays que se diseñan previamente y da instrucciones operacionales simples y flexibles, dentro de los parámetros que el usuario determina.

El incremento de la productividad del sistema se logra por diferentes maneras:

Adquisición de Data en tiempo real, procesamiento y almacenamiento. Se consigue puesto que el software reconoce instantáneamente el estado de la operación del proceso. Presentando valores en la pantalla en tiempo real y generando registros.

Interacción *On-line* y decisión. El software permite al personal de planta ejecutar control operacional crítico y cambios en el proceso (permite acceso de acuerdo a un nivel jerárquico programable).

Auto-acciones preconfiguradas. Se puede programar acciones a ser ejecutadas automáticamente como resultado de otras acciones.

Seguimiento y registro, ya que el software lleva automáticamente un registro histórico de las actividades del operados las cuales son almacenadas en memoria para después poder generar reportes impresos de los mismos.



*fig. 6.12 - Acción del P-CIM*

La configuración del sistema incluye el desarrollo de una imagen detallada o simplificada del sistema a monitorear (template), donde se puedan observar la estación dosificadora y los diferentes instrumentos a ser monitoreados.

Este *template* requiere ser dibujado por una herramienta gráfica con la que cuentan los diferentes softwares SCADA u otro compatible, para nuestro caso se utilizó el *Micrografx Draw for Windows. release 3.0.*, el cual puede ser importado directamente al P-CIM para la configuración de los objetos a monitorear o a controlar.

Una vez inserto el template en el P-CIM, se comienza a configurar el estado de animación que se quiere obtener, por ejemplo, los datos que queremos se nos presenten en la pantalla, los cuales fueron los siguientes:

1. Estado de actividad de las bombas dosificadoras.
2. Lectura de caudales de dosificación de reactivos

3. Lectura de datos de turbiedad, pH y temperatura.
4. Visualización de tablero de control de bombas dosificadoras.
5. Una opción para obtener mensajes desde Laboratorio.

La configuración determina textos y botones (*Actiobuttons*). Luego se llevan estos dibujos configurados a la herramienta del software denominado *Operador Workstation* donde realmente trabajará para ser visualizado por los operadores o por otro personal de la planta.

De acuerdo a los requerimientos de este software en particular se debe configurar el enlace del software con el PLC por medio de un drive adecuado de acuerdo a la marca del PLC, esto es muy importante. Se configuran los displays que aparecerán en la pantalla del PC y aquellos que tendrán caracteres animados, esto está bien indicado en los manuales y varía de software a software. El enlace se realiza de acuerdo a las direcciones del PLC, las cuales se asignan a palabras internas del PLC, las cuales a su vez son las direcciones que se ubicarán en el software P-CIM.

## 6.2. Economía de la instalación

El costo de la instalación se ha determinado por medio de sondeo de mercado y configuraciones óptimas proveídas por los distribuidores locales.

### Sistema de instrumentación

<b>Item</b>	<b>Cant</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio unid. (US\$)</b>	<b>precio total (US\$)</b>
01	04	Turbidímetros HACH modelo 1720C	4500.00	18 000.00
02	02	Turbidímetros HACH modelo SS-6	4500.00	9000.00
03	06	pH-metros DULCOMETER	2 500.00	15 000.00
04	02	Medidor de Caudal electro- magnético	1 500.00	3 000.00
<b>TOTAL</b>				<b>45 000.00</b>



**Sistema de dosificación**

<b>Item</b>	<b>Cant</b>	<b>Descripción</b>	<b>precio unid. (US\$)</b>	<b>precio total (US\$)</b>
01	02	Bombas dosificadoras dúplex de membrana, marca PROMINENT. Con dos cabezales de dosificación Servomotor eléctrico con 1 salida y 1 entrada 4-20 mA.	12 000.00	24000.00
02	02	Reguladores de pulsación (dampers) modelo 517-0412M01 con diafragma de separación de 2.5 litros de capacidad .	8000.00	16000.00
03	02	Válvula retenedora de presión , modelo 525-1223 Ajuste aprox. 3 bar.	922.00	1 844.00
04		Tubería PVC - norma industrial para trabajo pesado.	1 500.00	1 500.00
<b>TOTAL</b>			<b>43 344.00</b>	

**Sistema de control, monitoreo y adquisición de datos**

<b>Item</b>	<b>Cant</b>	<b>Descripción</b>	<b>precio unid. (US\$)</b>	<b>precio total (US\$)</b>
01	02	Controlador Lógico Programable marca TELEMECANIQUE modelo 1720	1 500.00	3 000.00
02	02	Tarjeta PCMCIA para TSX Micro para comunicación FIPWAY TELEMECANIQUE modelo TSX FPP 20	550.00	1 100.00
03	02	Caja de derivación TELEMECANIQUE modelo TSX FP ACC 4	80.00	160.00
04	02	Cable de Conexión Tarjeta PCMCIA y Caja de derivación (3 metros) TELEMECANIQUE modelo TSX FP CG 030	75.5	151.0
05	02	Final de línea TELEMECANIQUE modelo TSX FP ACC 7	23.00	46.00
06	01	Cable de programación interface PLC-Computador TELEMECANIQUE modelo	200.00	200.00
07	01	Cable principal ,	300.00	300.00

		1 par trenzado blindado. 200 mt.		
		TSX FP CA 200		
08	01	Computador IBM compatible Pentium II - Con entorno Windows incorporado.	1 500.00	1 500.00
09	01	Impresora gráfica.	250.00	250.00
10	01	Software SCADA marca: P-CIM de AFCON - Israel de 32 puntos.	3 500.00	3 500.00
<b>TOTAL</b>				<b>53 551.00</b>

### Ingeniería

Item	Cant	Descripción	precio unid. (US\$)	Precio total (US\$)
01		Desarrollo de Interfase de Usuario Gráfico	2 000.00	2 000.00
02		Programación de Controladores	2 000.00	2 000.00
02		Ingeniería de Detalle	2 000.00	2 000.00
03	03	Costo de mano de obra.	5 000.00	5 000.00
<b>TOTAL</b>				<b>11 000.00</b>

**COSTO TOTAL DEL PROYECTO: 152 895.00**

## 7 CONCLUSIONES

1. Se demuestra con lo expuesto la factibilidad de la instalación prevista, si bien el costo de la misma puede ser elevado, esta se ve justificada por la *eficiencia de la instalación, el periodo de utilización y la competencia tecnológica de la misma.*
2. Con el sistema mostrado se obtiene una configuración bastante versátil, capaz de ser acondicionado a sistemas de control implementados dentro de diversas operaciones unitarias de la *Ingeniería Química.* El monitoreo y control por computadora provee de una herramienta de producción interrumpida, capaz de ser utilizada por los ingenieros de planta así como del personal administrativo.
3. El uso de PLC, permitirá obtener ventajas de la tecnología de los microprocesadores y acceso a sistemas de control distribuido.
4. El análisis de históricos permitirá el estudio de los procesos durante su operación permitiendo a los ingenieros e investigadores hacer mejoras al proceso y optimizar sobre bases experimentales.
5. La simulación por CAD permite una imagen pictórica real del sistema, reproduciendo en imágenes 3D a escala la instalación a implementarse, *previniendo muchos de los imponderables que se presentan durante una instalación industrial,* esto conlleva a un ahorro de tiempo y dinero en la etapa de desarrollo de la instalación.
6. El mantenimiento del sistema tiene una gran importancia, para lo cual se debe planificar el recambio de las partes perecibles como en el caso de los

electrodos de pH y de la realización de los pasos de mantenimiento recomendados por los fabricantes de los instrumentos a implementar.

## 8 RECOMENDACIONES

1. La adquisición del producto debe ser regido por Especificaciones comerciales y técnica muy claras en donde se consigne el valor de reacción del *principio activo* y se tenga en cuenta el peso del producto y el costo de su transporte al lugar de uso y el sistema y costo de las operaciones de adición, todo lo que merece un estudio previo particular para determinar una especificación de compra clara y precisa que no admita dudas posteriores en la negociación.
2. Es también muy recomendable mantener un control muy cercano de la reacción del sulfato de aluminio con el agua no solo para lograr una *floculación eficiente* sino también para evitar residuos en el agua tratada. El sulfato de aluminio es una sustancia anfotérica es decir que su mayor rendimiento coagulante tiene lugar a un determinado pH. A mayor acidez o basicidad el sulfato de aluminio se disuelve en el agua. En estas circunstancias parte del producto puede pasar a otras instalaciones de la planta y aún al sistema de distribución. En la ciudad de Bogotá en la Planta de Tibitó tuvo lugar este fenómeno y pocos años después de la inauguración, la tubería principal de gran diámetro de alimentación a la ciudad comenzó a perder capacidad.
3. Después de acuciosa investigación se llegó al descubrimiento que el sulfato de aluminio (no bien controlada) pasaba a la red y que el exceso que quedaba del tratamiento se fue depositando en la tubería, disminuyendo de esta manera su diámetro y por ende su capacidad.

4. Dentro de la parte mecánica, la bomba dosificadora, como elemento principal en el sistema dosificador, requiere una muy bien establecida configuración, siendo las mejores aquellas que cuentan con un extremo de impulsión formado por pistones o émbolos que pueden desarrollar precisiones extremas de dosificación ( $\pm 0.5$  % de precisión) con respecto a las de diafragma ( $\pm 2$  % de precisión), lo cual permite trabajar con rangos de dosificación más amplios sin notar oscilaciones importantes a flujos menores. Una buena opción para rangos amplios (0-1500 l/hr) es trabajar con configuraciones de pistón y diafragma integrados en una bomba duplex. Sin embargo con respecto a las bombas de diafragma, las de pistón resultan en un costo superior, lo cual debe considerarse seriamente. De todas formas es muy importante la coordinación con los fabricantes para no equivocarse en la determinación de curvas experimentales.
5. Definitivamente una buena y flexible configuración de diafragmas y émbolos asociados a bombas dúplex pueden resultar en una combinación práctica de capacidades que puede resultar beneficiosa para rangos amplios de dosificación (configuraciones de pistón o diafragma hidráulicamente actuado en capacidades de dosificación bajas y configuraciones de diafragma actuado mecánicamente en dosis elevadas).
6. Los sistemas eléctricos y electrónicos requerirán de un mantenimiento periódico, rutinario y simple, el software a implementarse puede ser escalado de tal forma que pueda ser integrado a plataformas mayores, como por ejemplo redes administrativas de los sistemas de control integral de la planta.
7. El enlace FIPWAY permitirá un monitoreo y control a distancias de aproxim. 400 metros evitando el trabajo de los operadores de aforar la salida de la bomba y a la vez controlar la carrera de la bomba para obtener

el flujo correcto de dosificación, trabajo que puede emplear varios minutos u horas de acuerdo a la capacidad de estabilización del flujo. El monitoreo en tiempo real del sistema permitirá la toma de decisiones de manera puntual y precisa.

8. La posibilidad de integrar datos no solamente pertenecientes al sistema dosificador sino de señales conexas como temperaturas, pH, turbiedad, permitirá una manipulación integral de este segmento dentro del proceso de potabilización.
9. El software permite almacenar la información de la operación de los equipos y sensores bajo la forma de históricos y gráficos, evitando trabajos manuales bastante tediosos, además que el uso del reactivo puede presentar un comportamiento estacional cíclico (datos que proporciona el histórico), permite pronosticar la demanda de reactivo para periodos subsecuentes.
10. La estructura de control de PLC es abierta de forma que se pueden integrar más bombas a manera de elevar la capacidad del sistema, existiendo aun mayores posibilidades si se tiene en cuenta la posibilidad de implementar módulos de I/O remotos, lo que sería un desarrollo alternativo basado en una arquitectura un tanto diferente.
11. Es importante notar que la tendencia a la implementación de sistemas SCADA dentro de Plantas de Tratamiento de Agua y otras de Procesos industriales se ha ido incrementando constantemente, convirtiéndose en una práctica de ingeniería muy acorde a nuestros tiempos, por lo tanto, el establecimiento y estudio de sistemas SCADA debe de merecer la atención de todos los profesionales comprometidos con el control y supervisión de procesos de la industria en general.

## 9. BIBLIOGRAFIA

1. *Manual Técnico del Agua*, editado en 1978, DEGREMONT ( 92508 Ruel-Malmaison CEDEX- France)
2. *Acondicionamiento de aguas para la industria*, SHEPPARD T. POWELL, edición española, 1966 (Editorial LIMUSA-WILEY)
3. *Pressure and Temperature Measurement*, WIKA HANDBOOK, edición en inglés, 1995 (WIKA Alexander Wiegand GmbH&Co. Alexander Wiegand Strabe, 63911 Klingenberg, Germany)
4. *Bombas, selección, uso y mantenimiento*. KENETH McNAUGHTON, edición española, 1986. (Mc Graw Hill / Interamericana de México S.A)
5. *Especificaciones Técnicas del Centro de Supervisión Automatizado de la Planta de La Atarjea* , SEDAPAL, CSA-01-96. Abril 1996.
6. *Products for Analysis*, HACH, 1998 . Catalog HACH Company . P.O. Box 608, Loveland, Colorado USA 80539-0608.
7. *Automatismos Programable Industriales*, TSX Micro-TSX Nano, TELEMECANIQUE, 1998. Catálogo by Schneider Electric E.P. Av. Brigadeiro Faria Lima, 2003 - 15e A. CEP 01451-001 - Sao Paulo SP - Brasil.
8. *Programmable Controllers-Operation and Application*, IAN G. WARNOCK, Prentice Hall, edición. 1992.



9. *P-CIM for Windows - User's Manual, MNL-301 Rev. G*, AFCON CONTROLS, April 1996. AFCON CONTROL AND AUTOMATION INC. 1014 E Algonquin Road, Ste. 102, Schaumburg IL.60173.
10. *Calibration and Troubleshooting of pH Loops*, July 20 1989, TBI BAILEY CONTROLS (TBI Bailey Controls- 2175 Lockheed Way, Carson City, NV 98706 - USA)
11. *ABB Magazine*, ABB, 1997. Published by ABB Kent plc. Edited and produced in conjunction with The Red Group, 15 Canada Close, Banbury OX16 7RT, Printed in England by Lithomaster, Warwick.

