



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

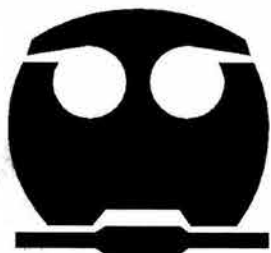
**“ INSTRUMENTACIÓN PARA LA MEDICIÓN Y
CONTROL
DE VARIABLES EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO
DE AGUA PARA USO INDUSTRIAL ”**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

P R E S E N T A :

DANIEL ORTEGA CANALES



**EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUÍMICA**

MÉXICO, D.F.

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado:

| | |
|------------|-------------------------------|
| Presidente | Prof. Alejandro Anaya Durand |
| Vocal | Prof. Baldomero Pérez Gabriel |
| Secretario | Prof. Juan José Ruiz López |
| 1er sup. | Prof. Ramón Ramírez Martinell |
| 2do sup. | Prof. Fulvio Mendoza Rosas |

Sitio donde se desarrolló el tema

2do. Piso Torre de Ingeniería
Cd. Universitaria


Ing. Mec. Elec. Juan José Ruiz López
Asesor del tema


Daniel Ortega Canales
Sustentante

Bajo el marco de alborozo y satisfacción que cubre éste escrito, le expreso el mayor de mis agradecimientos, la mayor de mis gratitudes a Dios, por todo lo que su nombre representa:

"Ciertamente te ensalzaré, oh mi Dios el Rey,
y ciertamente bendeciré tu nombre hasta tiempo indefinido,
aún para siempre.
Todo el día te bendeciré, si,
y ciertamente alabaré tu nombre hasta tiempo indefinido,
aún para siempre".
(Salmo 145)

RECONOCIMIENTOS.

Séneca, ilustre personaje romano del primer siglo escribió: "*no hay viento favorable para quien no tiene puerto a donde llegar*". En víspera de exponer el presente trabajo como examen profesional, me es grato expresarles a Mamá y Papá que su objetivo finalmente se ha cumplido: pueden considerarse exitosos porque sus desvelos, carencias y oraciones llegan al término que ellos planearon.

Papá y Mamá:

Seguramente se acordarán de aquella carta que escribí hace muchos años en la escuela primaria (para ser exactos 3er grado); pues bien, a pesar de la distancia en el tiempo que nos separa ahora, la presente tiene la intención de re-escribir aquellos pensamientos en sus corazones: que los amo y que para mí son lo máximo, por lo que siempre me han dado y por el gran esfuerzo que sobre sus hombros pusieron ambos, cuando decidí iniciar ésta aventura. Por favor, hagan suyas de mi para ustedes las palabras de Números 6:24-25.

Rosario, Adriana y Ulises:

Mis niños pequeños, la dedicación y empeño con que hacen las cosas, y la cooperación y unidad para constituir nuestra familia, me han inspirado siempre para continuar adelante, para lograr empresas que en su momento se postraron vencedoras y para demostrarme que todo tiene sentido y razón de ser: ustedes.

Le doy las gracias a mis tíos Porfirio y Lourdes por su ayuda al principio de esta aventura; les reitero mi admiración por el ejemplo de tenacidad y superación que siempre han sido.

A mi abuelita María por su cariño y preocupación que siempre ha tenido para conmigo en todo momento.

A mi abuelita Luisa por sus cuidados y por todo lo que aprendo de ella.

De manera particular, me resulta gozoso hablar del gran aprecio y gratitud que siento hacia mis tíos Víctor y Andrea, en cuya casa me sentí feliz en los años de 1998 y 1999, y de cuya mesa siempre compartieron conmigo, ¡que Jehová les siga bendiciendo por siempre!

Para mi tío Alejandro y mi tía Mari es recíproco el sentimiento, les expreso mi agradecimiento y aplaudo su altruismo, bondad y amor, y quiero que sepan que nunca, nunca me olvido de todo lo que me dieron.

A mi tío Eligio y mi tía Marcela, a mis primos Jeset, Noemí y Josué también les agradezco su apoyo, ¡mil gracias!

Mis amigos:

Ing. José Antonio Ortiz Ramírez, por la oportunidad que me dio y el apoyo que me brindó.

Marcos Álvarez Pimentel, por las ideas y aportaciones.

Oscar Flores Cadena, por su ayuda y apoyo en la manufactura de la tesis.

Ing. Juan José Ruiz López –mi asesor de tesis-, por el tiempo y la paciencia dedicada.

Don José, por la inspiración.

México, D.F., Noviembre de 2004.

Pienso en Nelly, a quien todos extrañamos,
y especial es la dedicatoria para ella, porque
tenemos la certeza de volverla a ver muy
pronto. (Rev. 2:10, Jn. 5:25-28,29, Isa 25:8,
Rev. 21:4).

Contenido

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS..... | 4 |
| 3. PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA..... | 13 |
| 3.1. Generalidades..... | 14 |
| 3.2. Desinfección..... | 20 |
| 3.2.1. Desinfección por cloración..... | 20 |
| 3.2.2. Desinfección por rayos ultravioleta..... | 23 |
| 3.3. Pretratamiento (coagulación y floculación)..... | 25 |
| 3.4. Filtración..... | 28 |
| 3.5. Adsorción con carbón activado..... | 33 |
| 3.6. Desmineralización..... | 34 |
| 3.7. Tratamiento de lodos..... | 37 |
| 3.8. Separación de grasas y aceites..... | 39 |
| 4. MEDICIÓN DE VARIABLES DE PROCESO..... | 41 |
| 4.1. Concepto de medición..... | 42 |
| 4.2. Medición de flujo..... | 44 |
| 4.3. Medición de nivel..... | 56 |
| 4.4. Medición de presión..... | 63 |
| 4.5. Medición de temperatura..... | 66 |
| 4.6. Mediciones analíticas..... | 73 |
| 5. CIRCUITO BÁSICO DE CONTROL..... | 80 |
| 5.1. Control de dos posiciones..... | 81 |
| 5.2. Control proporcional..... | 82 |
| 5.3. Control proporcional-integral..... | 84 |
| 5.4. Control proporcional-integral-derivativo (PID)..... | 86 |

| | |
|---|------------|
| 5.5. Diagrama de bloques Feedback o Retroalimentado..... | 87 |
| 5.6. Diagrama de bloques Feedforward o Prealimentado..... | 88 |
| 6. SIMBOLOGÍA UTILIZADA EN INSTRUMENTACIÓN..... | 95 |
| 6.1. Instrumentación requerida para controlar el proceso..... | 105 |
| 6.2. Índice de líneas..... | 133 |
| 6.3. Índice de instrumentos..... | 144 |
| 7. CONCLUSIONES..... | 158 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 161 |
| DEFINICIÓN DE TÉRMINOS..... | 164 |
| ANEXO A. DIAGRAMAS DE TUBERÍAS E INSTRUMENTACIÓN..... | 170 |

Indice de tablas

| | |
|---|-----|
| Tabla 3.1. Sustancias presentes en el agua cruda..... | 15 |
| Tabla 3.2. Tratamientos de agua dependiendo el tipo de impurezas presentes..... | 19 |
| Tabla 3.3. Aspectos de una buena desinfección con gas cloro. | 22 |
| Tabla 3.4. Dosificación de sulfato de aluminio en función de la turbidez..... | 26 |
| Tabla 3.5. Mecanismos de remoción en un filtro..... | 28 |
| Tabla 3.6. Arreglos en sistemas de desmineralización. | 37 |
| Tabla 4.1. Capacidades de placas de orificio..... | 48 |
| Tabla 4.2. Capacidades de flobar para líquidos, gases y vapor..... | 51 |
| Tabla 4.3. Capacidades de elementos tipo turbina..... | 52 |
| Tabla 4.4. Selección del recubrimiento para medidores de flujo tipo magnético. | 53 |
| Tabla 4.5. Características y aplicaciones de elementos primarios de medición de flujo. | 55 |
| Tabla 4.6. Características y aplicaciones de sistemas termales llenos. | 69 |
| Tabla 4.7. Características y aplicaciones para sistemas de medición eléctricos. | 71 |
| Tabla 4.8. Actividad de iones hidrógeno. | 77 |
| Tabla 4.9. Comparación de técnicas de medición analíticas..... | 79 |
| Tabla 6.1. Descripción de corrientes en un DFP de tratamiento de agua. | 101 |
| Tabla 6.2. Características presentes en DFP's y DTI's típicos..... | 105 |
| Tabla 6.3. Combinación de letras para identificación de instrumentos. | 109 |
| Tabla 6.4. Letras para la identificación de instrumentos. | 110 |
| Tabla 6.5. Instrumentación requerida en los DTI's 01, 02, 03 y 04..... | 111 |
| Tabla 6.6. Simbología de instrumentación. | 112 |
| Tabla 6.7. Simbología miscelánea..... | 113 |
| Tabla 6.8. Simbología de equipo para los DTI's 01, 02, 03 y 04. | 116 |
| Tabla 6.9. Simbología de válvulas..... | 116 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura. 3.1. Balance típico de agua..... | 16 |
| Figura. 3.2. Dispositivo de Luz Ultravioleta. | 23 |
| Figura 3.3. Modelo de clarifloculador circular..... | 27 |
| Figura 3.4. Modelo de clarifloculador rectangular. | 27 |
| Figura 3.5. Operación de un filtro rápido convencional de arena..... | 29 |
| Figura 3.6. Tipos de filtros de acuerdo a la dirección del flujo. | 30 |
| Figura 3.7. Medios de filtración. | 30 |
| Figura 3.8. Filtrado lento. | 31 |
| Figura 3.9. Filtrado rápido..... | 31 |
| Figura 3.10. Filtro tipo cartucho..... | 32 |
| Figura 3.11. Filtro prensa típico. | 38 |
| Figura 3.12. Operación de un filtro prensa típico..... | 38 |
| Figura 3.13. Separador de placas corrugadas CPI. | 39 |
| Figura 3.14. Separador DAF..... | 40 |
| Figura 3.15. Separador IAF/IGF..... | 40 |
| Figura 4.1. Circuito de control típico..... | 43 |
| Figura 4.2. Balance de materia para la ecuación de continuidad..... | 44 |
| Figura 4.3. Balance de energía para 2 puntos de un fluido..... | 46 |
| Figura 4.4. Placa de orificio..... | 47 |
| Figura 4.5. Tobera de flujo. | 48 |
| Figura 4.6. Tubo Venturi. | 49 |
| Figura 4.7. Pérdida de presión para elementos primarios de medición de flujo. | 49 |
| Figura 4.8. Flobar. | 50 |
| Figura 4.9. Cuña. | 52 |
| Figura 4.10. Turbina. | 52 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.11. Medidor de flujo tipo magnético..... | 53 |
| Figura 4.12. Rotámetro..... | 54 |
| Figura 4.13. Medidor de presión hidrostática..... | 57 |
| Figura 4.14. Medición de nivel por carga hidrostática..... | 58 |
| Figura 4.15. Caja de diafragma..... | 58 |
| Figura 4.16. Purga o tubo de burbujeo..... | 58 |
| Figura 4.17. Balance de fuerzas con diafragma..... | 59 |
| Figura 4.18. Indicador de nivel operado por flotador de cadena..... | 60 |
| Figura 4.19. Indicador de nivel operado por flotador tipo magnético..... | 60 |
| Figura 4.20 Indicador de nivel de fuelles operado por flotador..... | 60 |
| Figura 4.21 Medición de nivel con sistema del tipo desplazador..... | 61 |
| Figura 4.22. Detección de nivel con electrodos..... | 61 |
| Figura 4.23. Medición de nivel con triodo..... | 62 |
| Figura 4.24. Amplificador magnético..... | 62 |
| Figura 4.25. Medición de nivel de tipo sónico..... | 62 |
| Figura 4.26. Relación entre presiones manométrica y absoluta..... | 63 |
| Figura 4.27. Bourdon tipo C..... | 64 |
| Figura 4.28. Bourdon tipo espiral..... | 64 |
| Figura 4.29. Bourdon tipo helicoidal..... | 64 |
| Figura 4.30. Elemento de diafragma..... | 65 |
| Figura 4.31. Elemento de fuelle..... | 65 |
| Figura 4.32. Sistema de tipo termal lleno..... | 69 |
| Figura 4.33. Termopar..... | 70 |
| Figura 4.34. Relación de valores temperatura-fem para termopares estándar..... | 71 |
| Figura 4.35. Bulbos de resistencia..... | 72 |
| Figura 4.36. Celda de conductividad..... | 75 |
| Figura 4.37A. Electrodo de medición..... | 77 |
| Figura 4.37B. Electrodo de referencia..... | 77 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.1. Acción de algoritmo de control de dos posiciones. | 81 |
| Figura 5.2. Acción de algoritmo de control de dos posiciones con zona diferencial. | 82 |
| Figura 5.3. Algoritmos de control proporcional. | 83 |
| Figura 5.4. Control proporcional con banda proporcional fija y diferentes puntos de ajuste. | 84 |
| Figura 5.5. Control proporcional-integral. | 85 |
| Figura 5.6. Acción proporcional-derivativa. | 87 |
| Figura 5.7. Control de temperatura con retroalimentación en un intercambiador de calor. | 87 |
| Figura 5.8. Diagrama de bloques de circuito de control con retroalimentación. | 88 |
| Figura 5.9. Diagrama de bloques de circuito de control prealimentado. | 89 |
| Figura 5.10. Diagrama de bloques de circuito de control prealimentado-retroalimentado. | 90 |
| Figura 5.11. Diagrama de bloques de circuito de control en cascada. | 90 |
| Figura 5.12. Diagrama de bloques de sistema de control de pH con retroalimentación. | 91 |
| Figura 5.13. Diagrama de bloques de sistema de control de pH con prealimentación-retroalimentación. | 92 |
| Figura 5.14. Control de flujo ratio. | 92 |
| Figura 5.15. Diagrama de bloques de sistema de control de pH con prealimentación-retroalimentación y control cascada. | 94 |
| Figura 6.1. Diagrama de bloques del sistema de tratamiento de agua. | 98 |
| Figura 6.2. Diagrama de flujo de proceso de pretratamiento de agua. | 102 |
| Figura 6.3. Diagrama de flujo de proceso de filtración de agua y tratamiento de lodos. | 103 |
| Figura 6.4. Diagrama de flujo de proceso de desmineralización de agua, adsorción con carbón activado y tratamiento de aceites. | 104 |
| Figura 6.5. Conflicto entre controles de flujo y nivel. | 106 |
| Figura 6.6. Armonía entre controles de flujo y nivel. | 106 |
| Figura 6.6A. Símbolo clásico de bomba centrífuga. | 107 |
| Figura 6.6B. Símbolo de bomba centrífuga para DTI. | 107 |
| Figura 6.7. Desarrollo de un símbolo para una bomba tipo sumergible. | 107 |



1. INTRODUCCIÓN.



El agua cubre casi un 80% de la superficie de la tierra. Aunque pareciera que es un recurso muy abundante, es importante destacar que solo el 3% de ésta es agua dulce, es decir, apta para usos domésticos, industriales o comerciales. Además, el creciente desarrollo industrial y la diversificación de los procesos utilizados en la atmósfera tecnológica han hecho que un sinnúmero de químicos y residuos de sustancias, junto con una gran cantidad de materia orgánica sean dispuestos en los cursos normales de agua, depositándose en lagunas, lagos, ríos y mares. Por lo anterior, se ha hecho indispensable el diseño de sistemas encargados de tratar esta agua, con el objetivo de obtener una calidad propia para el consumo humano y para usos industriales.

La concepción del presente trabajo surge de lo expuesto líneas arriba; la pretensión es describir una estrategia genérica y global para el tratamiento de un agua, partiendo de premisas operacionales básicas y esquemas clave, referidos en campo y en la literatura.

Bajo el tenor de que los patrones de distribución son en el mayor de los casos similares, se tratará de bosquejar una estructura y una serie de conceptos, que puedan ser de utilidad para casi cualquier aplicación, en los procesos industriales que contemplen agua como parte de su arreglo operativo.

La selección del tratamiento que se le va a dar al agua, es el primer paso a seguir; para ello, es importante conocer la caracterización de la o las corrientes involucradas, ya que ello definirá en primera instancia las técnicas o tipos de tecnologías a aplicar; también es menester definir de entrada, la calidad de agua post-tratamiento, lo cual será consecuencia de los requerimientos de cada uno de los usuarios.

Fundamental, como en todo proceso operacional confiable que se jacte de serlo, es la adecuada medición de las variables implicadas; así, el esquema de trabajo contempla un análisis de las variables a medir y de los equipos a utilizar; posterior a esto, resulta necesario establecer el control óptimo de estas variables.

En el capítulo 2 se comienza con las bases históricas de la medición y control de variables, describiéndose la evolución de la instrumentación a través de los años, desde la posible invención de la válvula en 300 A.C. en Alejandría, hasta el desarrollo del PLC y el uso del control distribuido como herramientas para la medición y control actuales de las variables en las plantas químicas.

El tercer capítulo contempla una descripción de lo que es un tratamiento típico de agua para su uso industrial; se tiene, como se ha dicho anteriormente, que en la mayoría de plantas químicas y refinerías se sigue un patrón similar en la distribución que se le da al agua y por tal razón, los métodos propuestos para los tratamientos también tienen estándares establecidos que, dependiendo de las condiciones de flujo y parámetros químicos presentes, se deben seleccionar; así, como primer aspecto, el agua que entra a la planta proveniente de una fuente natural tal como un río o mar, presenta una gran cantidad de materia suspendida y materia disuelta, materia orgánica procedente de la lluvia y el suelo además de herbicidas e insecticidas, materia inorgánica tal como iones de calcio y magnesio, y cantidades enormes de bacterias y microorganismos patógenos. Los sistemas sugeridos para la eliminación de estos 4 tipos de contaminantes comprenden la desinfección mediante cloro gas, luz ultravioleta y ozono entre otros, la implementación de un pretratamiento para la separación por decantación de sólidos suspendidos, la eliminación de sólidos suspendidos por medios filtrantes, eliminación de iones por procesos de intercambio iónico tales como desmineralización, acondicionamiento del agua para consumo humano y tratamiento de lodos y sistemas de separación y recuperación de grasas y aceites.

En los capítulos 4 y 5 se describe lo correspondiente a la medición y control de variables implicadas en el proceso de tratamiento de agua; el capítulo cuatro detalla lo concerniente a la medición de flujo, medición de nivel, medición de presión, medición de temperatura y mediciones analíticas. Se pretende describir de forma amplia cada uno de los sistemas, con las condiciones teóricas implicadas y con los aspectos técnicos y funcionamiento de los equipos, para que la selección del instrumento sea la más adecuada. Una vez definido el sistema que hará la medición de la variable a controlar, resulta necesario sentar las bases del control y las rutas para adecuación o ajustes que se requieran hacer para mantener en nivel óptimo el funcionamiento de la planta; en el capítulo 5 se enfatizan los controles con retroalimentación y controles pre-alimentados, como estrategias a seguir para correcciones de los puntos de ajuste y compensaciones debido a disturbios ocasionados en las variables de proceso.



Una vez generada la estructura básica consistente en el conocimiento del proceso y los elementos para medir y controlar las variables involucradas, procede hacer el bosquejo que describa la "instrumentación para la medición y control de variables en una planta de tratamiento de agua para uso industrial." Este boceto es lo que se conoce como Diagrama de Tuberías e Instrumentación o "DTI" y es en el capítulo 6 en donde se planea la incorporación de estos planos, junto con el índice correspondiente a las líneas y a los instrumentos plasmados en dichos dibujos.

Finalmente, se dedica una sección para conclusiones y otra para plasmar la bibliografía utilizada como apoyo para el desarrollo de la tesis.



2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS.



Desde los comienzos de la humanidad, los esfuerzos por la supervivencia y el dominio de la tierra han dependido de la habilidad para desarrollar los 5 sentidos, el lenguaje y sobre todo, el ingenio. Desde entonces, el progreso de la civilización se ha hecho posible en gran parte por la segregación de estas capacidades básicas. Así, las necesidades en paralelo con los avances tecnológicos, han crecido en gran manera durante los últimos 100 años. Los procesos industriales se han vuelto más grandes y más complejos, las materias primas y la energía han incrementado los costos de los productos y las presiones para reducir gastos en los costos de operación se han hecho cotidianas. Sin lugar a dudas, el siglo XX ha sido el siglo de los especialistas del control, cuya habilidad para automatizar y optimizar parámetros críticos ha contribuido al éxito de las industrias que mueven nuestra creciente civilización global.

Retrocediendo en la historia de los procesos industriales, en las primeras plantas químicas había una gran cantidad de operadores, quienes vigilaban los indicadores y manipulaban las válvulas; de hecho, la operación completa de la planta se realizaba mediante ir apuntando en pizarras los parámetros principales para cada una de las áreas y así, en los lapsos de tiempo de recolección de resultados, los operadores calculaban los ajustes necesarios para válvulas, compuertas y demás unidades para aplicarlos en corridas posteriores. Con esto, cada operador iba desarrollando una capacidad empírica para el proceso, y los supervisores tenían el reto de coordinar a los muchos operadores para que la planta se manejara correctamente y del mismo modo siempre.

Es en 1900 cuando aparecen los primeros controladores neumáticos, los cuales se conectaban directamente al proceso que se deseaba controlar. Cada controlador tenía un sensor neumático que medía flujo, nivel o presión, y que enviaba una señal neumática de salida a un servicio o instrumento tal como una válvula de diafragma (inventada en 1890). El tipo de control usado era entonces proporcional o de encendido / apagado. Así, para 1940 cuando los cuartos centrales de control se hallaban en pleno desarrollo, un operador típico trabajaba en la planta prácticamente a un lado del proceso del cual tenía la responsabilidad de dirigir. La comunicación con los supervisores era mínima y los operadores tenían un alto grado de responsabilidad para cada una de las unidades de proceso. Casi todos los parámetros de control eran ajustados por el operador quien se basaba en su habilidad, experiencia y conocimiento del proceso. Un operador típico era el encargado de controlar desde una hasta cinco válvulas. Si la unidad de proceso requería de un mayor número de operaciones, se asignaban a más operadores.

La acción derivativa fue introducida en 1935, con lo cual se establecieron las bases para el control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) y una serie de variables que no eran comprensibles del todo hasta el desarrollo del método propuesto por Ziegler y Nichols ¹ en 1942. Mientras que el modo proporcional se ocupa del tipo de error, el control integral responde al tipo y a la duración de este y el derivativo se refiere a la rapidez de cambio del error.

El primer transmisor neumático desarrollado en 1938 permitió que los controles neumáticos locales fueran convertidos en controles receptores y por consiguiente transferidos al cuarto de control. Debido a que estos controles eran muy grandes, los cuartos de control tenían que ser bastante espaciosos.

La industria rápidamente adoptó la señal de 3 a 15 psi de aire para representar el rango de medición de las variables (0 a 100 %), los puntos de ajuste (set points) y las salidas de proceso. Cualquier señal por abajo de 3 psi o arriba de 15 psi indicaba la existencia de un error (por ejemplo la pérdida de presión de aire o el rompimiento de un sensor o regulador).

¹ La mayor contribución de Ziegler y Nichols radica en reconocer que el control PID describe sistemas complejos de orden superior que pueden ser aproximados a un modelo de primer orden con tiempo muerto. Este modelo tiene la ventaja de presentar una estructura sencilla con amplia aplicación, además de que los parámetros pueden ser determinados experimentalmente y convertidos directamente a los puntos óptimos del control PID. Fue la primera vez que alguien propuso un método que iba más allá de la prueba y error. Ziegler y Nichols propusieron un conjunto de factores para calcular los parámetros del control PID como función de la última ganancia y el último periodo en el circuito de control; este método también propuso un paso a circuito abierto vía experimental para generar la curva de la reacción de proceso en donde la última ganancia y el periodo podían ser calculados.



Cuando los controles pudieron enlazarse se desarrollaron ingeniosos esquemas de control, como el control en cascada, control con retroalimentación (feedback) y técnicas de límite de control. Estos arreglos se hicieron muy útiles e indispensables en el desarrollo industrial que acompañó a la segunda guerra mundial.

Sensores.

El éxito de los primeros controles dependió en gran manera del descubrimiento y desarrollo de los sensores. El uso de estos en el siglo XX para los procesos industriales comenzó lentamente.

Flotadores, niveles, mirillas, termómetros y armaduras eran instrumentos típicos usados para la detección y medición de los parámetros de proceso, pero en esencia, al inicio los sensores más usados eran la vista, el oído, el tacto, el olfato y el gusto; así el humo de proceso de una chimenea, el color o claridad del líquido de un proceso y la textura, olor o sensación al tacto del producto final eran a menudo usados para determinar la calidad de un producto. Los ingenieros supervisores típicamente hacían sus rondas en la planta para la lectura de las mediciones y reconocimiento de los procesos y productos obtenidos "de primera mano".

La invención del termómetro atribuida a Galileo alrededor de 1593 y la del termómetro de mercurio y alcohol difundidos por Gabriel Fahrenheit en 1709 y 1714 ayudaron a establecer las bases para la detección y medición modernas de la temperatura. En 1821 T.J. Seebeck observó que dos metales distintos puestos en un circuito cerrado y sujetos a diferentes temperaturas podían utilizarse para generar un flujo de corriente eléctrica en tal circuito. Este descubrimiento permitió 50 años después la invención del termopar por Sir William Siemens. En 1856 Lord Kelvin fue el primero en reportar que los conductores metálicos sujetos a esfuerzos mecánicos presentaban un cambio en su resistencia eléctrica. Posteriormente el desarrollo de medidores de tensión permitió que los movimientos mecánicos fueran convertidos en señales electrónicas, esto basado en el hecho de que cambios en la capacitancia, inductancia o resistencia son proporcionales a la tensión detectada por el sensor. La ley de Faraday de inducción electromagnética desarrollada en 1881 (cuyo principio dice que cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético de cierta longitud se genera un cierto voltaje en tal conductor) fue base para que Faraday intentara medir el flujo del río Támesis.

Así, es muy probable que la primera variable en ser medida y controlada con precisión por la industria halla sido la temperatura, esto debido al uso de máquinas y turbinas de vapor para proporcionar la potencia necesaria a las máquinas encargadas de la producción. El manómetro de mercurio fue uno de los primeros servicios usados para medir las presiones en las máquinas de vapor. Así, la era de los sensores mecánicos fue seguida por un periodo de instrumentos hidráulicos que usaban las presiones del aceite y otros fluidos para detectar y medir los parámetros involucrados en la producción. Incluso en el desarrollo de la instrumentación neumática en las décadas de 1920 y 1930 se continuó con el uso de los instrumentos hidráulicos.

El primer termómetro de radiación comercialmente disponible fue introducido en 1931; este era usado para registrar y controlar la temperatura en los procesos industriales. No fue sino hasta después de la segunda guerra mundial cuando dichos termómetros fueron extensamente usados en la industria. Así, el uso de sensores de temperatura que no requerían de contacto permitió que objetos en condiciones ambientales extremas pudieran monitorearse remotamente.

De manera general, la aplicación de los sensores en la industria comenzó justo antes de la segunda guerra mundial y su desarrollo continuó a través de la duración de esta; de hecho, fue durante este periodo cuando dicha instrumentación adoptó muchas de las técnicas eléctricas que fueron aplicadas con gran éxito en tal guerra. Al inicio, estas técnicas usaban predominantemente corriente alterna (CA) y posteriormente se incluyó el uso de la corriente directa (CD).

La habilidad de tomar respuestas mecánicas y convertirlas en señales eléctricas fue uno de los mayores logros; una de las primeras aplicaciones de la conversión de señales fue el accionamiento de metales cuando estos se expandían o contraían con un cambio de temperatura o presión.

Los transductores son aparatos que transforman un tipo de energía en otro. Los transductores para la medición de tensiones fueron inventados a finales de la década de 1930 y desde entonces han llegado a ser herramientas importantísimas en las aplicaciones de ingeniería. Los termistores son semiconductores hechos



de mezclas de metales fundidos a altas temperaturas y la construcción de estos fue alrededor de 1930. No fue sino hasta 1950 cuando se aceptaron y empezaron a utilizarse en aplicaciones industriales.

El magnetrol, un pionero en el control de nivel data de 1932 y surgió de la necesidad de controlar los niveles de líquidos adecuadamente; tal control primario estaba basado en conceptos de acoplamiento magnético como flotadores para aplicaciones de control del tipo abrir / cerrar (on / off).

En 1934 los laboratorios Bell patentaron una especie de barra delgada de vidrio usada para transmisión óptica; este tubo de luz fue el primer antecedente de las fibras ópticas de vidrio utilizadas posteriormente en los años de 1970 y 1980 en numerosas aplicaciones industriales.

Controles.

Durante el desarrollo de la primera guerra mundial se precisó de movimientos masivos de personas y para ello, vehículos tales como aviones y tanques tuvieron una mayor demanda de productos derivados del petróleo, los cuales dependían de las refinerías y estas a su vez del control en sus procesos para una operación más competente y eficiente.

El automóvil fue también un punto de arranque para el control de procesos, ya que una vez que se comenzó con la producción en masa de estos (en los primeros años del siglo XX), la demanda de gas y petróleo fue un parámetro fundamental en el desarrollo de grandes refinerías

De igual modo sucedió durante la segunda guerra mundial; la necesidad de transportación de personas y materiales hizo que la demanda de combustible y por consiguiente de refinerías, se expandiera exponencialmente; tan solo la capacidad de una refinería se incrementó de 30,000 barriles por día de petróleo en 1940 a 580,000 barriles por día para 1945.

La demanda de instrumentación para el control de los procesos también creció, con lo cual la complejidad y velocidad de los nuevos procesos pronto empezó a excluir las habilidades cultivadas por los operadores para el control de estos procesos.

Para reducir los errores y aumentar la producción se introdujeron en 1943 indicadores con la representación gráfica de las señales de los controles instalados en el cuarto de control. En 1948 aparecieron instrumentos neumáticos miniatura, en donde los controles típicos tenían 6x6 pulgadas y frente a estos se encontraba un indicador que permitía al operador monitorear la variable medida, los puntos de ajuste, salidas a válvulas y controles y así el operador podía decidir entonces entre utilizar el modo automático o el modo manual para la operación. Con esto los cuartos de control se hicieron más compactos. También se introdujo el ajuste a cero para que el punto deseado estuviera siempre en el centro del indicador, así, cuando el proceso estuviera en el punto de ajuste (set point), la señal de entrada al proceso y la salida a la válvula deberían mostrarse en el centro del indicador. Un operador podía vigilar una docena de controles neumáticos mediante asegurarse que todos los indicadores estuvieran en el centro y de ese modo mantener a la planta en una operación correcta. Si cualquier circuito se empezaba a desviar del punto de ajuste (set point) la válvula se abría o cerraba más según fuera necesario para corregir el error. Pocos controles PID funcionaban de un modo completamente automático, por lo que los operadores tenían que estar vigilando; si un circuito comenzaba a fallar, el operador tenía que localizarlo y posteriormente mover manualmente la salida del control para compensar el error.

Aunque el control neumático siguió floreciendo por varias décadas más, poco después de la guerra se empezaron a reemplazar estos por servicios análogos con partes electrónicas para eliminar el desgaste y los errores asociados con la instrumentación mecánica. Uno de los primeros registradores de este tipo fue introducido por Foxboro en 1946 y, posteriormente Westinhouse introdujo uno de los primeros controles digitales directos (DDC) el Prodac 4449 utilizado más tarde (el Prodac 7300 en 1972) para el control de procesos y la protección de reactores en más de 40 plantas nucleares.

El cambio a control electrónico fue guiado por la precisión, exactitud y confiabilidad que este trajo consigo, ya que resultaba difícil controlar grandes plantas con sistemas neumáticos y los retrasos de tiempo eran demasiados para un control exacto.

El control neumático moderno comenzó con el desarrollo de los transmisores neumáticos en 1940 y continuó con gran fuerza y auge hasta finales de 1960 y principios de 1970 cuando las computadoras hicieron su aparición en el control de procesos. En un principio los sistemas neumáticos fueron fusionados con computadoras mediante convertidores de I/P y P/I, pero pronto fue obvio que estos sistemas neumáticos no



podían competir con los electrónicos; aun así, los controles neumáticos no fueron desechados del todo, ya que al no requerirse de electricidad existía mayor seguridad y confiabilidad para los operadores.

A inicios de 1930 se logró enlazar los controles PID en donde la salida de un control PID correspondía a la entrada o alimentación de otro control PID. Estos métodos de control pronto se conocieron como de retroalimentación (feedforward), adaptivos, en cascada, ratio, selectivos, entre otros, en donde algunos incluso contenían a docenas de controles PID. Algunos de los sistemas más complejos de control en el siglo XX fueron construidos de hecho con controles neumáticos alrededor de 1950.

Cuando las computadoras hicieron su aparición en los años 60, los programadores probaron a imitar acciones análogas de los PID's en programas de computo, con varios grados de éxito. De este modo es como el desarrollo en software de computadoras simplificó el uso de los algoritmos PID para el control; de hecho, en los años 80 es cuando se introdujeron algoritmos de PID, contribuyendo así al aumento del control automático en los procesos; con todo esto, el uso de las computadoras ha tenido sus reservas y casi en ninguna planta se ha utilizado a estas para el control total de un proceso, sino que siempre se les ha acotado a operar en modo de supervisión, mandando los cambios en los puntos de ajuste (set points) a los controladores PID neumáticos o electrónicos.

Aunque los tubos de vacío todavía predominaron en la década de 1950, el transistor y la tecnología del estado sólido vino a la vanguardia de aplicaciones industriales antes de que la década terminara. Shockley, Bardeen y Brattain compartieron en 1956 el premio Nóbel por el invento del transistor, el cual era un dispositivo de estado sólido que podía amplificar la corriente eléctrica. De los beneficios derivados de esta invención fueron partícipes los sensores y muchos instrumentos de control.

Si bien el concepto de tubos magnéticos para la medición de la velocidad del agua y otros fluidos conductivos que pasan a través de una tubería ya había sido probado en el laboratorio, Foxboro introdujo los primeros medidores de flujo magnéticos con gran éxito en 1954. La división Boston de industrias Honeywell introdujo el primer detector de metales en 1957; se trataba de un dispositivo magnético sin partes móviles usado para detectar la presencia de objetos ferromagnéticos sin tener contacto con ellos. El objeto era detectado mediante atravesar el campo magnético al extremo contrario del interruptor; en ese mismo año, Honeywell produjo los primeros botones modulares de encendido.

A mediados de los años 50, científicos de los laboratorios Bell desarrollaron las características piezorresistivas del germanio y silicón. Más elásticos que los metales, las barras de silicón recuperan más rápidamente su forma original después de someterse a esfuerzos. Posterior a esto, científicos de Honeywell completaron las investigaciones respecto a las propiedades piezorresistivas de las capas difusas del silicón. Las primeras aplicaciones de estas investigaciones fueron en un medidor de aceleración desarrollado para Honeywell Avionics Div. Esta tecnología se adaptó posteriormente en el uso de sensores de presión para el control de procesos en la industria.

A finales de la década de 1950, eran comunes los transmisores de presión y los equipos en cuartos de control, todos ellos con transistores. En 1960 salió la primera patente para la aplicación práctica de un láser.

Analizadores.

La técnica de cromatografía tiene gran crédito en la revolución de la instrumentación aplicada al análisis. De hecho, la cromatografía es un proceso físico para separar una mezcla de compuestos químicos. Rápidamente ha llegado a ser una de las técnicas analíticas más exitosas en el laboratorio y el análisis de los procesos en línea. La cromatografía trabaja discontinuamente, de manera similar a una destilación por lotes (proceso batch). Es un proceso físico en el cual ningún cambio químico está envuelto. En la práctica, esto involucra gases disolviéndose en un líquido o atrayéndose a la superficie de materiales sólidos. La cromatografía data de 1903 cuando un ruso botánico Tswett acuñó el término para un procedimiento inventado por él para estudiar los diferentes pigmentos en hojas. Tswett puso una columna de arena en un tubo de vidrio y vertió una solución preparada de hojas. El material poco a poco se separó en bandas de color dentro del tubo y tales bandas iban desde los pigmentos rojos hasta los amarillos presentes en las hojas; este tipo de prueba fue conocida posteriormente como análisis de desplazamiento. Tswett publicó una monografía con casi 1000 aplicaciones para la separación de una gran variedad de materiales orgánicos.



El analizador de infrarrojo Luft fue el primer proceso de análisis en línea para sistemas de instrumentación; este tenía como base el principio de no-dispersión para medir la concentración de radiación infrarroja absorbida por los gases. Desde entonces, los analizadores en línea se han utilizado por aproximadamente 25 años.

Así, en un proceso de análisis la identidad del gas es conocida y la concentración de este gas es la variable a medir. Cada molécula de gas absorbe energía de IR (Infrarrojo) en un espectro distinto y esta energía absorbida incrementa la energía cinética del gas mediante el aumento de la presión y temperatura. Entonces se utiliza la expansión del gas para presionar sobre un diafragma flexible en un circuito capacitivo. La energía de IR atraviesa la muestra alternadamente y a través de una referencia que contienen los gases del fondo. Entonces se produce una señal modulada con la amplitud de la señal relacionada con la concentración del gas.

El primer cromatógrafo de gases en línea introducido en 1950 tenía programas y micro interruptores para la ejecución de las funciones, además los puntos máximos de un componente del gas que se analizaba eran visualizados en un registrador por medio de gráficos. Las capacidades estaban limitadas por la habilidad del operador para entender dichos máximos y para interpretar las gráficas de barra desplegadas en el registrador. Ahora, gracias a los sistemas digitales que manejan los datos y limpian la pantalla, el número de componentes está limitado únicamente por la capacidad de la columna para separar los componentes.

A fines de 1950, Beckman Instruments desarrolló un fotómetro ultrasensitivo de capacitancia Luft para la medición de gases como CO, CO₂, SO₂ y otros gases heteroatómicos. También en esa misma década Beckman Instruments formó una división de procesos de instrumentación que abrió camino en mediciones tales como la ionización de flama para la detección de hidrocarburos.

El desarrollo de estos procesos siguió con otras compañías tales como Phillips Petroleum, quién desarrolló su propio cromatógrafo de gases con aplicaciones en refinerías y procesos petroquímicos.

La era electrónica.

Los controles neumáticos y electrónicos se desarrollaron paralelamente en la década de los 60 y fueron usados en combinación para el control de grandes plantas. Estaciones neumáticas de alta densidad con enlaces a computadoras se desarrollaron para 1965. A la vez, servicios tales como convertidores de señal electrónica a señal neumática (I/P) y señal neumática a señal electrónica (P/I) fueron desarrollados como ayudas para el enlace de sistemas de control neumático con controles eléctricos y computadoras digitales. Las computadoras eran los receptores centrales; en ellas se conectaban los racks de controles electrónicos PID vía convertidores analógicos-digitales (A/D) y digitales-analógicos (D/A), además de los controles neumáticos mediante convertidores de P/I e I/P. Algunas plantas tenían cientos de circuitos bajo el control PID; todo estaba en el mismo cuarto de control y de este modo se veían cientos de cables de los controles a las computadoras. No fue sino hasta 1970 cuando las ventas de controles electrónicos excedieron a los neumáticos. Muchos sistemas de control neumático siguieron y continúan usándose actualmente, particularmente en áreas peligrosas y ambientes explosivos, esto debido a que en el control neumático no se usa electricidad, por lo que no se generan chispas que puedan causar explosiones. Así, los controles neumáticos son de gran confiabilidad, el único problema estriba en la dificultad para encontrar los repuestos o refacciones de estos sistemas que ya se han vuelto obsoletos.

El desarrollo de transistores, circuitos analógicos integrados y relevadores incrementó la capacidad y confiabilidad de los sistemas electrónicos. En 1960, la planta de amoniaco Luling fue la primera planta química con un sistema de control computarizado. También, para 1960 el Control Digital Directo (DDC) y el Control de Supervisión y Adquisición de Datos (SCADA) llegó a ser común en los cuartos de control.

PLC.

Inventados a finales de la década de 1960 por Dick Morley; eran relevadores de los sistemas de control utilizados en la industria automotriz. Poco después de esto, un PLC de Allen-Bradley salió al mercado y la industria del PLC despegó definitivamente. Primero se pensó para operaciones de control secuencial/discreto y en aplicaciones de control PID.



Los Controles Lógico Programables (PLCs) rápidamente encontraron un rol en el control de procesos mediante accionar válvulas, llevar la secuencia de motores y funciones de alarma, reemplazando de esta manera a los tableros relevadores. Por ejemplo, si un operador quería cambiar un proceso en lotes (batch) para obtener un producto diferente, la operación requería a menudo de complejas secuencias en las válvulas: primero, las válvulas usadas en las líneas de los productos tenían que cerrarse. Entonces las líneas del proceso, reactores, tanques de mezclado, bombas y otros equipos de soporte tenían que limpiarse mediante purgar los reactivos gastados. Finalmente, estas válvulas y las bombas tenían que abrirse en secuencia para que los reactivos entraran al nuevo lote. Las computadoras y los PLCs automatizaron estos procesos haciendo mucho más fácil para las plantas cambiar sus procesos.

El sistema de control distribuido DCS (Distributed Control System) hizo su aparición en 1975, realizando un mínimo de operaciones de control secuencial/discreto, de modo que fueron considerados como sistemas primarios de control continuo. Los vendedores del DCS no veían al PLC como un competidor, sino más bien como un complemento necesario.

Antes de la comunicación digital, los controles electrónicos operaban estrictamente en forma analógica, aceptando corriente o señales de voltaje de los sensores y mandando una corriente o voltaje a los motores y relevadores. Al principio, los niveles de las señales seleccionadas para un circuito de control o subsistema se basaban en el equipo disponible. Para 1950, varios rangos eran los más comúnmente usados: 1-5 VCD, 4-20 mA CD, 0-5 VCA, -10-10 VCD y 10-50 mA CD. Dick Caro, presidente en turno del comité SP50 de la ISA sugirió la creación de un comité de estandarización en la ISA (ISA S50) a inicios de 1960, a fin de poner orden a la locura en la elección de señales. Hubo varios convenios en este comité, por ejemplo, se acordó que el uso de corriente directa (CD) era el mejor, ya que esta era la menos afectada por la longitud de onda; también se pactó el uso del cero debido a que cero volts/amp podrían indicar una conexión rota o falla en algún instrumento. La mayoría del comité estuvo de acuerdo con el uso de 4-20 mA CD, excepto algunos que propusieron el uso de la señal 10-50 mA CD como alternativa debido a que, como hicieron notar, el poder para el campo del instrumento tenía que tomarse de la línea que daba únicamente 4 mA de corriente en una fuente de 12 VCD o con 48 mW de potencia. Para 1964 esto era difícil de hacer ya que el equipo que daba el suministro dependía de una línea de transmisores que usaban amplificadores magnéticos, los cuales no podían trabajar a 48 mW.

Uno de los problemas de la señal de 10-50 mA era que se necesitaba de un alambre grueso para evitar problemas de caídas de voltaje. Otro problema lo representaba el hecho de no poder trabajar en un entorno seguro, ya que el máximo nivel de corriente permitido es 20 mA.

Debido a lo anterior, el comité permitió a Foxboro trabajar con 10-50 mA CD como alternativa hasta lograr que se aprobara dicho estándar. Sin embargo, el uso de la señal de 4-20 mA pasó a ser arrolladoramente el estándar seleccionado por la mayoría de la industria de proceso y con ello, Foxboro tuvo rápidamente que acoplarse y desarrollar una nueva línea de instrumentación aplicada a procesos. Así, a partir de 1964, Foxboro ha tenido un rol activo en casi todos los esfuerzos de estandarización en la ISA.

El estándar de 4-20 mA CD (ISA S50.1-1972) ha prevalecido desde entonces. Esta fue reafirmada en 1992 y casi toda la instrumentación de procesos, sensores y actuadores en la actualidad cuentan con salidas y entradas de 4-20 mA CD.

Con esta estandarización, los transmisores electrónicos llegaron a ser más populares. Un transmisor acepta entradas neumáticas, de voltaje, corriente, frecuencia o pulsos provenientes del sensor y las convierte en señales analógicas de 4-20 mA. En la aplicación de procesos los transmisores a menudo iban montados en el sensor (un transmisor de flujo de presión diferencial montado directamente sobre la línea de proceso o sobre una toma cercana a la tubería). En muchos casos, los transmisores también alojaban a los sensores electrónicos.

Los convertidores de señales neumáticas y electrónicas de control también crecieron en popularidad. Estos equipos convertían una señal de proceso de una forma en otra y la ejecutaban a la misma vez. Inicialmente, los convertidores eran extensamente usados para realizar varias funciones en los sistemas de control analógicos, tales como:



- Cálculo de control ratio y bias.
- Extracción de raíz cuadrada (para computar flujo desde un transmisor)
- Linearización (para pH)
- Totalización.
- Adición/Sustracción.

Así, mediante el uso de convertidores de señales y controles PID, los ingenieros pudieron ejecutar funciones en computadoras tales como monitoreo y control de corrientes de vapor, resolución de ecuaciones de flujo de gas y creación de controles complejos. Con esto, el propósito fue la conversión de señales de proceso para el uso en las computadoras. Tales convertidores eran los siguientes:

- P/I : Señal neumática a corriente eléctrica, típicamente de 3-15 psi a 4-20 mA CD
- I/P : Señal electrónica a neumática de 4-20 mA CD a 3-15 psi
- A/D : Analógica a digital, convierte corriente analógica o voltaje en digital para computadoras.
- D/A : Digital a analógica, convierte salida digital de una computadora en corriente analógica o voltaje.

En 1975, Honeywell sorprendió al mundo del control de procesos con la introducción de su TDC 2000, el primer sistema de control distribuido de procesos (DCS). El TDC 2000 revolucionó el control de procesos de varias maneras: en primer lugar, se eliminaron los controles sencillos en los circuitos, reemplazándolos con controles digitales de 8 circuitos. En segundo lugar, se agruparon las actividades de control en múltiples sistemas distribuidos, de modo que si alguna parte de un sistema sufría daño o descompostura la planta podría seguir operando. Finalmente se introdujo el concepto de una base de datos de la planta por lo que entonces, los diferentes componentes podían transferir información entre ellos mismos. Los operadores se localizaron frente a monitores. En 1984 ocurrió otra revolución en el control cuando Steve Rubin de Intellution introdujo The Six, el primer sistema de control en PC. El sistema ejecutaba funciones de mando en DOS (Sistema Operativo en Disco) y realizaba el control PID en 16 circuitos simultáneamente. En 1985, Computer Technologies Corp. (CTC) introdujo Screen Ware, la primer PC con software de gráficos. Screen Ware fijó los estándares en la automatización de la industria por su facilidad en el uso de gráficos animados para el monitoreo y control de los procesos.

Los 90 fueron una década de gran crecimiento en la disponibilidad y sofisticación del microprocesador, las comunicaciones y la tecnología del software. En la batalla por el control, se ha intentado incrementar la velocidad; así por ejemplo, grandes cantidades de procesadores conectados en paralelo se han usado para ejecutar diversas rutinas, junto con procesadores de 32 bits usados en los propios sistemas de control, por ejemplo, el TDC 3000 de Honeywell. A través de los años, Ethernet ha ganado terreno, nació en Xerox Co. a finales de la década de 1970 y uno de los primeros sistemas de control en adoptarlo fue Square D, quien puso puertos de Ethernet en PLC's Symax en los años 80, constituyéndose como el primer sistema PLC en usar una red intermedia de computadoras. Las ventajas eran fenomenales: los PLC's Square D tenían contacto directo con las PC's y estaciones de trabajo enlazándose a gran velocidad; también se podían generar redes extensas de las plantas usando PLC's Square D.

Válvulas.

La primera referencia data del año 300 A.C. en Alejandría, donde se tenía una válvula para mantener el nivel constante en un tanque. Con el invento de las máquinas de vapor el uso de las válvulas adquirió importancia para regular las presiones y las necesidades de almacenamiento y regulación.

Un avance significativo se logró en 1875 cuando William Fisher desarrolló el control en un contenedor de bombeo, lo cual es considerado como el primer proceso con una válvula en lograr un punto de ajuste mediante igualar la presión que actuaba sobre el pistón mediante un resorte.

A mayor escala se habían utilizado los gobernadores de esfera flotante por James Watt en sus máquinas centrífugas de vapor en 1788 para controlar el flujo, en lo que se ha considerado el primer circuito control-válvula-actuador. Estos mecanismos detectaban las velocidades de rotación de las turbinas y a través de



enlaces mecánicos se abrían automáticamente las válvulas de vapor. Tales gobernadores de esfera flotante fueron usados de igual manera por Westinghouse para mantener las turbinas y los generadores de electricidad a velocidades constantes, sin embargo, estas válvulas de vapor pronto llegaron a ser demasiado grandes para el control que se desarrollaba debido a la fuerza que se requería para las esferas flotantes; así, para 1930 Westinghouse inventó sistemas mecánico-hidráulicos que a base de impulsores de vapor controlaban la presión en los actuadores para de ese modo manejar incluso válvulas muy grandes. Tales controles mecánico-hidráulicos dejaron de usarse en 1970 con la aparición de sistemas analógicos y posteriormente digitales.

La válvula de mariposa apareció en 1920 para el control de los procesos en donde las presiones eran bajas y para servicios de encendido / apagado (on / off) de los sistemas de distribución de agua.

Para 1937 Foxboro introdujo las válvulas de igual porcentaje en las cuales se igualaba el porcentaje de apertura de la válvula con un porcentaje equivalente en el cambio del coeficiente de flujo.

Así, a medida que los procesos requirieron de presiones mayores, se desarrollaron válvulas de alta presión y a medida que los gastos de flujo también se incrementaron, válvulas con mayor capacidad fueron construidas para responder a las demandas que exigía la industria.



3. PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA. DESCRIPCIÓN.



3.1. Generalidades.

El agua pura es un líquido inodoro e insípido. Tiene un matiz azul que sólo puede detectarse en capas de gran profundidad. A la presión atmosférica (760 mm. de mercurio), el punto de congelación del agua es de 0° C y su punto de ebullición de 100° C. El agua alcanza su densidad máxima a una temperatura de 4° C y se expande al congelarse. Como muchos otros líquidos, el agua puede existir en estado sub-enfriado, es decir, puede permanecer en estado líquido aunque su temperatura esté por debajo de su punto de congelación y se puede enfriar fácilmente a unos -25° C sin que se congele.

El agua por sí misma es incolora y no tiene olor ni gusto definido. Sin embargo, tiene unas cualidades especiales que la hacen muy importante, entre las que destacan el hecho de que sea un regulador de temperatura en los seres vivos y en toda la biosfera, esto por su capacidad calorífica alta (su temperatura no cambia tan rápido como la de otros líquidos).

El agua cubre casi un 80% de la superficie de la tierra. Aunque pareciera que es un recurso muy abundante, es importante destacar que solo el 3% de ésta es agua dulce, es decir, apta para usos domésticos, industriales o comerciales (unas tres cuartas partes de toda el agua dulce se halla inaccesible, en forma de casquetes de hielo y glaciares situados en zonas polares muy alejadas de la mayor parte de los centros de población; sólo un 1% es agua dulce superficial fácilmente accesible). El agua dulce que podemos utilizar es la que proviene de las lluvias y la que se encuentra en lagos y ríos. Esta debe alcanzarnos para que ninguna persona, planta o animal tenga sed, para que los animales acuáticos vivan en ella, para regar los campos, usar en las industrias, mantener húmedos los bosques y un sinnúmero de actividades más que precisan de este vital líquido. Por otra parte, el agua salada sustenta importantes cadenas alimenticias claves para la alimentación mundial, además, viven en ella especies vegetativas que son las que aportan más de un 60% del oxígeno de la Tierra.

El agua presenta las siguientes propiedades físico-químicas:

➤ Acción disolvente.

El agua es el líquido que más sustancias disuelve (disolvente universal); esta propiedad se debe a su capacidad para formar puentes de hidrógeno con otras sustancias, ya que estas se disuelven cuando interactúan con las moléculas polares del agua.

➤ Fuerza de cohesión entre sus moléculas.

Los puentes de hidrógeno mantienen a las moléculas de agua fuertemente unidas entre sí, formando una estructura compacta que la convierte en un líquido casi incompresible.

➤ Elevada fuerza de adhesión.

De nuevo los puentes de hidrógeno del agua son los responsables de esta propiedad, al establecerse entre moléculas de agua y otras moléculas polares, y son los responsables de igual manera junto con la cohesión, de la capilaridad.

➤ Gran capacidad calorífica específica.

El agua absorbe grandes cantidades de calor que utiliza para romper los puentes de hidrógeno. Su temperatura desciende más lentamente que la de otros líquidos a medida que va liberando energía al enfriarse. Esta propiedad permite al citoplasma acuoso servir de protección para las moléculas orgánicas en los cambios bruscos de temperatura.

➤ Elevado calor de vaporización.

A 20° C se precisan 540 calorías para evaporar un gramo de agua, lo que da idea de la energía necesaria para romper los puentes de hidrógeno establecidos entre las moléculas del agua líquida y, posteriormente, para dotar a estas moléculas de la energía cinética suficiente para abandonar la fase líquida y pasar al estado de vapor.

➤ Elevada constante dieléctrica.

Por tener moléculas bipolares, el agua es un gran medio disolvente de compuestos iónicos, como las sales minerales, y de compuestos covalentes polares como los glúcidos. Las moléculas de agua se disponen



alrededor de los grupos polares del soluto, llegando a desdoblarse los compuestos iónicos en aniones y cationes, fenómeno conocido como solvatación iónica.

➤ Bajo grado de ionización.

De cada 107 moléculas de agua, sólo una se encuentra ionizada: $H_2O \Leftrightarrow H_3O^+ + OH^-$

Esto explica que la concentración de iones hidronio (H_3O^+) y de iones hidroxilo (OH^-) sea muy baja. Dado los bajos niveles de iones H_3O^+ y de OH^- , si al agua se le añade un ácido o una base, aunque sea en poca cantidad, estos niveles varían bruscamente.

Consideraciones básicas.

El agua de lagos, ríos y manantiales -es decir, en estado natural- se denomina agua cruda, la cual se caracteriza por ser turbia, tener color, olor y mal sabor, además de presentar una multiplicidad de bacterias, por lo cual no es apta para el consumo humano ni para ser utilizada en la industria.

Además de esto, el agua cruda contiene aproximadamente un 0.1% por peso de sólidos, sean disueltos o suspendidos. Este 0.1% es el que requiere ser removido para que el agua pueda ser utilizada. El agua sirve o actúa como medio de transporte de estos sólidos, los que pueden estar disueltos, en suspensión o flotando en la superficie del líquido (tabla 3.1).

| Sólidos (0.1%) | Gases Disueltos | Componentes Biológicos |
|-----------------------|------------------------|-------------------------------|
| Suspendidos | O ₂ | Bacterias |
| Disueltos | CO ₂ | Micro y macroorganismos |
| Coloidales | H ₂ S | Virus |
| Sedimentables | N ₂ | |

Tabla 3.1. Sustancias presentes en el agua cruda.

El creciente desarrollo industrial y la diversificación de los procesos utilizados en la atmósfera tecnológica han hecho que un sinnúmero de químicos y residuos de sustancias, junto con una gran cantidad de materia orgánica sean dispuestos en los cursos normales de agua, depositándose en lagunas, lagos, ríos y mares. Cuando estas acciones se realizan, se ocasiona un aumento en la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y el limitado oxígeno disuelto no es suficiente para posibilitar la recuperación. La naturaleza no es capaz por sí sola de realizar el proceso de auto-purificación en estas aguas.

Por ello, los principales contaminantes que necesitamos remover del agua cruda son:

- **Materia Inorgánica.** Entre la materia inorgánica están incluidos el calcio, magnesio, zinc, hierro y otras sales y metales pesados que forman iones en el agua, así como gases disueltos no iónicos como oxígeno y compuestos que se pueden ionizar tales como el amoníaco y anhídrido carbónico.
- **Materia Orgánica.** Los contaminantes orgánicos proceden de la lluvia y del suelo, incluyen ligninas, ácido húmico y otros subproductos de la degradación de los vegetales. También se encuentran los insecticidas y herbicidas utilizados en las tierras de cultivo.
- **Bacterias y Microorganismos.** Las bacterias y algunos de sus subproductos como las endotoxinas o pirógenos son capaces de producir riesgos a la salud. En los sistemas de alcantarillado por ejemplo que llevan aguas sin tratamiento a los ríos, lagos y mares, proliferan microorganismos que causan enfermedades como el cólera, la tifoidea y la hepatitis. Por otra parte, el excremento, fertilizantes y detergentes contienen nitrógeno y fósforo, los que permiten un acelerado crecimiento de algas en las



aguas crudas. Cuando las algas mueren, se depositan en el fondo y sirven como alimento para las bacterias. Tanta comida permite un aumento de la cantidad de bacterias en el agua. A su vez, las bacterias consumen oxígeno, quedando muy poco para los otros seres vivos del agua, principalmente insectos y peces, los que mueren por falta de oxígeno.

- Partículas. Este tipo de contaminantes incluye a los coloides y partículas en suspensión en el agua cruda que alteran en gran medida el rendimiento y confiabilidad de los tratamientos. Por ejemplo, los sólidos suspendidos pueden proteger a las bacterias de los desinfectantes.

En vista de lo anterior, se deben tomar en cuenta los siguientes puntos en el diseño de un sistema de tratamiento de agua:

- 1- Identificar la fuente de suministro de agua cruda.
- 2- Analizar la naturaleza y cantidad de contaminantes en el agua cruda.
- 3- Determinar los parámetros de calidad requeridos para el agua producto.
- 4- Determinar la cantidad de agua necesaria (capacidad de producción).
- 5- Evaluar las tecnologías que se tienen como alternativas para el tratamiento del agua.
- 6- Diseñar el sistema que cumpla con la calidad y cantidad requeridas y que económicamente sea el más viable.

Además, el agua producto (obtenida al final del tratamiento) deberá contar en general con las siguientes características:

- 1- Ausencia de organismos patógenos.
- 2- Ausencia de sustancias tóxicas tales como cianuro, plomo, mercurio, etc.
- 3- Sus características químicas (calidad del agua) no deben provocar corrosión e incrustación en tuberías, líneas de suministro ni en equipos de proceso (intercambiadores de calor, calderas, etc.).
- 4- Ausencia de turbidez y color.
- 5- En el caso de agua requerida para uso doméstico, no deberá tener sabores ni olores desagradables.

La repartición de agua en la mayoría de plantas químicas y refinerías corresponde, de manera general, a la siguiente aproximación:

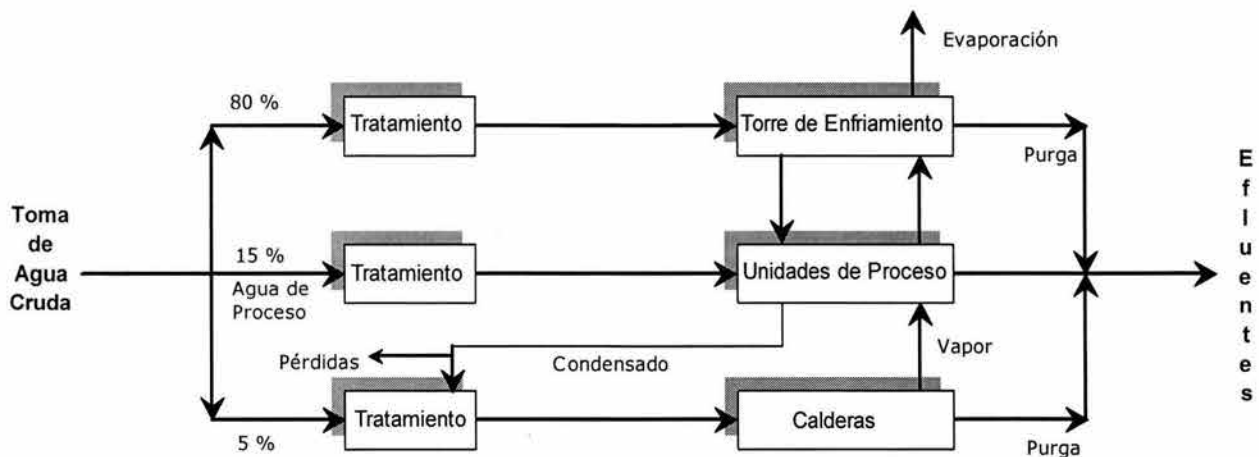


Figura. 3.1. Balance típico de agua.



Descripción de sistemas con uso de agua.

➤ Circuitos de agua de enfriamiento.

• Sistemas de un paso.

En estos sistemas el agua de enfriamiento pasa a través de las unidades de proceso y es descargada caliente como un efluente de la planta. Para este caso basta con un bajo nivel de cloración para control biológico y algunos dispersantes para minimizar incrustaciones por sólidos suspendidos.

• Torres de enfriamiento atmosféricas con recirculación.

En estos sistemas el calor se disipa por evaporación en bajos porcentajes con relación al agua circulada (de 1 a 4 %). El agua remanente se recircula causando una acumulación de sales disueltas en el sistema. Eventualmente, la solubilidad de una o más sales se excede y ocurren precipitaciones a menos que una porción del agua circulada se purgue para mantener la concentración de sales, siendo la condición óptima de operación justo abajo del punto de precipitación para minimizar el gasto de agua, los químicos usados para el tratamiento y la descarga de efluentes de la planta. La recirculación en sistemas con agua de torres de enfriamiento hace económicos los tratamientos de corrosión e incrustación. El control de corrosión es alcanzado por la adición de inhibidores, de los cuales los más efectivos son los basados en CrO_4^{2-} y Zn^{2+} ; estos sin embargo, por su carácter tóxico han sido desplazados en su uso por otros inhibidores más nobles.

El control biológico en los sistemas con agua de torres de enfriamiento es alcanzado comúnmente por cloración.

Nuevos desarrollos en aditivos para control de incrustaciones permiten operaciones prácticas aún más allá de los límites de solubilidad de las sales de calcio, las cuales comúnmente son los compuestos limitantes. Estos aditivos, los cuales son básicamente compuestos orgánicos de fósforo, probablemente funcionan por secuestro y distorsión de cristales. Polielectrolitos (usados comúnmente en clarifloculación) son utilizados para suprimir el asentamiento de sólidos suspendidos actuando como dispersantes y/o floculantes.

Los límites de concentración permisibles para un agua de repuesto dada están controlados generalmente por la solubilidad del CaCO_3 , CaSO_4 y la sílice, o por la concentración de sólidos suspendidos.

➤ Circuitos de agua para calderas.

Dado que las calderas operan a elevadas presiones y temperaturas, el tratamiento de agua es más estricto que para servicios de enfriamiento.

Tratamiento interno en calderas.

Este tratamiento se refiere a la adición de químicos dentro de la caldera para controlar la corrosión, incrustación y los arrastres.

La corrosión es controlada removiendo todo el oxígeno libre y controlando el pH dentro de un rango alcalino; para esto primero es removido el oxígeno mecánicamente mediante agotamiento con vapor en un desaerador, luego se adiciona un químico que elimine dicho oxígeno (sulfito de sodio o hidrazina). La adición de fosfatos alcalinos o cáusticos ajusta el pH.

La incrustación es controlada por tratamiento con o sin precipitación. En un tratamiento con precipitación se adicionan fosfatos para reaccionar con la dureza ² que entra a la caldera, así cuando el pH es adecuadamente controlado en el rango alcalino se forma un hidroxifosfato de calcio, que es un

² El término agua dura se aplica a un agua que no es capaz de producir una capa de espuma estable con jabón.



compuesto insoluble y no adherente que se colecta en los fondos de la caldera de donde es extraído con las purgas intermitentes.

En cuanto a los tratamientos sin precipitación, se utilizan agentes quelantes tales como el ácido nitrilotriacético (NTA) o el ácido etilidiamintetracético (EDTA), los cuales previenen la precipitación de sales de calcio y magnesio mediante la formación de complejos catiónicos divalentes.

Los arrastres son las entradas de sólidos no volátiles en el vapor y de sólidos no volátiles, causadas por un proceso incompleto de separación vapor/agua en el domo de vapor. Lo anterior puede resultar de un contenido excesivo de sales disueltas o de alcalinidad en la caldera, de una excesiva generación de vapor, de cambios súbitos de producción o separadores ineficientes.

La formación de espuma puede presentarse a causa de contaminación orgánica en el agua de calderas o un inadecuado control químico. Aditivos antiespumantes ayudan a un alivio de esta situación.

El sílice presenta un problema especial de incrustación debido a que se vaporiza en calderas de alta presión, depositándose en las turbinas. Este problema se debe controlar mediante mantener las partes por millón (ppm que corresponden a los mg/l) dentro de los límites máximos permisibles recomendados.

En síntesis, un tratamiento interno en calderas puede parcialmente compensar un inadecuado tratamiento del agua de alimentación. De hecho, algunas calderas de baja presión o de flux de calor también bajo que son alimentadas con agua suavizada y de baja alcalinidad, se pueden operar de forma satisfactoria sin un pretratamiento. Sin embargo, la buena práctica de ingeniería llama por el diseño de un sistema adecuado de pretratamiento, usando el tratamiento interno como un factor de seguridad adicional.

Una vez que se han visto los tipos de contaminantes que pueden estar presentes en el agua cruda, que se han planteado las bases para un buen diseño y que se ha definido la repartición de agua en una planta química tipo, junto con una breve descripción de sistemas claves, corresponde ahora determinar los métodos que se pueden utilizar y así mismo detallar algunos conceptos de su funcionamiento, para de ese modo llegar a la selección que esbozará en definitiva el proceso. La tabla 3.2 contiene algunos de los medios de tratamiento que pueden ser aplicados según los problemas que se tengan en la caracterización del agua.

| Componente | Dificultades causadas | Medios de tratamiento |
|---|--|--|
| TURBIDEZ | Imparte una falta de transparencia al agua Se deposita en líneas, equipos, etc. Interfiere con la mayoría de los procesos. | COAGULACIÓN. SEDIMENTACIÓN Y FILTRACIÓN. |
| COLOR | Puede causar espuma en calderas Obstruye procesos de precipitación como remoción de hierro y suavización. | COAGULACIÓN Y FILTRACIÓN. CLORACIÓN. ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO. |
| DUREZA (Sales de Ca Y Mg) | Principal fuente de incrustación en equipos de intercambio de calor, calderas, ductos, etc. Se cuaja con el jabón. | SUAVIZACIÓN. DESMINERALIZACIÓN. TRATAMIENTO INTERNO EN AGUA DE CALDERAS. |
| ALCALINIDAD(Bicarbonatos, Carbonatos e Hidratos) | Espumamiento y arrastre de sólidos en el vapor. Debilitamiento del acero en calderas. El carbonato y bicarbonato producen CO ₂ en el vapor lo cual es fuente de corrosión en líneas de condensado. | SUAVIZACIÓN CON CAL O CAL CARBONATO. TRATAMIENTO ÁCIDO. SUAVIZACIÓN CON ZEOLITA CICLO H ₂ . DESMINERALIZACIÓN. DESALCALINIZACIÓN. |
| ACIDOS MINERALES LIBRES | Corrosión | NEUTRALIZACIÓN CON ALCALIS. |



| | | |
|----------------------------|---|---|
| BIÓXIDO DE CARBONO | Corrosión en línea de agua y particularmente en líneas de vapor y condensado. | AEREACIÓN. DESAEREACIÓN. NEUTRALIZACIÓN CON ALCALIS. |
| SULFATOS | Parte del contenido de sólidos del agua, por si solo usualmente no es significativo. Combinado con calcio forma incrustación como sulfato de calcio. | DESMINERALIZACIÓN. |
| CLORUROS | Parte del contenido de sólidos del agua, incrementa el carácter corrosivo. | DESMINERALIZACIÓN. |
| NITRATOS | Parte del contenido de sólidos, usualmente no es significativo. Usado para el control del debilitamiento del metal en calderas. | DESMINERALIZACIÓN. |
| SÍLICE (SiO ₂) | Incrustación en calderas y sistemas de agua de enfriamiento. Depósitos insolubles en álabes de turbinas debido a la vaporización del sílice. | REMOCIÓN EN CALIENTE CON SALES DE MAGNESIO. ADSORCIÓN POR RESINAS DE INTERCAMBIO ANIÓNICAS ALTAMENTE BÁSICAS CONJUNTAMENTE CON DESMINERALIZACIÓN. |
| FIERRO | Fuente de depósitos en líneas de agua, calderas, etc. Interfiere con procesos de teñido, curtido, manufactura de papel, etc. | AEREACIÓN. COAGULACIÓN Y FILTRACIÓN. SUAVIZACIÓN CON CAL. INTERCAMBIO CATIONICO. AGENTES ACTIVOS DE SUPERFICIE. |
| MANGANESO | Igual que el Fierro. | IGUAL QUE EL FIERRO. |
| OXÍGENO | Corrosión en líneas de agua, equipos de intercambio de calor, calderas, etc. | DESAEREACIÓN. SULFITO DE SODIO. INHIBIDORES DE CORROSIÓN. |
| ÁCIDO SULFHÍDRICO | Provoca olor a huevo podrido. Incrementa el carácter corrosivo. | AEREACIÓN. CLORACIÓN. INTERCAMBIO ANIONICO FUERTEMENTE BÁSICO. |
| AMONIACO | Corrosión de aleaciones de cobre y zinc por formación de un ión soluble complejo. | INTERCAMBIO CATIONICO CON ZEOLITA BASE H ₂ . CLORACIÓN. DESAEREACIÓN. |
| SÓLIDOS DISUELTOS | Los sólidos disueltos son una medida de la cantidad total de materia disuelta, determinada por evaporación. Altas concentraciones de sólidos disueltos son objetables debido a la interferencia con procesos y como causa de espumación en calderas. | SUAVIZACIÓN CON CAL E INTERCAMBIO CATIONICO CON ZEOLITA BASE H ₂ . DESMINERALIZACIÓN. |
| SÓLIDOS SUSPENDIDOS | Los sólidos suspendidos son la medida de materia no disuelta determinada gravimetricamente. Los sólidos suspendidos causan depósitos en equipo de intercambio, calderas, líneas de agua, etc. | SEDIMENTACIÓN. FILTRACIÓN COMÚNMENTE PRECEDIDA POR COAGULACIÓN. |
| SÓLIDOS TOTALES | Los sólidos totales son la suma de los sólidos disueltos y los sólidos suspendidos, determinados gravimetricamente. | REFERIRSE A SÓLIDOS DISUELTOS Y SUSPENDIDOS. |

Tabla 3.2. Tratamientos de agua dependiendo el tipo de impurezas presentes.



3.2. Desinfección.

La desinfección en su sentido literal significa libre de infección. La EPA o Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y la Organización Mundial de la Salud define la desinfección del agua como la ausencia de bacterias coniformes. Esterilización implica la completa destrucción de todas las formas de vida.

Existen algunos medios de desinfección mundialmente utilizados. Entre estos se destacan el cloro, la luz ultravioleta y el ozono. Las diferentes formas de desinfección por cloro y derivados son las más utilizadas actualmente; sin embargo, la luz ultravioleta y el ozono han avanzado notablemente como medios de desinfección. Cabe destacar que estas tecnologías de desinfección no son recurrentes, sino más bien se complementan. Sistemas avanzados de tratamiento de aguas muchas veces emplean las tres tecnologías en un mismo proyecto.

3.2.1. Desinfección por cloración.

La cloración es considerada como el método más efectivo y económicamente factible para la desinfección de aguas residuales. Visto desde el aspecto bacteriológico, este proceso parece ideal puesto que reduce el número total de bacterias. Además de proveer protección contra los patógenos virales y bacterianos, los desinfectantes a base de cloro también mejoran la estética del agua, que puede ser deteriorada por las algas y la vegetación podrida en su color, sabor, y olor. El cloro ayuda a controlar el crecimiento de la bacteria, proporcionando un nivel residual de desinfectante en el sistema de distribución.

Para producir el efecto desinfectante, el cloro dosificado sólo debe ser consumido parcialmente, es decir, luego del periodo de contacto debe mantenerse un nivel adecuado de cloro residual. A esta variación, entre el nivel de cloro teórico alcanzado luego de la dosificación y el nivel de cloro residual, se le denomina "demanda de cloro", y se debe a la gran variedad de reacciones entre el cloro activo y los compuestos presentes en el agua residual y también en algunas circunstancias a su propia descomposición.

Para que la cloración resulte eficaz, es necesaria una distribución homogénea del cloro en el agua y aplicar la dosis adecuada, para obtener un agua tratada inocua.

La acción biocida de los agentes oxidantes tales como el cloro interfiere con la síntesis de la proteína en las células, resultando en la muerte de los microorganismos. Debido a que los agentes oxidantes operan por contacto, su aplicación preferencial es en sistemas limpios, bajo condiciones de tratamiento que aseguren mantenerse limpios para que la acción biocida se mantenga efectiva. La acción de los oxidantes sobre la biopelícula es únicamente en la superficie, manteniendo el interior de esta masa microbiológicamente activa.

El cloro como biocida, puede provenir del:

- Gas cloro, Cl_2
- Hipoclorito de sodio, $NaClO$
- Hipoclorito de calcio, $Ca(ClO)_2$

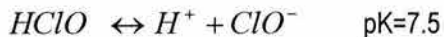
Como gas, es 2.5 veces más denso que el aire, y puede ser mortal a concentraciones mayores de 1,000 miligramos por litro (mg/L). Como líquido (gas comprimido), es 1.5 veces más denso que el agua. El cloro no es combustible pero soporta la combustión. Reacciona violentamente con ciertos contaminantes como grasas, partículas de metal, hidrocarburos y otros compuestos inflamables. Su uso requiere cuidados especiales de manejo y almacenaje.

El cloro, al mezclarse con agua, se hidroliza produciendo ácido clorhídrico y ácido hipocloroso. La disociación del ácido hipocloroso depende del pH. A valores de pH menores de 7.5 la reacción tiende a generar ácido hipocloroso (HClO) y a pH mayores tiende a generar hipocloritos (ClO^-):





Estos productos se disocian fácilmente en:



La efectividad del cloro como biocida depende de:

- Ph
- Concentración
- Tiempo de contacto
- Temperatura
- Impurezas del agua

La efectividad estimada del ion hipoclorito (ClO^-) es 1/100 de la efectividad del ácido hipocloroso ($HClO$). De esta manera, a un pH = 6.0 se necesitan 0.005 partes por millón (ppm) de cloro ($HClO$) para obtener la misma acción biocida que con 0.5 ppm de cloro a un pH = 10 (ClO^-). La escala de pH va de 0 a 14 considerándose el 7 como neutro. Mientras más bajo de 7 es el pH, más ácida es la solución, y mientras más alto de 7, más alcalina. El cloro es más efectivo a temperaturas altas, aunque es más estable a temperaturas bajas, reteniendo su valor residual por más tiempo.

La luz solar (rayos ultravioleta) reduce los niveles de cloro libre rápidamente. En sistemas expuestos al sol, se prefiere que la aplicación del cloro sea en la noche.

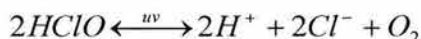
Los oxidantes halogenados pueden reaccionar con los ácidos húmicos y fúlvicos que pudieran estar presentes en las aguas superficiales y formar compuestos indeseables como los trihalometanos (cloroformo, bromoformo y yodoformo) y compuestos orgánicos clorados no volátiles. La cloración también pudiera dar origen a orgánicos halogenados como los clorobifenilos y policlorobifenilos (PCBs).

El cloro, más allá de su actividad desinfectante sufre un número de reacciones químicas que deben ser consideradas, ya que éstas tienen entre sus productos, compuestos organoclorados indeseables. Estas reacciones se pueden agrupar del siguiente modo:

- a) Las provocadas por la radiación solar.
- b) Las que se producen entre el cloro activo y los compuestos inorgánicos.
- c) Las reacciones del cloro activo con el amoníaco y el nitrógeno orgánico.
- d) Las producidas entre el cloro activo y los compuestos orgánicos.

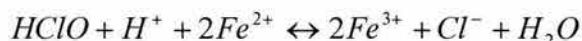
- a) Reacciones provocadas por la radiación solar.

Se producen debido a la acción de la radiación ultravioleta que provee de energía para que se produzca la reacción entre el cloro y el agua.



- b) Reacciones del cloro activo con compuestos inorgánicos.

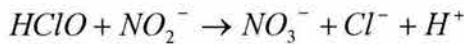
Estas reacciones se producen con compuestos inorgánicos reducidos, por ejemplo, Mn^{2+} , Fe^{2+} , NO_2^- , S^{2-} . En general estas reacciones de óxido-reducción son rápidas, como por ejemplo en el caso del Fe^{2+} :





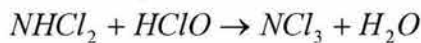
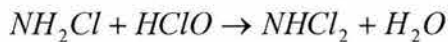
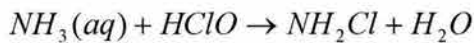
Las reacciones del cloro con el S^{2-} y NO_2^- siguen este mismo comportamiento; en el Mn^{2+} se dan este tipo de reacciones a pHs > 8.5 . A pHs altos también se formarán polisulfitos a partir de los sulfitos.

Si hay NO_2^- en el efluente, el cloro activo lo oxidará en nitratos:

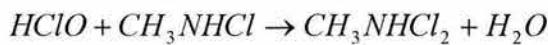
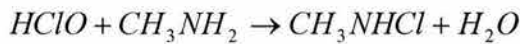


c) Reacciones con el amoníaco y con el nitrógeno orgánico

Estas son diferentes a las que se producen con los compuestos inorgánicos y orgánicos. El cloro activo cuando reacciona con el amoníaco genera compuestos denominados cloraminas y una variedad de productos libres de cloro que contienen nitrógeno. Los mecanismos de reacción son complejos y los productos varían según las condiciones de pH, concentración de Cl_2 , nivel de amonio y tiempo de contacto.



Con compuestos de nitrógeno orgánico el cloro reacciona fácilmente dando productos tales como la metilamina o la dicloro-metilamina:



d) Reacciones producidas con compuestos orgánicos.

Las aguas residuales tienen un alto contenido de materia orgánica tal como carbohidratos, ácidos grasos y proteínas a diferentes niveles de biodegradación y otras materias de origen vegetal y animal: aceites y grasas, insecticidas, surfactantes y otros residuos sintéticos. Estos compuestos orgánicos tienen estructuras alifáticas y aromáticas y contienen oxígeno y nitrógeno. En el caso de compuestos orgánicos, los electrones más reactivos y por lo tanto los compuestos más fáciles de combinar serán aquellos que en su estructura tengan doble enlace.

De acuerdo a lo citado anteriormente, para realizar una cloración eficiente se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos:

| Dosificación de Cl_2 recomendada | Cl_2 residual presente (NOM-127-SSA1-1994) |
|--|--|
| 1 a 10 ppm. | Entre 0.2-1.5 ppm. |

Tabla 3.3. Aspectos de una buena desinfección con gas cloro.

3.2.2. Desinfección por rayos ultravioleta.

La luz ultravioleta constituye una parte del espectro electromagnético con longitudes de onda entre 100 y 400 nanómetros (nm). Cuanto menor es la longitud de onda, mayor es la energía producida.

La luz ultravioleta se produce como resultado del flujo de corriente eléctrica a través del vapor de mercurio entre los electrodos de una lámpara. Las lámparas de baja presión de mercurio producen la mayoría de los rayos con longitud de 253.7 nm. Esta longitud es muy próxima a la longitud recomendada (260 a 265 nm), como más eficiente para matar microbios. Las lámparas de luz ultravioleta y las fluorescentes son similares.

La principal diferencia entre una lámpara germicida y una lámpara fluorescente es que la germicida es construida con cuarzo, mientras que en la fluorescente se usa vidrio, con una capa interna de fósforo que convierte la luz UV en luz visible. Colisiones entre electrones y átomos de mercurio provocan emisiones de radiación ultravioleta, la que no es visible al ojo humano. Cuando estos rayos colisionan con el fósforo, éstos "fluorescen" y se convierten en luz visible. El tubo de cuarzo transmite el 93% de los rayos UV de la lámpara, mientras que el vidrio blando emite muy pocos (figura 3.2).

El blanco principal de la desinfección mediante la luz ultravioleta es el material genético, es decir, el ácido nucleico de los gérmenes patógenos. Los microbios son destruidos por la radiación ultravioleta cuando la luz penetra a través de la célula y es absorbida por el ácido nucleico. La absorción de la luz ultravioleta por el ácido nucleico provoca una reordenación de la información genética, lo que interfiere con la capacidad reproductora de la célula. Por consiguiente, los microorganismos son inactivados por la luz UV como resultado del daño fotoquímico que sostiene el ácido nucleico.

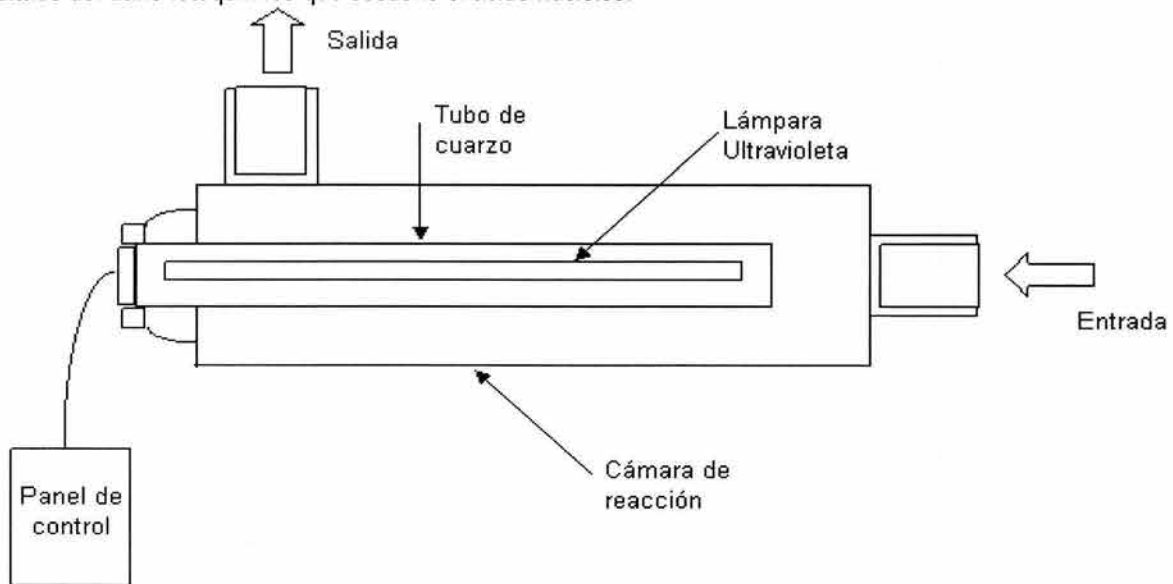


Figura. 3.2. Dispositivo de Luz Ultravioleta.

La alta energía asociada a la corta longitud de onda (240-280 nm) es absorbida por el ARN y el ADN de la célula. La máxima absorción de la luz ultravioleta por el ADN, ocurre con una longitud de onda de 260 nm. Esterilizar es eliminar totalmente los patógenos (99.999999%). Desinfección significa la reducción de la concentración de patógenos a niveles no infecciosos.

Para efectuar la desinfección de agua potable e industrial con luz UV, deben satisfacerse las siguientes condiciones:



- Se debe instalar un filtro de partículas de 5 micras, ya que los virus o bacterias pueden no ser alcanzados cuando existen partículas (estos se pueden esconder tras la coraza de los sólidos).
- Dependiendo de la calidad del agua, pueden ser necesarios filtros de carbón para la retención de material orgánico, para evitar que interfiera en la transmisión de la luz ultravioleta.
- Reducir los niveles de hierro y de manganeso a 0.3 partes por millón (ppm) y 0.05 ppm respectivamente, y reducir la dureza por debajo de 100 ppm. El hierro, manganeso y dureza (calcio y magnesio) pueden precipitarse en el tubo cuarzo, lo que perjudicará la transmisión de luz. Dado que los filtros de carbón y resinas pueden acelerar la multiplicación de bacterias, los reactores de ultravioleta deben ser instalados al final de la línea.

Algunos de los factores que afectan la desinfección eficaz con luz UV son los siguientes:

- Calidad de agua.
- Transmisión de luz UV.
- Sólidos suspendidos.
- Nivel de orgánicos disueltos.
- Dureza total.
- Condición de la lámpara.
- Limpieza del tubo de cuarzo.
- Tiempo de uso de la lámpara.
- Tratamiento del agua antes de aplicar luz UV.
- Flujo.

Estos factores están relacionados principalmente con la exposición de los contaminantes en el agua y la transmisión eficiente de luz UV para una activación adecuada. Los problemas incluyen el sombreado (cuando los contaminantes pequeños son ofuscados por otros contaminantes presentes en el agua), incrustación (debido a la dureza del agua) o decoloración del tubo de cuarzo, intensidad de la lámpara y flujos no adecuados. Un factor adicional que puede afectar el proceso de desinfección por luz ultravioleta es la temperatura. La temperatura óptima de una lámpara de UV debe estar cercana a 40° C. Los niveles de UV variarán con temperaturas excesivamente bajas. El tubo de cuarzo se emplea comúnmente para equilibrar el contacto directo de la lámpara con el agua reduciendo de este modo las fluctuaciones de temperatura.

La transmisión de luz ultravioleta es definida como el porcentaje de la luz UV con una longitud de 254 nm. no absorbida después de pasar a través de una espesura de agua de 1 cm. La transmisión depende de los materiales disueltos y materiales suspendidos en el agua. Las transmisiones reducidas disminuyen la intensidad de la luz en el agua, requiriendo por lo tanto un mayor tiempo de exposición para que el agua reciba una dosis apropiada. La claridad del agua no es un buen indicador de la transmisión, ya que el agua que es clara para la luz visible puede absorber o comprimir la longitud de onda de la luz ultravioleta. La mejor forma de medir la transmisión de luz ultravioleta en el agua es por medio de un fotómetro.

La cámara de agua o reactor debe ser diseñado de tal manera que asegure que todos los microbios reciban una dosis suficiente de exposición a la luz ultravioleta. Si esto no es así, algunos rayos ultravioleta experimentan el llamado corto-circuito, es decir, los microbios pasan por la cámara sin recibir una dosis suficiente de luz ultravioleta.

Ventajas en el uso y mantenimiento de luz UV.

- No genera subproductos.
- No se necesitan tanques de contacto: apenas algunos segundos son suficientes para la desinfección.
- No se usan químicos que se tengan que almacenar o manejar. No dañan el medio ambiente.
- No presenta riesgos al usuario.



- El mantenimiento es muy simple, pues necesita únicamente un reemplazo anual de la lámpara y limpieza del tubo de cuarzo de vez en cuando. Dependiendo de la calidad del agua la limpieza puede no ser indispensable.
- No hay ningún cambio en el color, olor, pH, conductividad ni en algún otro rasgo de la química del agua.
- Costo de capital inicial bajo, así como también se reducen los gastos de operación comparándolos con tecnologías similares como el ozono y el cloro.

3.3. Pretratamiento (coagulación y floculación).

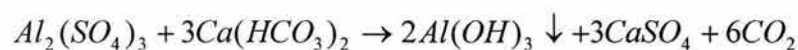
El agua cruda contiene sustancias tanto disueltas como en suspensión, las cuales pueden ser orgánicas e inorgánicas. El material suspendido puede tener un tamaño y densidad tal que puede eliminarse del agua por simple sedimentación, pero cuando estas partículas son muy pequeñas y tienen una carga eléctrica superficial que las hace repelerse continuamente impidiendo su aglomeración y formación de una partícula más pesada, la operación de precipitación no es posible. Una parte considerable de estos sólidos que no se precipitan se encuentran en forma coloidal. Las partículas coloidales presentan tamaños del orden de 0.1 a 2 micras, por esta razón no pueden ser detenidas por un filtrado convencional. Para resolver este problema, es práctica común emplear procesos de clarifloculación.

La coagulación en el proceso de clarifloculación tiene por objeto agrupar a las partículas coloidales dispersas en el agua y formar conglomerados más voluminosos y pesados que puedan ser separados más fácilmente del agua, por simple precipitación, o bien por procesos de filtrado convencional.

Mediante el proceso de coagulación se neutraliza la carga eléctrica superficial del coloide anulando las fuerzas electrostáticas repulsivas. Esta neutralización suele efectuarse añadiendo al agua coagulantes químicos y llevando a cabo el mezclado mediante agitación vigorosa para asegurar un contacto rápido de las partículas coloidales con el agente coagulante. Las sustancias químicas de uso común en estas operaciones son ciertas sales de aluminio (alumbres) y algunas sales de hierro. Generalmente se aplica sulfato de aluminio, de forma que los cationes trivalentes de aluminio neutralizan las cargas eléctricas negativas localizadas en la superficie de las partículas coloidales dispersas en el agua, como se mencionó anteriormente.

Además de las interacciones físicas entre coagulantes y la superficie de las partículas coloidales, en el proceso de coagulación se presentan reacciones químicas paralelas entre las sales coagulantes y las sustancias disueltas en el agua (tales como bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}) e Hidróxidos (OH^-)), para producir el hidróxido del metal ($\text{Al}(\text{OH})_3$) cuya solubilidad es dependiente del pH. Resulta conveniente trabajar en condiciones tales que el hidróxido de aluminio sea lo menos soluble posible, esta condición está comprendida en el intervalo de pH de 5.5 a 7.5. En condiciones de un pH ácido se promueve la formación de las sales de aluminio poco afines a neutralizar la superficie de los coloides. En condiciones alcalinas el carácter anfótero del hidróxido de aluminio forma aluminatos que son complejos inorgánicos que ocasionan un impedimento estérico y el aluminio no puede alcanzar la superficie de la partícula coloidal. Es por esto que fuera de los límites señalados para el pH, la coagulación con sales de aluminio no tiene éxito.

Una de las reacciones que se llevan a cabo al adicionar el sulfato de aluminio al agua es la siguiente:





Debido a que la turbidez (medida en unidades de turbidez NTU's) en el agua es el resultado de la dispersión y absorción de la luz por los sólidos suspendidos, la dosificación de químicos se realiza en función de esta variable, como lo indica la siguiente tabla:

| | Agua baja en turbidez (<10 NTU's) | Agua alta en turbidez (>100 NTU's) |
|----------------------------|---|--|
| ppm de Sulfato de aluminio | 20-34 | 35-85 |

Tabla 3.4. Dosificación de sulfato de aluminio en función de la turbidez.

Una vez alcanzada la neutralización eléctrica de la superficie de las partículas coloidales, proceso conocido como "desestabilización coloidal", las partículas están en disposición de aglomerarse y formar flóculos. Estos flóculos son inicialmente pequeños y es posible inducir el crecimiento de los mismos con ayuda de agentes floculantes, los cuales promueven la aglomeración y fortalecen mecánicamente al flóculo de forma que pueda resistir cierto nivel de turbulencia. Algunos ejemplos de agentes floculantes son la sílica activada, ciertos tipos de arcilla y polielectrolitos. Esta aglomeración de partículas neutralizadas eléctricamente, ayudada ahora por una agitación lenta, permite el crecimiento de los flóculos que, bajo condiciones de flujo laminar se asientan y separan permitiendo al agua "clarificada" su salida del equipo en el cual se lleva a cabo el tratamiento y que es llamado "clarifloculador".

➤ Clarifloculador circular.

En este tipo de clarifloculador el mezclado y el inicio de las reacciones del coagulante, el agente floculante y el agua se llevan a cabo en la cámara de floculación que se encuentra en el centro del tanque (figura 3.3); el agua accesa por la parte superior y se mezcla con el agente floculante, que se agrega de igual manera por la parte superior. El sulfato de aluminio se adiciona en el agua antes de que esta ingrese al tanque. Esta mezcla debe de ser agitada para permitir que la coagulación se lleve a cabo. El agua abandona la cámara de agitación rápida y asciende por la parte externa en movimiento convectivo, el cual corresponde al mezclado lento. La función de esta etapa es provocar el contacto de los flóculos recién formados de tamaño pequeño con el resto de partículas que han sido neutralizadas por los radicales del aluminio. A medida que las partículas coloidales se conglomeran en los flóculos estos aumentan de tamaño. Este fenómeno debe ocurrir aproximadamente a la altura media del tanque. La fuerza que mantiene suspendidos a los flóculos es el flujo mismo del agua que asciende; si este flujo es muy alto los flóculos son expulsados del tanque por los vertederos; si por el contrario es demasiado bajo los flóculos se precipitan al fondo del tanque y en ambos casos no se logrará la captura de las partículas coloidales e implicará un alto consumo de reactivos y una baja eficiencia de remoción.

Un clarifloculador de éste tipo se diseña para remover del 50 al 70% de los sólidos suspendidos. Además, debe operar a su capacidad máxima de llenado, porque el agua clarificada abandona el proceso por los canales que se encuentran dispuestos radialmente en la parte superior del tanque (figura 3.3). La remoción de los lodos debe ser constante; las rastras de remoción de lodos pueden trabajar con una velocidad de hasta el 30% del valor de la velocidad máxima con el fin de controlar la velocidad del agua en el tanque. Este control de la velocidad se logra utilizando motoredutores. El tiempo de residencia es una variable muy importante para la eficiencia de la remoción y se recomienda que esté comprendido en el intervalo de 1.5 a 2.5 horas. Otro factor importante es el flujo por unidad de área (flux volumétrico) en el tanque clarificador. El intervalo recomendado para este tipo de reactores es de 0.71 a 1.18 gal/(minft²).

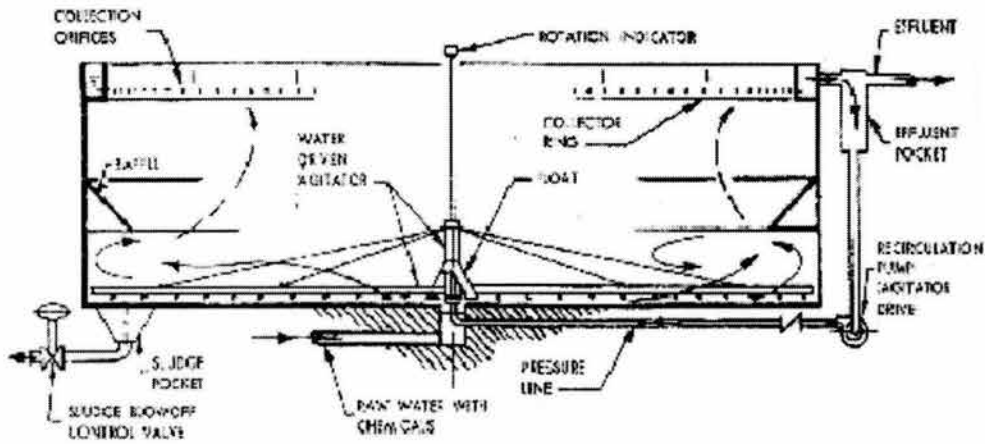


Figura 3.3. Modelo de clarifloculador circular.

➤ Clarifloculador rectangular.

En este sistema, el agua a ser tratada ingresa a un contenedor de mezclado junto con los reactivos químicos y se alimenta por un canal que distribuye el agua longitudinalmente en el tanque. En el interior del tanque se encuentran dos propelas cuyo objetivo es impulsar un flujo ascendente de agua desde la parte central inferior para mantener una región de floculación además de enviar los macroflóculos (partículas con un tamaño suficiente para precipitar) a los canales de remoción de lodos (figura 3.4) que se encuentran dispuestos en ambos extremos inferiores del tanque. El agua clarificada abandona el reactor por la parte superior a través de canales recolectores dispuestos a lo largo de este mismo. El impulso que imprimen las propelas genera el flujo que mantiene a los flóculos suspendidos en el seno del fluido.

En un momento dado este sistema puede funcionar sin una alimentación continua a diferencia de los sistemas circulares. Las condiciones de remoción y los tiempos de residencia dados en este tipo de clarifloculadores corresponden de manera general a los que se tienen para los sistemas circulares, es decir se hallan diseñados para alcanzar de un 50 a un 70 % de remoción de sólidos suspendidos dándoles un tiempo de residencia de 1.5 a 2.5 horas.

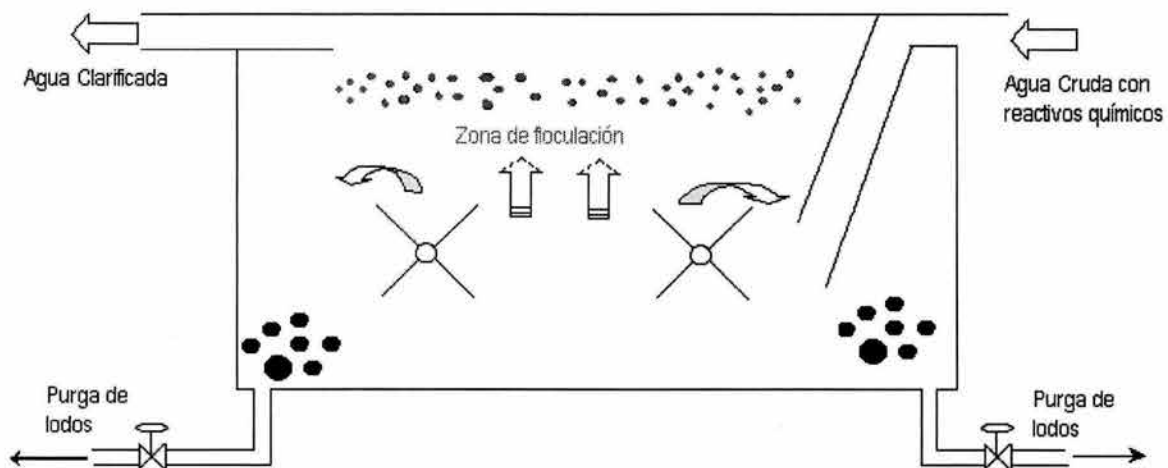


Figura 3.4. Modelo de clarifloculador rectangular.



3.4. Filtración.

El proceso de filtración es una separación sólido-líquido en la cual se hace pasar el líquido a través de un medio poroso con el objeto de remover la mayor cantidad de sólidos suspendidos como sea posible. El mecanismo de remoción de un filtro sea cual sea el tipo es similar y en términos generales es como sigue:

| Mecanismo | Descripción |
|--|--|
| 1.- Cribado a) Mecánico b) Oportunidad de contacto | Partículas más grandes que los poros del medio son retenidas mecánicamente. Partículas más pequeñas que los poros del medio son retenidas por oportunidad de contacto. |
| 2.- Sedimentación | Las partículas se sedimentan sobre el medio filtrante, dentro del filtro. |
| 3.- Impacto inercial | Las partículas pesadas no siguen líneas de corriente. |
| 4.- Intercepción | Muchas partículas que se mueven a lo largo de una línea de corriente son removidas cuando entran en contacto con la superficie del medio filtrante. |
| 5.- Adhesión | Los floculos se adhieren a la superficie del medio filtrante. Debido a la fuerza de arrastre del agua, algunas son arrastradas antes de adherirse fuertemente y empujadas más profundamente dentro del filtro. A medida que el lecho se taponan, la fuerza cortante superficial aumenta hasta un límite para el cuál no hay remoción adicional. Algún material se fugará a través del fondo del filtro haciendo aparecer turbiedad en el efluente. |
| 6.- Adsorción química Enlace Interacción Química | |
| 7.- Adsorción física Fuerzas Electrostáticas Fuerzas Electrocinéticas Fuerzas de Van der Waals | Una vez que una partícula ha entrado en contacto con la superficie del medio filtrante o con otras partículas, la adsorción física y/o química, permite su retención sobre dichas superficies. |
| 8.- Floculación | Partículas más grandes capturan partículas más pequeñas y forman partículas aún más grandes. |
| 9.- Crecimiento Biológico | Reducen el volumen del poro y puede promover la remoción de partículas |

Tabla 3.5. Mecanismos de remoción en un filtro.

Los recipientes en los cuales se deposita el material poroso (lecho filtrante) pueden ser carcazas y estar fabricados en plástico, fibra de vidrio, acero inoxidable, acero al carbón, materiales compuestos o, en el caso de sistemas grandes, concreto.

La materia en suspensión (sólidos suspendidos) está compuesta principalmente por partículas o flóculos de tierra, arena y sedimentos, pero también incluye organismos vivos como algas, bacterias, virus y protozoarios. Para poder remover este tipo de contaminantes se requiere de filtros de agua, de los cuales se tienen los siguientes tipos:

a. Filtros de arena.

La operación de filtración supone dos etapas: filtración y lavado (figura 3.5). En un filtro rápido convencional de arena, el final de la etapa de filtración se alcanza cuando los sólidos suspendidos en el efluente comienzan a aumentar, esto es, cuando la pérdida de carga es tan alta que el filtro ya no produce agua a la tasa deseada (usualmente 2.4 metros de pérdida o cuando la filtración es de 36 horas o más). Generalmente cuando una de las condiciones anteriores se presenta, se procede a lavar el filtro para remover el material suspendido acumulado dentro del lecho filtrante y para recuperar su capacidad de filtración. Usualmente el lavado se hace invirtiendo el flujo a través del filtro aplicando un gasto suficiente de agua para fluidizar el medio filtrante y producir el frote entre los granos del mismo y desechando el material removido a través de las canaletas de lavado.

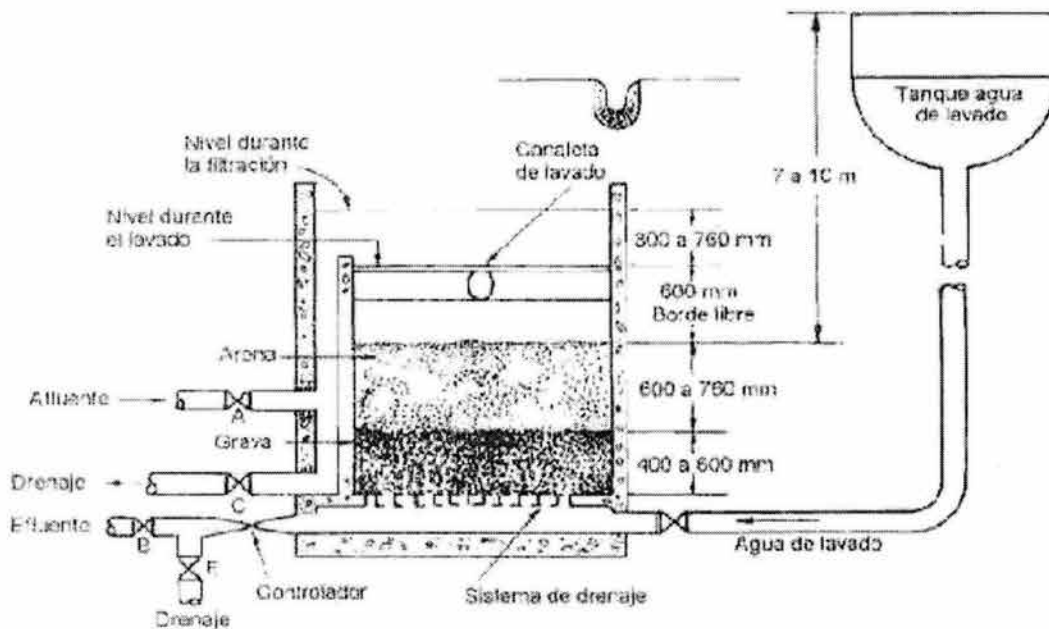


Figura 3.5. Operación de un filtro rápido convencional de arena.

Muchos son los sistemas de filtración propuestos y construidos; por ello, generalmente se clasifica a estos en base a la dirección del flujo, el tipo de lecho filtrante, la fuerza impulsora, la tasa de filtración y el método de control de la tasa de filtración.

- De acuerdo a la dirección del flujo, pueden ser de flujo hacia abajo, hacia arriba o de flujo dual

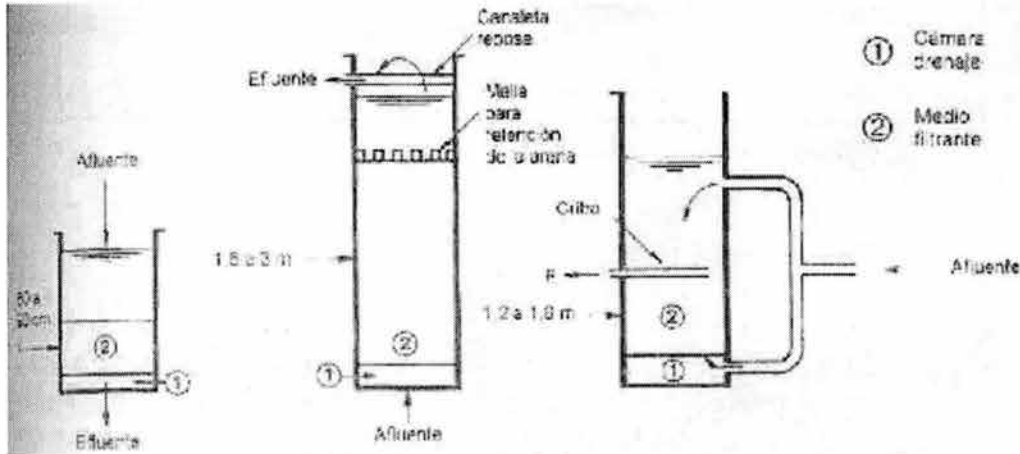


Figura 3.6. Tipos de filtros de acuerdo a la dirección del flujo.

En cuanto al tipo de lecho filtrante, son tres los arreglos más comúnmente usados (figura 3.7):

- Un solo medio, arena o antracita.
- Un medio dual, arena y antracita.
- Un lecho mezclado, arena, antracita y granate o ilmenita.

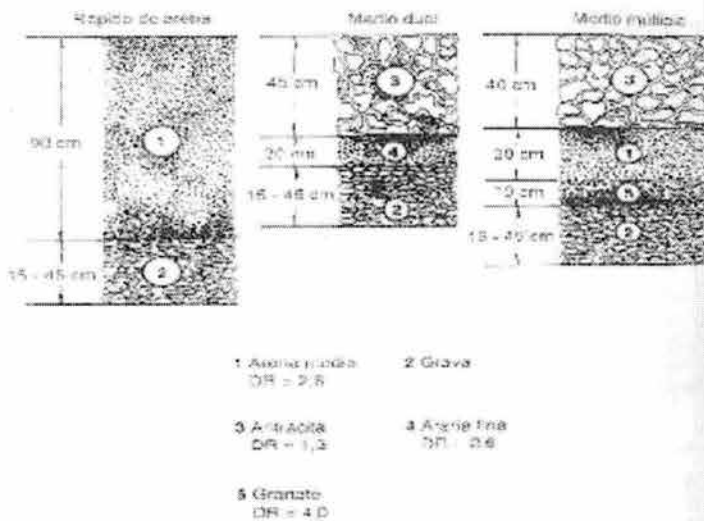


Figura 3.7. Medios de filtración.

- De acuerdo con la fuerza impulsora utilizada para vencer la resistencia friccional ofrecida por el lecho filtrante, los filtros se clasifican en filtros de gravedad y filtros a presión. Los primeros son de hecho los más antiguos y básicamente son cisternas gigantes construidas en concreto u hormigón con su parte superior abierta que contiene agua, un medio filtrante granular y accesorios en su parte inferior que permiten recolectar el agua filtrada. Los filtros a presión son unidades cerradas por las cuales se circula agua con la presión generada por una columna de agua, un sistema de bombeo u otra fuente de presión.
- En cuanto a la tasa de filtrado, se tienen dos diferentes tipos de filtros: los de filtrado lento que utilizan por lo general una capa de arena fina de 1 metro soportada sobre un lecho de grava de aproximadamente 0.30 metros y los de filtrado rápido con tasas de filtración mucho mayores y por consiguiente, con requerimientos de área mucho menores (figuras 3.8 y 3.9).

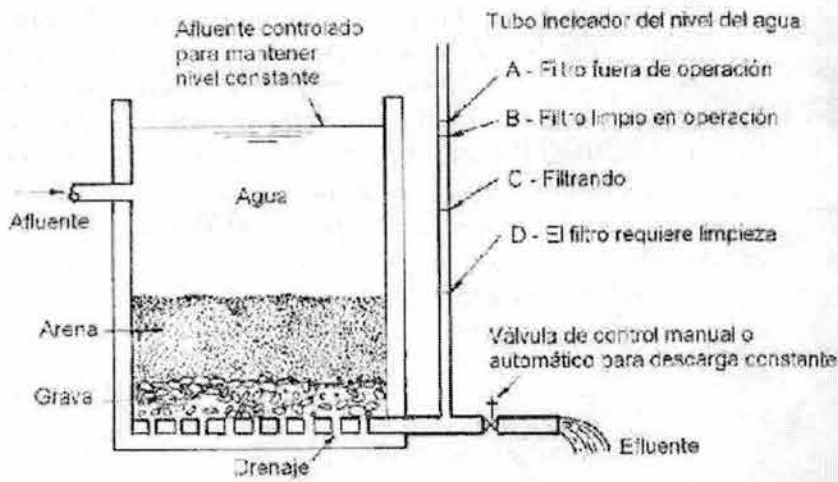


Figura 3.8. Filtrado lento.

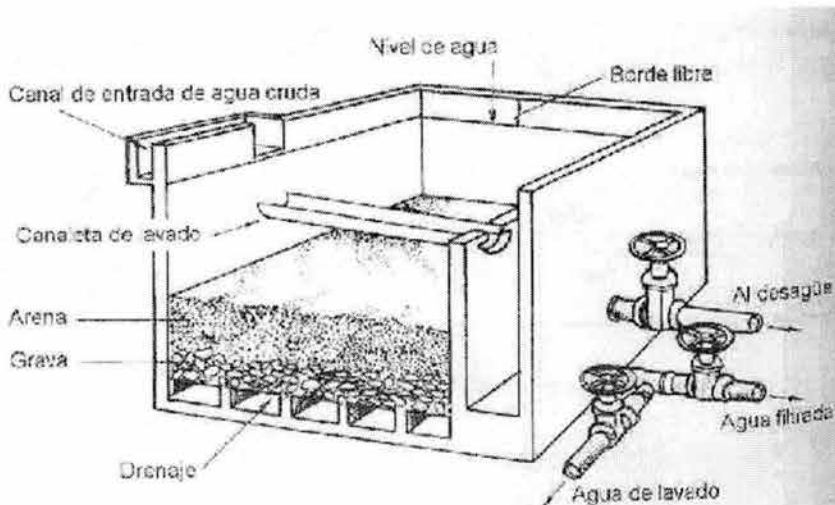


Figura 3.9. Filtrado rápido.

b. Filtros sencillos.

Son filtros cartucho removibles de fácil manejo y operación. Básicamente constan de un alma interior (cartucho), una caja exterior (cilindro) y una membrana que recubre a las partes interiores (figura 3.10).

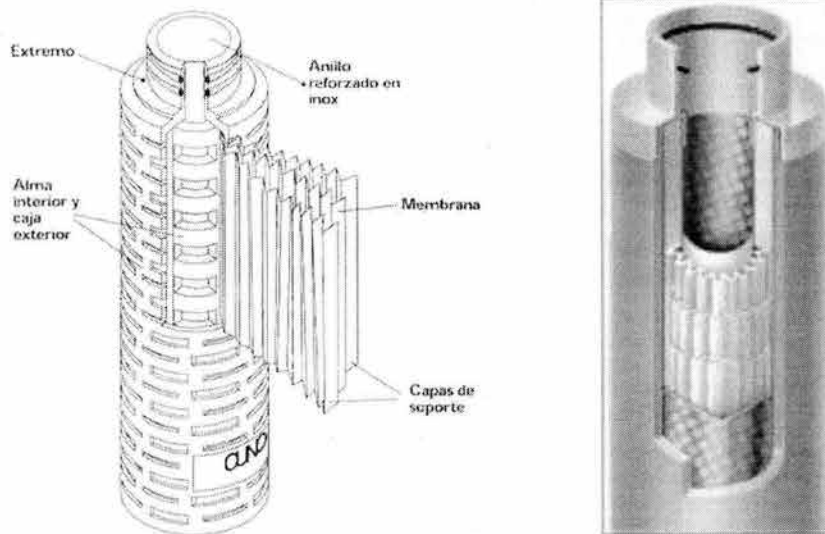


Figura 3.10. Filtro tipo cartucho.

El funcionamiento de un filtro típico de cartucho es en realidad muy sencillo, el cartucho está constituido por diversas capas filtrantes sobrepuestas, cada una de las cuales desarrolla una precisa función. El agua contaminada que atraviesa el cartucho del interior hacia el exterior, encuentra una capa de fibra de celulosa impregnada con resina que hace la función de prefiltro y remueve las partículas sólidas de dimensiones superiores a 5 micras. Sucesivamente, el fluido pasa a través de una capa coalescente en donde se capturan partículas de dimensiones de hasta 0.01 micras, para finalmente, una vez condensadas en gotas ser empujadas por un flujo de aire sobre las paredes de una barrera antiarrastré. Esta barrera, ubicada en el exterior del cartucho, tiene la función de reunir dichas gotas de agua que por gravedad van a parar al fondo del contenedor. Los cilindros (que por lo general son de acero o de algún terpolímero o copolímero, polipropileno por ejemplo) tienen la función de soportar la presión diferencial debida a la obstrucción del cartucho y a eventuales golpes de ariete. Pueden soportar una presión diferencial de 3 bares garantizando una seguridad de filtración aún en el caso de falta de sustitución del elemento filtrante en el tiempo previsto. Es de resaltar que la acción coalescente no provoca la saturación del cartucho. La oclusión gradual viene provocada por las partículas sólidas atrapadas en el elemento filtrante. Por este motivo los elementos filtrantes están realizados con el cuerpo filtrante plegado de modo que se pueda obtener una superficie de distribución de las partículas sólidas muy elevada (aproximadamente 3-4 veces superior a un filtro convencional). Se logra una larga duración del filtro y una baja pérdida de carga aún después de miles de horas de funcionamiento.

Algunas de las ventajas de los filtros tipo cartucho son las siguientes:

- Ligeros y de fácil instalación.
- Ocupan poco espacio.
- No tienen conexiones mecánicas complejas.

Mientras que entre las desventajas que estos presentan se pueden numerar las siguientes:

- No pueden regenerarse.
- Filtran volúmenes relativamente pequeños.



Los filtros con menor tamaño de tamiz (menor micronaje) son los que más sólidos suspendidos retienen y por lo tanto, los que más rápido requieren de un cambio o lavado, debido a su taponamiento. Dado que el tamaño de los sedimentos es muy pequeño, se utiliza una unidad de medida especial para indicar que nivel de filtración provee un determinado filtro. Esta unidad de medida se conoce como micra (μm) y representa 1/1000 de un milímetro.

3.5. Adsorción con carbón activado.

La adsorción es un proceso por el cual moléculas con impurezas se adhieren a la superficie del carbón activado. La adherencia es gobernada por una atracción electroquímica. El carbón activado es preparado a partir de diversos materiales, tales como carbón, madera, cáscaras de nueces, turba y petróleo. El carbón se transforma en "activado" cuando es calentado a altas temperaturas (800 a 1000°C) en la ausencia de oxígeno. El resultado es la creación de millones de poros microscópicos en la superficie del carbón. Esta enorme cantidad de área superficial proporciona grandes oportunidades para que tenga lugar el proceso de adsorción. El carbón activado tiene una fuerte atracción adsorptiva para otras moléculas orgánicas basadas en el elemento químico de carbono, y es excelente para retener firmemente moléculas más pesadas tales como compuestos orgánicos aromáticos. El proceso de adsorción trabaja como un imán para mantener las impurezas en la superficie del carbón activado. Cabe mencionar que esta acción de adsorción es diferente de aquella que actúa como una esponja (proceso de absorción), en la cual un gas o líquido es succionado hasta el centro del cuerpo poroso y allí es mantenido. El carbón activado también es conocido por su extraordinaria habilidad para eliminar el cloro junto con el sabor y olor que este conlleva.

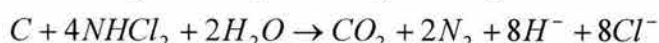
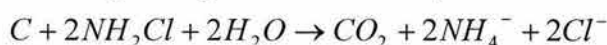
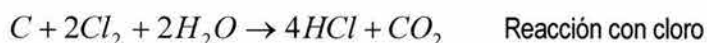
Los filtros de carbón activado remueven los compuestos orgánicos volátiles (VOC), los pesticidas y herbicidas, los compuestos con trihalometano, radón, los solventes y algunos otros productos presentes en el agua.

Los compuestos orgánicos volátiles (VOC) contienen carbono (llamado carbón orgánico). Cuando están presentes en el agua a bajas concentraciones, algunos de ellos producen un suave y agradable olor. Estos pueden contaminar las aguas desde una gran variedad de fuentes. El benceno, por ejemplo, puede entrar y contaminar el agua a través de la gasolina o el aceite sobre una gran superficie o propagarse en los conductos subterráneos de los tanques de petróleo. Otros ejemplos de contaminación detectados por los VOC son el diclorometano utilizado como solvente industrial, el tricloroetileno y el tetracloroetileno usados como antisépticos en los sistemas de limpieza.

Los compuestos orgánicos volátiles pueden tener serios efectos sobre la salud. A altas concentraciones pueden causar problemas psicológicos al atacar el sistema nervioso central tales como depresión, decaimiento y estupor. También pueden causar irritación al contacto con la piel o en las membranas mucosas por inhalación.

Hablando de la decloración, esta consiste en la eliminación de la totalidad del cloro combinado residual presente en el agua después del proceso de desinfección con cloro, para reducir los efectos tóxicos de los efluentes descargados a los cursos de agua receptores o destinados a la reutilización.

La decloración mediante adsorción con carbón activado proporciona una completa eliminación tanto del cloro residual libre como del cloro combinado (se ha mencionado anteriormente que la presencia de compuestos químicos orgánicos e inorgánicos pueden causar interferencias en el proceso de cloración, reaccionando con el cloro para formar compuestos tóxicos). Cuando se emplea carbón activado en el proceso de decloración, las reacciones que tienen lugar son las siguientes:



Reacciones con cloroaminas



La adsorción por el carbón activado es en general referida como un proceso de filtración. Las columnas de adsorción pueden ir instaladas en el punto del uso o en el punto de entrada.

3.6. Desmineralización.

Los suministros de agua natural contienen sales disueltas, las cuales se disocian en el agua para formar partículas con carga conocidas como iones. Estos iones están presentes por lo general en concentraciones relativamente bajas y permiten que el agua conduzca electricidad. Algunas veces se conocen como electrolitos. Estas impurezas iónicas pueden causar problemas en los sistemas de enfriamiento y calefacción, generación de vapor, y manufactura. Los iones comunes que se encuentran en la mayoría de las aguas incluyen los cationes de carga positiva tales como calcio y magnesio los cuales generan dureza en el agua, y el sodio. Los aniones de carga negativa incluyen alcalinidad, sulfatos, cloruros, y silicio.

Las resinas de intercambio iónico son particularmente adecuadas para la eliminación de estas impurezas por varias razones: poseen una alta capacidad de remoción de iones que se encuentran en bajas concentraciones, las resinas son estables y se regeneran fácilmente, los efectos de la temperatura son en su mayoría insignificantes, y el proceso es excelente tanto para grandes como para pequeñas instalaciones.

La mayor parte de los materiales de esferas de intercambio iónico se fabrican usando un proceso de polimerización de suspensión, que utiliza estireno y divinilbenzeno (DVB). El divinilbenzeno es un agente entrecruzante que le proporciona a las esferas su fuerza física y sin el cual el estireno sería soluble en el agua. La esfera de poliestireno-DVB necesita ser químicamente activa para funcionar como material de intercambio iónico. Los grupos activados son ligados para proporcionarle funcionalidad química a la esfera. Cada grupo activo posee una carga eléctrica física balanceada por un número equivalente de iones de carga opuesta, los cuales tienen la libertad de intercambiarse con otros iones de la misma carga. Las resinas catiónicas fuertes se forman tratando a las esferas con ácido sulfúrico concentrado (un proceso conocido como sulfonación) para formar grupos sulfónico-ácidos permanentes, de carga negativa, a través de las esferas. Aquí es importante el hecho de que los sitios de intercambio formados se encuentran ubicados a través de la esfera. El proceso de intercambio iónico no es un fenómeno de superficie; más del 99% de la capacidad de un material de intercambio iónico se encuentra en el interior de una esfera.

Las resinas aniónicas fuertes se activan en un proceso de dos pasos que consiste en la clorometilación seguida de la aminación. Este proceso de dos pasos comienza con el mismo material de estireno/DVB que se usa para las resinas catiónicas. La única diferencia es que la cantidad de DVB que se utiliza es menor para permitir una esfera más porosa.

Los requisitos básicos de los materiales de las esferas de intercambio iónico son la insolubilidad, el tamaño y su resistencia a las fracturas. La resina deberá ser insoluble bajo condiciones normales de operación. El hinchamiento y contracción de la esfera de resina durante el agotamiento y regeneración no deberán causar que revienten las esferas. Asimismo, una propiedad importante de las resinas de intercambio iónico es que el sitio activo se encuentra permanentemente ligado a la esfera.

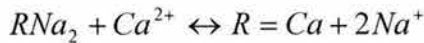
La selectividad o afinidad de resinas de intercambio iónico es influida por las propiedades de la esfera, los iones intercambiados y la solución en la cual están presentes los iones. El agua es un componente esencial en las resinas de intercambio iónico. Por ejemplo, las resinas catiónicas de ácido fuerte contienen más o menos 50 % de humedad. Así, una esfera con un alto contenido de humedad tiene alta porosidad y los grupos activos se encuentran más separados uno del otro. Las resinas de intercambio iónico por lo general tienen una mayor selectividad hacia los iones de mayor valencia o carga. Entre los iones con una misma carga se encuentran mayores afinidades hacia los iones con un número atómico más alto.

Estas relaciones de afinidad son revertidas en soluciones concentradas, lo que hace posible la regeneración de las resinas agotadas. Una resina catiónica agotada que se utiliza para suavizar por lo general se encuentra en forma de calcio o magnesio, de los cuales ambos son iones bivalentes. La resina es restaurada a su condición regenerada, la forma de sodio, introduciendo una solución de 10 % de cloruro de sodio. Esta solución de cloruro de sodio se encuentra suficientemente concentrada, alrededor de 100000 ppm, como para



revertir la selectividad. La fuerza impulsadora del ion monovalente del sodio luego convierte la resina a la forma de sodio.

Así entonces, de manera general podemos decir que las resinas de intercambio iónico son utilizadas para modificar la química del agua mediante remover iones indeseables presentes en esta sustituyéndolos con un número equivalente de iones amigables. Por ejemplo, una resina catiónica selectivamente remueve los iones de calcio por la siguiente reacción:



La reacción es reversible así que cuando la resina de intercambio iónico se satura con calcio, ella puede ser regenerada por el tratamiento con una solución concentrada de iones Na^+ ($NaCl$) (intercambio catiónico en ciclo sodio). Si el regenerante fuera un ácido fuerte como el HCl o el H_2SO_4 en lugar de una sal los iones metálicos podrían sustituirse con iones H^+ , es decir, la resina podría remover cationes mediante reemplazarlos con iones H^+ (intercambio catiónico en ciclo hidrógeno).

Los aniones son intercambiados de forma similar. La resina aniónica usualmente opera ya sea en ciclo hidróxido (regeneración con un álcali fuerte) o en ciclo cloruro (regeneración con $NaCl$).

Con el uso de resinas catiónicas (H^+) y aniónicas (OH^-) en serie, todos los cationes son reemplazados con iones H^+ y todos los aniones con iones OH^- ; el resultado es agua pura. A este proceso se le conoce como desmineralización o desionización.

Las resinas se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- Resinas catiónicas fuertes (CF). Son capaces de remover todos los cationes del agua. Muestran una mayor selectividad por los iones trivalentes, seguidos por los divalentes y monovalentes. Este tipo de resinas son regeneradas con un ácido fuerte (HCl o el H_2SO_4) y requieren un exceso de la cantidad teórica necesaria (200 a 300 %). También pueden emplearse en ciclo sodio regenerándose con $NaCl$. Sus límites típicos de temperatura son de 100 a 150°C.
- Resinas catiónicas débiles (CD). Estas intercambian iones H^+ por iones Ca^{2+} y Mg^{2+} con lo que se repone la alcalinidad de los carbonatos en el agua. Esta alcalinidad es convertida a ácido carbónico el cual es removido mediante un agotamiento con aire en un desgasificador (D). Las resinas ácidas débiles son regeneradas con un ácido fuerte y requieren sólo de un 110 a 120 % de la cantidad teórica necesaria.
- Resinas aniónicas fuertes (AF). Son capaces de remover todos los aniones del agua. Su selectividad es máxima para iones divalentes. Las resinas básicas fuertes son regeneradas con un álcali fuerte. Los límites de temperatura máxima son de 30 a 60°C.
- Resinas aniónicas débiles (AD). Estas remueven únicamente los aniones de ácidos fuertes (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-). Aniones de ácidos débiles (CO_3^{2-} , HCO_3^- , $HSiO_3^-$) no se remueven. Las resinas básicas débiles son regeneradas con un álcali débil (Na_2CO_3 , NH_4OH) o un álcali fuerte. La eficiencia de regeneración es mayor que la de una resina básica fuerte.

La tabla 3.6 presenta algunos de los arreglos más comunes que pueden ser aplicados de acuerdo a las características presentes en el agua a tratar.

| Arreglo | Aplicación | Ventajas y desventajas |
|---------|--|---|
| | <p>Sílice y CO₂ no son problema</p> | <p>Bajo costo en equipos y regenerantes</p> |
| | <p>El sílice no presenta problema, pero el CO₂ debe removerse</p> | <p>Bajo costo en regenerantes, pero se requiere rebombeo</p> |
| | <p>Agua alimentada con baja alcalinidad, el sílice debe removerse</p> | <p>Bajo costo en equipos. Alto consumo en químicos</p> |
| | <p>Agua alimentada con alta alcalinidad, el sílice debe removerse</p> | <p>Bajo costo en químicos. Se requiere de rebombeo</p> |
| | <p>Agua alimentada con alta alcalinidad, sulfatos y cloruros. El sílice debe removerse</p> | <p>Bajo costo en químicos. Alto costo en equipos. Se requiere de rebombeo</p> |

| | | |
|--|---|---|
| | <p>Agua con alta dureza, alcalinidad, sulfatos y cloruros. El sílice debe removerse</p> | <p>Bajo costo en químicos. Alto costo en equipos. Se requiere de rebombeo</p> |
| | <p>Agua alimentada con alta alcalinidad y sodio. Se requiere agua de alta pureza</p> | <p>Bajo costo en químicos. Alto costo en equipos. Se requiere de rebombeo</p> |

Tabla 3.6. Arreglos en sistemas de desmineralización.

3.7. Tratamiento de lodos.

La normatividad vigente (NOM-001-ECOL-1996) que tiene por objeto vigilar las descargas de efluentes provenientes de cualquier tipo de industria en aguas nacionales (consideradas como tales las aguas de ríos, mares, etc.), contempla límites que no pueden ser rebasados en la caracterización de dichos efluentes vertidos. Es por esa razón por la cual industrias de diversos ramos han implementado en sus procesos sistemas para controlar diferentes parámetros y de ese modo no salirse de los límites máximos permisibles establecidos por la reglamentación antes citada.

Así, para garantizar el cumplimiento con norma en materia de sólidos suspendidos totales (SST), es común la propuesta de sistemas de tratamiento de lodos provenientes de fuentes tales como clarifloculadores o sedimentadores. Uno de los equipos que goza de amplia aceptación para este propósito es el filtro prensa.

El filtro prensa es un separador de líquidos y sólidos a través de filtración por presión (figura 3.11). Utiliza un método simple y confiable para lograr una alta compactación. Es capaz de comprimir y deshidratar sólidos hasta obtener del 25% al 60% por peso de los lodos compactados. Tiene una capacidad que va desde 0.5 a 300 pies cúbicos. Puede ser fabricado en acero al carbón con recubrimiento de pintura epóxica de alta resistencia química o acero inoxidable. Las placas filtrantes desmontables están hechas de polipropileno, y las mallas pueden ser de tipo selladas, no selladas o membranas de alta resistencia. Cuenta con un sistema hidráulico-neumático que puede ser automático o semiautomático.

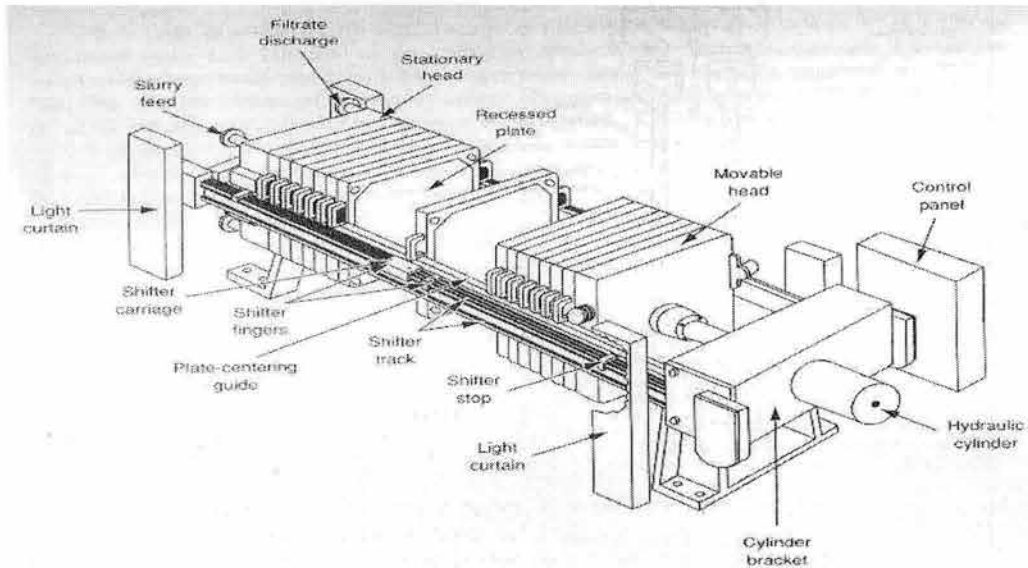


Figura 3.11. Filtro prensa típico.

La operación del filtro prensa es como sigue (figura 3.12):

El lodo líquido es bombeado a las cámaras (A) rodeadas por lonas filtrantes (B). Al bombear, la presión se incrementa y fuerza al lodo a atravesar las lonas, provocando que los sólidos se acumulen y formen una pasta seca (C). El pistón (D) hidráulico empuja la placa de acero (E) contra las placas de polietileno (F) haciendo la prensa. El cabezal (G) y el soporte terminal (H) son sostenidos por rieles de las barras de soporte (I), diseñados especialmente. El filtrado pasa a través de las lonas y es dirigido hacia los canales de las placas y puertos de drenado (J) del cabezal para descarga. Este filtrado típicamente contendrá menos de 15 ppm (mg/l) en sólidos suspendidos. La torta es fácilmente removida haciendo retroceder el pistón neumático, relajando la presión y separando cada una de las placas, para permitir que la pasta compactada caiga desde la cámara.

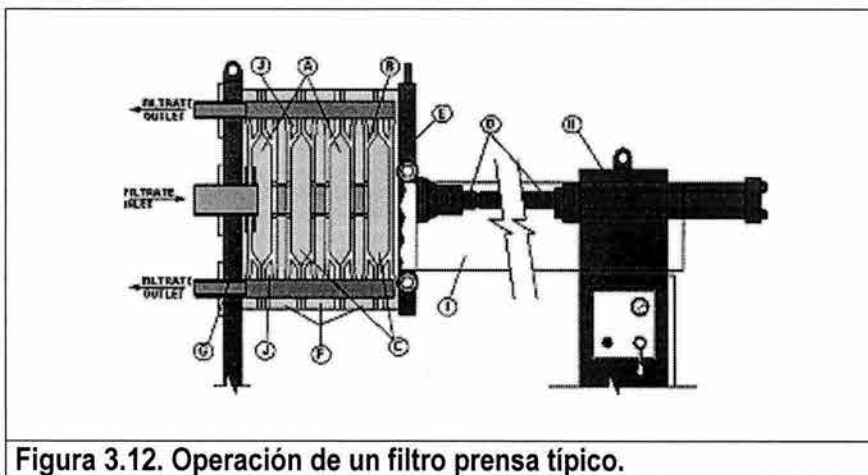


Figura 3.12. Operación de un filtro prensa típico.

3.8. Separación de grasas y aceites.

La normatividad vigente (NOM-001-ECOL-1996) que tiene por objeto vigilar las descargas de efluentes provenientes de cualquier tipo de industria en aguas nacionales (consideradas como tales las aguas de ríos, mares, etc.), contempla límites que no pueden ser rebasados en la caracterización de dichos efluentes vertidos. Es por esa razón por la cual industrias de diversos ramos han implementado en sus procesos sistemas para controlar diferentes parámetros y de ese modo quedar dentro de los límites máximos permisibles establecidos por la reglamentación antes citada.

Así, para garantizar el cumplimiento con norma en materia de grasas y aceites (SST), son comunes propuestas de sistemas para la separación de grasas y aceites depositadas en el agua y provenientes de las plantas de proceso y de otras fuentes que derraman este tipo de contaminantes.

Los diferentes métodos de remoción de grasas y aceites pueden clasificarse como primarios (separación gravitacional) o secundarios (flotación con gas disuelto, métodos químicos, entre otros) los cuales utilizan adición de químicos o sistemas avanzados para la separación.

➤ **Sistemas primarios (separación por gravedad).**

La función principal de los separadores por gravedad es remover las grasas y aceites del agua residual, sin embargo, tales separadores no pueden remover los contaminantes que se encuentran solubles, ni tampoco pueden romper emulsiones.

Los equipos más comunes dentro de esta clasificación son los "Separadores API" (por sus siglas en inglés, American Petroleum Institute) y los "Interceptores de Placas Corrugadas" conocidos también como CPI's (por sus siglas en inglés, Corrugated Plate Interceptors).

El separador API es un contenedor rectangular o circular en el cual el influente fluye horizontalmente mientras el aceite libre asciende a la superficie debido a la flotabilidad de este en el agua. Teóricamente todas las gotas de aceite tienen velocidades ascendentes mayores que la velocidad del flujo lo que permite que puedan ser removidas en la superficie.

En el caso de los CPI el corazón de estos es un paquete de placas corrugadas cuyo número oscila entre 12 y 48 (0.05 in de espesor) montadas paralelamente entre ellas con una distancia de entre 0.75 –1.5 in. El paquete de placas es instalado con 45° grados de inclinación con respecto a la horizontalidad del tanque. El flujo de agua pasa a través de las placas, la fase aceitosa asciende en la parte superior en donde se estimula la coalescencia y finalmente alcanzan la parte superior del tanque CPI (figura 3.13).

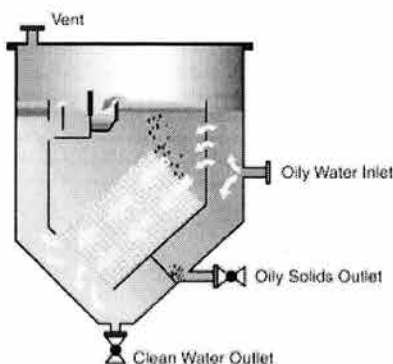


Figura 3.13. Separador de placas corrugadas CPI.

➤ Sistemas secundarios

Dentro de estos sistemas se encuentran los equipos que utilizan aire o algún otro gas para mejorar la separación; los más comunes son los Separadores DAF (Disolved Air Flotation), IAF (Induced Air Flotation) y los IGF's (Induced Gas Flotation); estos métodos llegan a remover el aceite emulsificado mediante aire disuelto.

Los DAF's son tanques en los cuales el influente es recirculado por medio de una corriente alterna a este, esta recirculación se lleva a cabo con la finalidad de disolver aire dentro de la recirculación ; esto se logra con un tanque secundario a presión; una vez que esta corriente se encuentra saturada de aire se retorna al tanque de separación el cual se encuentra a presión atmosférica; el aire saturado empieza a liberarse en forma de micro burbujas debido al cambio de presión, estas micro burbujas aumentan la flotabilidad del aceite en el agua facilitando su separación (figura 3.14).

Los sistemas IAF e IGF tienen el mismo principio que los DAF's; la separación es por medio de aire, pero la diferencia es que únicamente se induce el aire, es decir, este no se disuelve, por lo que carecen del sistema de presión para saturar la corriente de recirculación. El aire o gas (para el caso de los IGF's), es inducido por medio de difusores o por tubos multioradados para introducir pequeñas burbujas de gas y/o aire para estimular la separación del aceite del agua. Los sistemas IGF's se utilizan cuando el influente del sistema tiene condiciones explosivas, por lo que para evitar cualquier incidente en lugar de usar aire, se utiliza un gas inerte (figura 3.15).

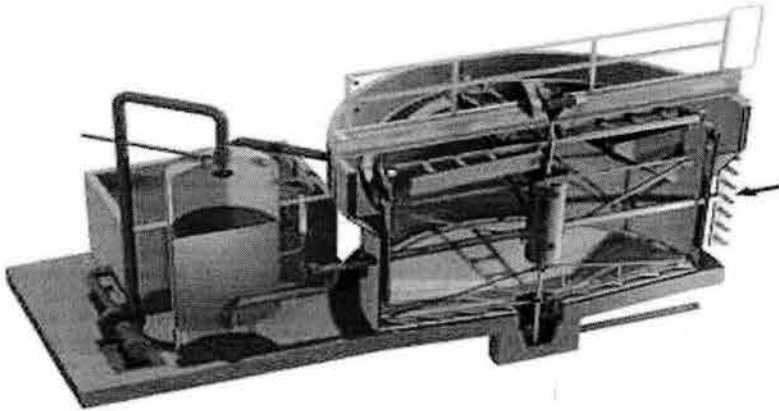


Figura 3.14. Separador DAF.

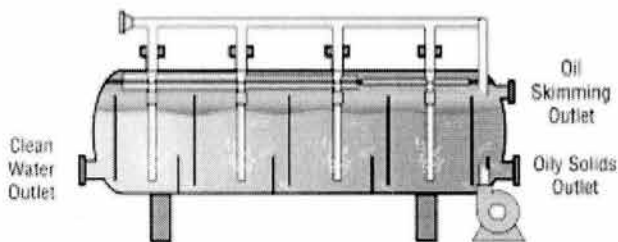


Figura 3.15. Separador IAF/IGF.



4. MEDICIÓN DE VARIABLES DE PROCESO.



4.1. Concepto de medición.

Consiste en conocer el valor de una variable de proceso mediante la ayuda de instrumentos ya sea indicadores o registradores.

Instrumento indicador. Es un aparato que mediante indicación analógica o digital proporciona el valor de la variable del proceso, por ejemplo, en un manómetro con indicación se puede saber el valor de la presión leyendo sobre la escala del instrumento el valor en el cual se queda fija la aguja o puntero.

Instrumento registrador. Es un aparato que utiliza una gráfica graduada en unidades de medición y una plumilla que va imprimiendo continuamente sobre la gráfica la trayectoria de la variable de proceso; el tipo de registrador puede ser analógico o digital; en estos se pueden programar para registrar valores máximos, mínimos o promedios dentro del tiempo de lectura del procesador.

Instrumentos de medición para lectura remota. Son los instrumentos que van colocados en el cuarto de medición y control en donde el operario lee el valor de las variables de proceso de manera lejana, ya que los sensores de medición de estos instrumentos están colocados en campo junto a los equipos de proceso.

Instrumentos de medición para lectura local. Son instrumentos que van colocados en campo junto al proceso y para conocer el valor de las variables medidas el operador únicamente lee la carátula del indicador montado localmente.

Lecturas locales y remotas. En un proceso dependiendo de la importancia de las variables medidas, existen lecturas remotas, lecturas locales y lecturas remotas y locales. En todo proyecto para el cual se requiere realizar medición de variables de proceso se proporciona una lista de materiales para los instrumentos, en donde se especifica para cada punto de medición el tipo de lectura requerida para el proceso.

Algunos conceptos básicos en la medición de variables involucradas en un proceso, son los relacionados con la instrumentación que está dentro de un circuito de control.

Un circuito de control es un conjunto de instrumentos en unión con un proceso, arreglados de manera que el proceso pueda ser controlado asegurando la estabilidad del sistema (figura 4.1). Los elementos que conforman un circuito de control son los siguientes:

- Elemento sensor.

Es el dispositivo que al igual que los sentidos humanos detecta el valor de las variables del proceso siguiendo principios físicos o químicos conocidos; a estos dispositivos también se les conoce como "elementos primarios de medición".

- Elemento secundario.

Es todo aquel componente que detecta o infiere la magnitud escalar inducida por un elemento primario, cuando este no es capaz de detectarla directamente.

- Transmisor.

Es el dispositivo que convierte la señal detectada por el elemento primario (nivel, presión, presión diferencial, etc.), en una señal estándar en unidades de presión (3 a 15 lb/in²) o eléctrica (4-20 mA CD), con el propósito de enviarse a una distancia más o menos considerable (generalmente mayor de 30 m) sin que la señal se degenere o deforme.

- Controlador.

Es la parte inteligente del circuito de control donde se detecta la desviación de la variable controlada recibida desde el transmisor, con respecto del valor deseado o punto de ajuste; después esta desviación es tratada matemáticamente para enviar una señal al elemento final de control (por lo general una válvula), con la finalidad de eliminar la desviación que tenga la variable controlada del punto de ajuste.

- Transductor.

Dispositivo dentro de un circuito de control cuyo propósito es el de convertir la señal eléctrica de 4 a 20 mili amperes proveniente del controlador en una señal neumática de 3 a 15 psi. Esta última constituye la señal de entrada del elemento final de control mediante la cual se corrigen las desviaciones de la variable con respecto al punto de ajuste

- Elemento final de control.

Es el componente del circuito de control que recibe la señal del equipo de control con la cual altera la relación de materia y/o energía que entra modificando así el valor de la variable controlada para corregir las desviaciones de esta variable con respecto al punto de ajuste (valor de referencia de la variable controlada). El elemento final de control más comúnmente encontrado en los procesos industriales es la válvula neumática de control. Esta consta de dos partes principales: el cuerpo y el actuador. El tipo de actuador depende principalmente de la fuerza que se requiera para mover el vástago de la válvula y puede ser neumático de diafragma, tipo pistón (para aplicaciones de control de apertura-cierre), auto-operado y eléctrico. El cuerpo de la válvula depende de las aplicaciones tales como tipo de fluido, presión en la línea, caídas de presión requeridas, niveles de ruido permitidos y sobre todo de las necesidades de control; pueden ser de globo, mariposa, tipo bola (recomendables para control de apertura-cierre), tipo aguja, entre otras. Un accesorio que llevan las válvulas es el posicionador, el cual se cerciora de que la válvula se coloque donde lo manda el controlador.

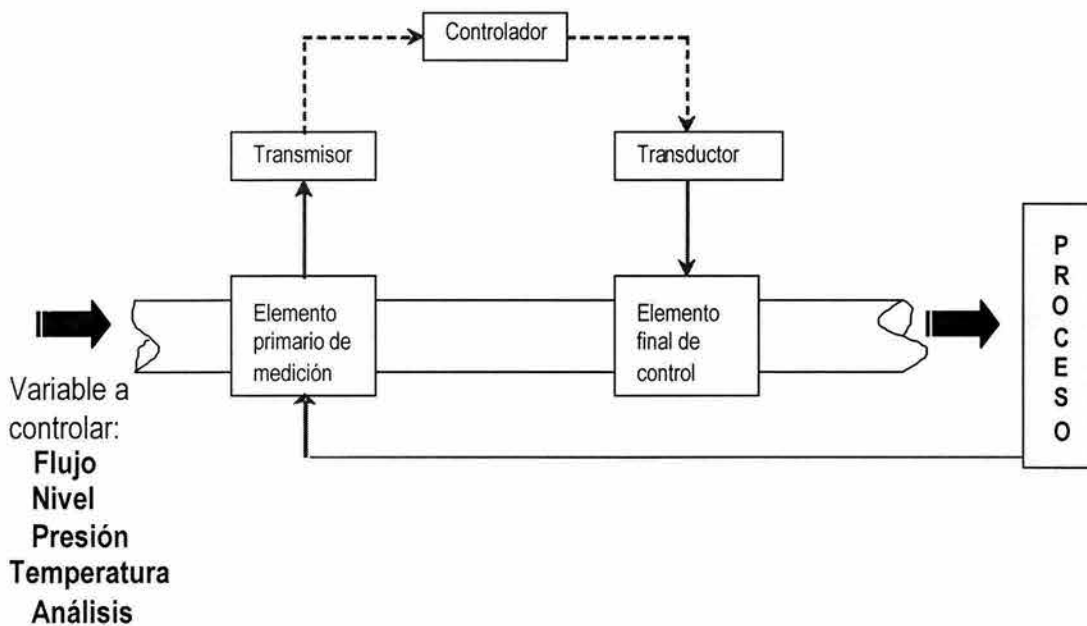


Figura 4.1. Circuito de control típico.

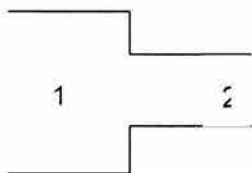
4.2. Medición de flujo.

El método más común para transportar un fluido de un punto a otro es impulsarlo a través de un sistema de tuberías. En la solución de cualquier problema de flujo de fluidos se requiere del conocimiento previo de las propiedades físicas del líquido en cuestión, tales como la viscosidad y el peso específico.

La viscosidad expresa la facilidad que tiene un fluido para fluir cuando se le aplica una fuerza externa. El coeficiente de viscosidad absoluta es una medida de la resistencia del fluido al desplazamiento o a sufrir deformaciones internas. La unidad en el sistema internacional es el newton segundo por metro cuadrado ($N \cdot s / m^2$), mientras que en el sistema CGS es el poise (dina segundo por centímetro cuadrado o de gramos por centímetro segundo). El submúltiplo centipoise (cP) 10^{-2} poises, es la unidad más utilizada para expresar la viscosidad dinámica o absoluta. La viscosidad del agua a $20^\circ C$ es muy cercana a un centipoise o 0.001 pascal segundos. La viscosidad cinemática es el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad y su unidad en CGS es el stoke (St) con dimensiones de centímetro cuadrado por segundo (cm^2 / s) mientras que el centistoke (cSt) 10^{-2} stokes, es el submúltiplo más utilizado. La medición de la viscosidad absoluta (especialmente de gases y vapores) resulta complicada mientras que para la viscosidad cinemática se puede utilizar un simple viscosímetro de tubo para la medición. El efecto de la presión sobre la viscosidad de líquidos y gases es tan pequeño que se considera despreciable, mientras que en lo concerniente a la temperatura, al aumentar esta, la viscosidad de los líquidos disminuye y la viscosidad de los gases aumenta. La densidad de una sustancia es su masa por unidad de volumen. En sistema internacional SI se expresa como kilogramo por metro cúbico mientras que en CGS se usan g / cm^3 . El volumen específico es el inverso de la densidad y las unidades para este son metros cúbicos por kilogramo (m^3 / Kg) o litros por kilogramo. El peso específico (o densidad relativa) es una medida relativa de la densidad. Como la presión tiene un efecto insignificante sobre la densidad de los líquidos, la temperatura es la única variable que debe tenerse en cuenta al sentar las bases para el peso específico. La densidad relativa de un líquido es la relación de su densidad a cierta temperatura con respecto a la densidad del agua a una temperatura normalizada ($15^\circ C$). La densidad relativa de los gases se define como la relación entre su peso molecular y el del aire, o como la relación entre la constante individual del aire y la del gas.

Principios fundamentales.

Un fluido puede moverse en dos tipos de condiciones o formas; el tipo de flujo que existe a velocidades más bajas que la crítica se conoce como régimen laminar, caracterizado por el deslizamiento de capas cilíndricas concéntricas una sobre otra de manera ordenada. La velocidad del fluido es máxima en el eje de la tubería y disminuye rápidamente hasta anularse en la pared de la tubería. A velocidades mayores que la crítica, el régimen es turbulento, en el cual hay un movimiento irregular e indeterminado de las partículas del fluido en direcciones transversales a la dirección principal del flujo; la distribución de velocidades en este último es más uniforme en la tubería que en el régimen laminar. A pesar de que existe un movimiento turbulento a través de la mayor parte del diámetro de la tubería, siempre hay una pequeña capa de fluido en la pared de la tubería, conocida como "capa periférica" o "subcapa laminar" que se mueve en régimen laminar. El término velocidad se refiere a la velocidad media o promedio de cierta sección transversal (figura 4.2), dada por la ecuación de continuidad para un flujo estacionario de acuerdo a la ley de la conservación de la masa:



$$v = \frac{q}{A} = \frac{W}{A\rho}$$

$$W_1 = W_2 = v_1\rho_1A_1 = v_2\rho_2A_2 = W = \text{constante}$$

Figura 4.2. Balance de materia para la ecuación de continuidad.



Las investigaciones de Osborne Reynolds han demostrado que el régimen de flujo en tuberías (laminar o turbulento) depende del diámetro de la tubería, de la densidad y la viscosidad del fluido y de la velocidad del flujo. El valor numérico de una combinación adimensional de estas cuatro variables, conocido como el número de Reynolds, puede considerarse como la relación de las fuerzas dinámicas de la masa del fluido respecto a los esfuerzos de deformación ocasionados por la viscosidad; así, el número de Reynolds es:

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu}$$

De acuerdo a estudios realizados, el régimen de flujo en tuberías se considera como laminar si el número de Reynolds es menor que 2000 y turbulento si es mayor a 4000. Entre estos dos valores está la zona denominada "crítica" en donde el régimen de flujo es impredecible, pudiendo ser laminar, turbulento o de transición.

El teorema de Bernoulli es una expresión de la ley de la conservación de la energía aplicada al flujo de fluidos en una tubería. La energía total en un punto cualquiera por encima de un plano horizontal arbitrario fijado como referencia, es igual a la suma de la altura geométrica, la altura debida a la presión y la altura debida a la velocidad, es decir:

$$Z + \frac{P}{\rho g_n} + \frac{v^2}{2g_n} = H$$

Si las pérdidas por fricción se desprecian y no se aporta o se toma ninguna energía del sistema de tuberías (bombas o turbinas), la altura total H en la ecuación anterior permanecerá constante para cualquier punto del fluido. Sin embargo, en la realidad existen pérdidas o incrementos de energía que deben incluirse en la ecuación de Bernoulli. Por lo tanto, el balance de energía puede escribirse para dos puntos del fluido (figura 4.3). Nótese que la pérdida por fricción en la tubería desde el punto uno al punto dos (h_L) se expresa como la pérdida de altura en metros (o pies) de fluido. La ecuación puede escribirse de la siguiente manera:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho_1 g_n} + \frac{v_1^2}{2g_n} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho_2 g_n} + \frac{v_2^2}{2g_n} + h_L$$

El flujo de fluidos en tuberías está siempre acompañado de fricción de las partículas del fluido entre si y, consecuentemente por la pérdida de energía disponible; en otras palabras, tiene que existir una pérdida de presión en el sentido del flujo. La ecuación general de la pérdida de presión, conocida como la fórmula de Darcy es la siguiente:

$$h_L = \frac{fLv^2}{D2g_n} \quad \text{o} \quad \Delta P = \frac{\rho fLv^2}{2D} \quad \text{ya que } \Delta P = h_L \times \rho \times g_n$$

La ecuación de Darcy es válida tanto para flujo laminar como turbulento de cualquier líquido en una tubería. Sin embargo puede suceder que debido a velocidades extremas la presión corriente abajo disminuya de tal manera que llegue a igualar la presión de vapor del líquido, apareciendo el fenómeno conocido como cavitación y los caudales obtenidos por cálculo serán inexactos. Así, la ecuación de Darcy muestra la pérdida de presión debida a la fricción y se aplica a tubería de diámetro constante por la que pasa un fluido cuya densidad permanece razonablemente constante. El factor de fricción f en la ecuación de Darcy para condiciones de flujo laminar depende únicamente del número de Reynolds, mientras que para flujo turbulento es también función de la rugosidad relativa de las paredes de la tubería ϵ / d , es decir, la rugosidad de las

paredes de la tubería (ϵ) comparada con el diámetro interno de la tubería (d). Para tuberías muy lisas como las de latón extruido o vidrio, el factor de fricción disminuye más rápidamente con el aumento del número de Reynolds que para tuberías con paredes más rugosas. La rugosidad de las paredes tiene mayor efecto en el factor de fricción para diámetros pequeños; así, tuberías de pequeño diámetro se acercan a la condición de gran rugosidad y en general tienen mayores factores de fricción que tuberías del mismo material pero de mayores diámetros.

Las pérdidas por fricción en tuberías son muy sensibles a los cambios de diámetro y rugosidad de las paredes. Para un caudal determinado y un factor de fricción fijo, la pérdida de presión por metro de tubería varía inversamente a la quinta potencia del diámetro. Por ejemplo, si se reduce en 2 % el diámetro, causa un incremento en la pérdida de presión del 11 %. En muchos de los servicios el interior de la tubería se va incrustando con cascarilla, tierra y otros materiales extraños, además de la corrosión; por ello la rugosidad se incrementa con el uso en una proporción determinada por el material de la tubería y la naturaleza del fluido.

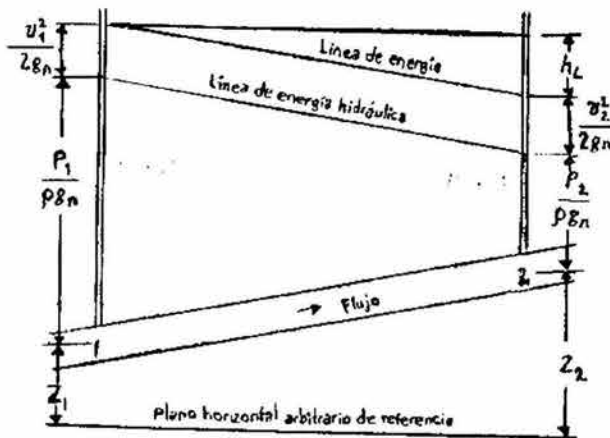


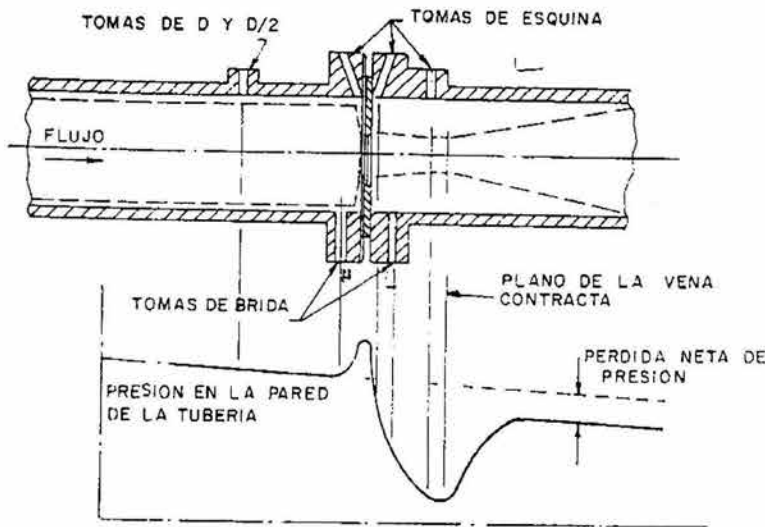
Figura 4.3. Balance de energía para 2 puntos de un fluido.

Nomenclatura.

| | |
|--------|--|
| A | Área de la sección transversal de la tubería en metros cuadrados (m^2) o ft^2 |
| C | Coefficiente de flujo o eficiencia con la cual la presión se convierte en velocidad |
| D | Diámetro interior de la tubería en metros (m) o pies (ft) |
| f | Factor de fricción |
| g | Aceleración de la gravedad igual a 9.8 m/s ² o 32.2 ft/s ² |
| h_L | Pérdida de carga debida al flujo del líquido en metros (m) o pies (ft) |
| H | Altura total expresada en metros de columna del líquido (m) o pies (ft) |
| L | Longitud de la tubería en metros (m) o pies (ft) |
| P | Presión manométrica en Newtons por metro cuadrado (Pascal) o lb/pulg ² |
| q | Caudal en metros cúbicos por segundo (m ³ /s) o pies cúbicos por segundo (ft ³ /s) |
| Re | Número de Reynolds |
| v | Velocidad media de flujo en metros por segundo (m/s) o pies por segundo (ft/s) |
| W | Caudal en kilogramos por segundo (kg/s) o libras por segundo (lb/s) |
| Z | Altura sobre el nivel de referencia en metros (m) o pies (ft) |
| μ | Viscosidad absoluta en centipoises (cP) |
| ρ | Densidad del líquido en kilogramos por metro cúbico (kg/m ³) o lb/ft ³ |

Dispositivos de medición de flujo.

1. Placa de orificio.



Estos elementos consisten de una placa circular plana metálica con una perforación concéntrica. La medición del flujo es por diferencia de presiones, colocando tomas antes y después de la placa de orificio. Esta placa de orificio, que es el elemento primario de medición, ocasiona una caída de presión y las tomas antes y después del orificio se conectan a un medidor de presión diferencial. Este dispositivo mide líquidos limpios y de baja viscosidad, gases y vapor de agua.

Figura 4.4. Placa de orificio.

La siguiente tabla enlista las capacidades de las placas de orificio dependiendo del diámetro de la tubería y del flujo.

| Diámetro de la tubería | Diámetro Interno tubería cédula 40 | Diámetro máximo del orificio de la placa | Rango del manómetro | Flujo | | |
|------------------------|------------------------------------|--|---------------------------|---------------------------------|---------------------------|--|
| | | | | Líquido (gravedad específica=1) | Vapor Saturado (100 psig) | Gas (gravedad específica=1, 100 psig, 60 °F) |
| Pulgadas | Pulgadas | Pulgadas | Pulgadas H ₂ O | Gal / min | Lb/hr | Ft ³ / min |
| 1 | 1.049 | 0.734 | 200 | 30 | 960 | 295 |
| | | | 100 | 21.2 | 680 | 240 |
| | | | 50 | 15 | 480 | 170 |
| | | | 20 | 9.5 | 305 | 108 |
| | | | 10 | 6.7 | 215 | 75 |
| 1½ | 1.610 | 1.127 | 200 | 70.7 | 2270 | 795 |
| | | | 100 | 50 | 1600 | 565 |
| | | | 50 | 35.4 | 1130 | 400 |
| | | | 20 | 22.4 | 720 | 253 |
| | | | 10 | 15.8 | 680 | 178 |
| 2 | 2.067 | 1.448 | 200 | 116 | 3740 | 1315 |
| | | | 100 | 83 | 2645 | 930 |
| | | | 50 | 58.5 | 1870 | 660 |
| | | | 20 | 37 | 1185 | 420 |
| | | | 10 | 26 | 840 | 295 |
| 3 | 3.068 | 2.147 | 200 | 255 | 8240 | 2900 |
| | | | 100 | 180 | 5830 | 2080 |
| | | | 50 | 127 | 4125 | 1460 |
| | | | 20 | 80 | 2610 | 920 |
| | | | 10 | 57 | 1840 | 655 |

| | | | | | | |
|----|--------|-------|-----|------|--------|-------|
| 4 | 4.026 | 3.020 | 200 | 524 | 16800 | 5510 |
| | | | 100 | 370 | 11900 | 3910 |
| | | | 50 | 262 | 8430 | 2770 |
| | | | 20 | 166 | 5320 | 1750 |
| | | | 10 | 117 | 3762 | 1240 |
| 6 | 6.065 | 4.550 | 200 | 1190 | 37800 | 12600 |
| | | | 100 | 840 | 26900 | 8950 |
| | | | 50 | 595 | 19100 | 6325 |
| | | | 20 | 376 | 12100 | 4000 |
| | | | 10 | 265 | 8560 | 2830 |
| 8 | 7.981 | 5.986 | 200 | 2080 | 65700 | 21900 |
| | | | 100 | 1475 | 45600 | 15500 |
| | | | 50 | 1045 | 32900 | 10950 |
| | | | 20 | 660 | 20800 | 6940 |
| | | | 10 | 465 | 14700 | 4900 |
| 10 | 10.020 | 7.515 | 200 | 3240 | 104100 | 34500 |
| | | | 100 | 2295 | 73600 | 24400 |
| | | | 50 | 1620 | 52100 | 17300 |
| | | | 20 | 1025 | 33000 | 10910 |
| | | | 10 | 725 | 23300 | 7720 |
| 12 | 11.939 | 8.950 | 200 | 4600 | 113000 | 49100 |
| | | | 100 | 3250 | 80000 | 34720 |
| | | | 50 | 2300 | 56600 | 24600 |
| | | | 20 | 1455 | 35800 | 15500 |
| | | | 10 | 1030 | 25300 | 10980 |
| 14 | 13.126 | 9.844 | 200 | 5560 | 178000 | 59400 |
| | | | 100 | 3930 | 126000 | 42000 |
| | | | 50 | 2780 | 89000 | 29700 |
| | | | 20 | 1755 | 56300 | 18800 |
| | | | 10 | 1240 | 39800 | 13250 |

Tabla 4.1. Capacidades de placas de orificio.

2. Tobera de flujo.

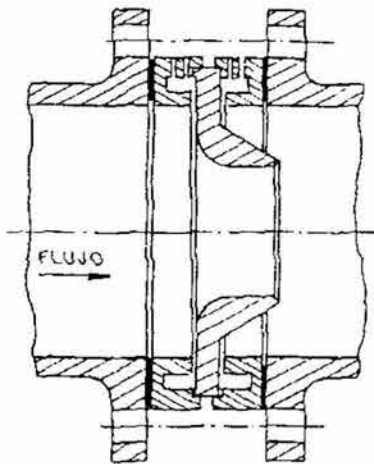


Figura 4.5. Tobera de flujo.

Cuando una placa de orificio se utiliza en la medición de flujo de vapor a alta presión y temperatura, existe la posibilidad de presentarse desgaste excesivo en el borde de la placa con lo cual los errores asociados a tal medición pueden ser grandes (2% o más). Así, una tobera de flujo se utiliza para la medición de flujos de vapor, aire o gases desplazados a altas velocidades. Todo elemento primario utilizado en la medición de flujo de vapor tiene sus tomas conectadas a cámaras de condensación protegidas por revestimientos de materiales especiales.

3. Tubo venturi. Consiste de una sección cilíndrica que conduce a una garganta cilíndrica de menor diámetro y de esta hacia una sección cilíndrica divergente de menor diámetro. Las secciones convergente y divergente trabajan con flujo laminar y por consiguiente, las pérdidas de presión son menores que en una placa de orificio o en una tobera.

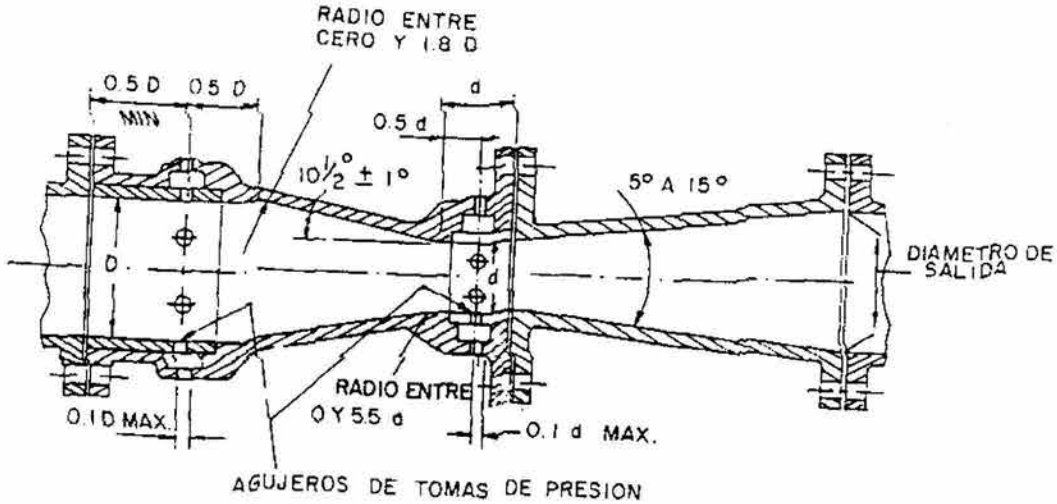


Figura 4.6. Tubo Venturi.

En la figura 4.7 se muestra la comparación de pérdidas de presión en por ciento con la relación "m" del elemento primario. Se define "m" como la relación entre el área de la garganta y el área total de la tubería.

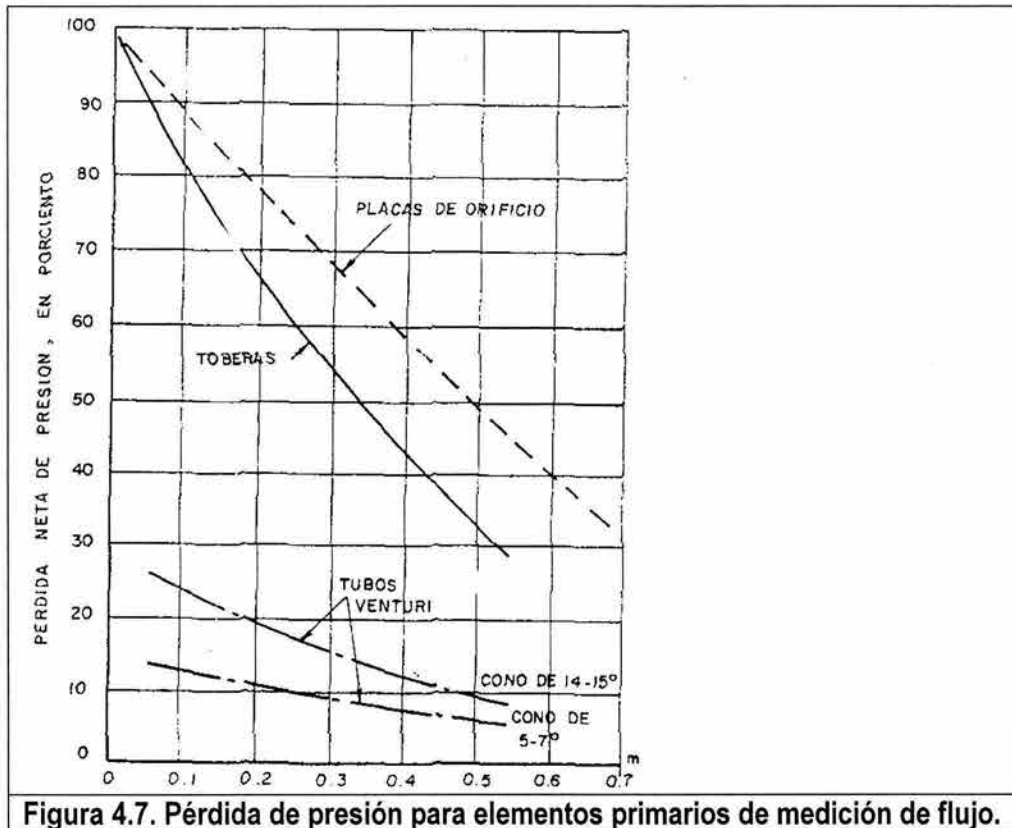
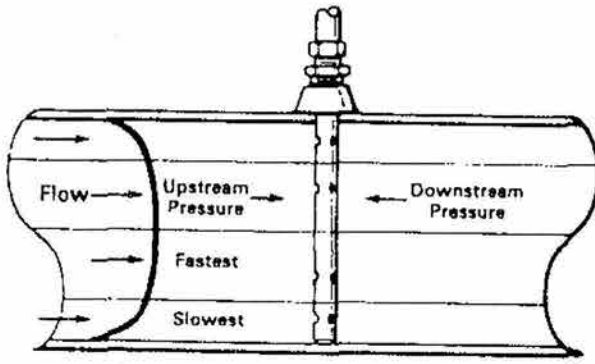


Figura 4.7. Pérdida de presión para elementos primarios de medición de flujo.

4. Flobar.



El tubo pitot es un dispositivo que consiste de dos tubos concéntricos, un interior directamente conectado al flujo corriente arriba de donde se transmite una presión total, mientras que mediante perforaciones en un tubo exterior se transmite una presión estática. El flobar es un tubo pitot con multipuertos en donde se genera una presión diferencial entre las filas de puertos corriente arriba y las filas de puertos corriente abajo. Este elemento presenta excelente resistencia a las vibraciones producidas por altas velocidades de flujo además de pérdidas de presión mínimas.

Figura 4.8. Flobar.

La siguiente tabla enlista las capacidades del flobar dependiendo del diámetro interno de la tubería y del flujo para líquidos, vapor de agua y gases.

| Flobar Capacities - Liquids | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------|--------------------|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| Size | K | Assumed Pipe I. D. | Differential Pressure in Inches of Water Flowrates in GPM | | | | | |
| | | | 5 | 10 | 20 | 50 | 75 | 100 |
| 0.50 | 0.315 | 0.622 | 1.5 | 2.2 | 3.1 | 4.9 | 6.0 | 6.9 |
| 0.75 | 0.420 | 0.824 | 3.6 | 5.1 | 7.2 | 11.4 | 14.0 | 16.2 |
| 1.00 | 0.540 | 1.049 | 7.5 | 10.7 | 15.1 | 23.8 | 29.2 | 33.7 |
| 1.25 | 0.550 | 1.380 | 13.7 | 19.4 | 27.4 | 43.4 | 53.1 | 61.3 |
| 1.50 | 0.573 | 1.610 | 18.8 | 26.6 | 37.6 | 59.5 | 72.9 | 84.2 |
| 2.00 | 0.595 | 2.067 | 32.2 | 45.6 | 64.4 | 101.9 | 124.8 | 144.1 |
| 2.50 | 0.630 | 2.469 | 48.7 | 68.8 | 97.3 | 153.9 | 188.5 | 217.7 |
| 3.00 | 0.640 | 3.068 | 76.3 | 108.0 | 152.7 | 241.4 | 295.7 | 341.4 |
| 4.00 | 0.648 | 4.026 | 133.1 | 188.3 | 266.2 | 421.0 | 515.6 | 595.3 |
| 5.00 | 0.620 | 5.047 | 200.2 | 283.1 | 400.3 | 633.0 | 775.2 | 895.1 |
| 6.00 | 0.637 | 6.065 | 297.0 | 420.0 | 593.9 | 939.1 | 1150.2 | 1328.1 |
| 8.00 | 0.645 | 7.981 | 520.7 | 736.4 | 1041.4 | 1646.6 | 2016.7 | 2328.6 |
| 10.00 | 0.636 | 10.020 | 809.3 | 1144.5 | 1618.5 | 2559.2 | 3134.4 | 3619.3 |
| 12.00 | 0.627 | 11.938 | 1132.5 | 1601.6 | 2265.0 | 3581.3 | 4386.2 | 5064.8 |
| 14.00 | 0.625 | 13.124 | 1364.4 | 1929.5 | 2728.7 | 4314.5 | 5284.1 | 6101.6 |
| 16.00 | 0.623 | 15.000 | 1776.6 | 2512.5 | 3553.2 | 5618.0 | 6880.7 | 7945.1 |
| 18.00 | 0.620 | 16.876 | 2237.9 | 3164.9 | 4475.9 | 7076.9 | 8667.4 | 10008.3 |
| 20.00 | 0.617 | 18.812 | 2767.4 | 3913.7 | 5534.8 | 8751.2 | 10718.0 | 12376.1 |
| 24.00 | 0.616 | 22.624 | 3996.1 | 5651.3 | 2992.2 | 12636.7 | 15476.8 | 17871.0 |
| 30.00 | 0.616 | 29.000 | 6565.9 | 9285.5 | 13131.7 | 20763.1 | 25429.5 | 29363.4 |
| 36.00 | 0.616 | 35.000 | 9563.8 | 13525.3 | 19127.7 | 30243.5 | 37040.5 | 42770.7 |
| 42.00 | 0.616 | 41.000 | 13123.9 | 18560.0 | 26247.8 | 41501.4 | 50828.7 | 58691.9 |
| 48.00 | 0.616 | 47.000 | 17246.1 | 24389.7 | 34492.2 | 54537.0 | 66739.9 | 77127.0 |



Flobar Capacities - Gases

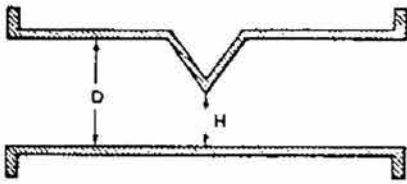
| Size | K | Assumed Pipe I.D. | Differential Pressure in Inches of Water Flowrates in SCFH | | | | | |
|-------|-------|-------------------|---|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | | 5 | 10 | 20 | 50 | 75 | 100 |
| 0.50 | 0.315 | 0.622 | 988.9 | 1398.5 | 1977.8 | 3127.2 | 3830.1 | 4422.6 |
| 0.75 | 0.420 | 0.824 | 2314.0 | 3272.6 | 4628.1 | 7317.7 | 8962.3 | 10348.7 |
| 1.00 | 0.540 | 1.049 | 4821.8 | 6819.1 | 9643.7 | 15248.0 | 18674.9 | 21563.9 |
| 1.25 | 0.568 | 1.380 | 8777.6 | 12413.4 | 17555.2 | 27757.2 | 33995.4 | 39254.5 |
| 1.50 | 0.573 | 1.610 | 12052.4 | 17044.7 | 24104.9 | 38113.1 | 46678.9 | 53900.1 |
| 2.00 | 0.595 | 2.067 | 20628.4 | 29173.0 | 41256.9 | 65232.8 | 79893.6 | 92253.2 |
| 2.50 | 0.630 | 2.469 | 31163.9 | 44072.3 | 62327.7 | 98548.7 | 120697.1 | 139369.0 |
| 3.00 | 0.640 | 3.068 | 48883.1 | 69131.2 | 97766.3 | 154582.1 | 189323.6 | 218612.0 |
| 4.00 | 0.648 | 4.026 | 85229.7 | 120533.0 | 170459.4 | 269520.0 | 330093.2 | 381158.8 |
| 5.00 | 0.620 | 5.047 | 128152.4 | 181234.8 | 256304.8 | 405253.4 | 496332.0 | 573114.9 |
| 6.00 | 0.637 | 6.065 | 190138.2 | 268896.0 | 380276.4 | 601269.8 | 736402.2 | 850324.0 |
| 8.00 | 0.645 | 7.981 | 333382.4 | 471474.0 | 666764.9 | 1054247.8 | 1291184.6 | 1490931.6 |
| 10.00 | 0.636 | 10.020 | 518156.5 | 732783.9 | 1036313.0 | 1638554.7 | 2006811.4 | 2317266.2 |
| 12.00 | 0.627 | 11.938 | 725101.9 | 1025449.0 | 1450203.9 | 2292973.7 | 2808307.7 | 3242754.5 |
| 14.00 | 0.625 | 13.124 | 873536.1 | 1235366.5 | 1747072.1 | 2762363.6 | 3383190.6 | 3906572.0 |
| 16.00 | 0.623 | 15.000 | 1137467.4 | 1608621.8 | 2274934.7 | 3596987.6 | 4405392.1 | 5086908.7 |
| 18.00 | 0.620 | 16.876 | 1432844.6 | 2026348.3 | 2865689.3 | 4531052.6 | 5549383.4 | 6407876.0 |
| 20.00 | 0.617 | 18.812 | 1771835.8 | 2505754.3 | 3543671.7 | 5603036.9 | 6862290.7 | 7923890.8 |
| 24.00 | 0.616 | 22.624 | 2558514.5 | 3618285.8 | 5117028.9 | 8090733.1 | 9909083.9 | 11442024.5 |
| 30.00 | 0.616 | 29.000 | 4203829.4 | 5946112.5 | 8407658.9 | 13293675.9 | 16281361.4 | 18800096.8 |
| 36.00 | 0.616 | 35.000 | 6123295.0 | 8659646.8 | 12246589.9 | 19363558.8 | 23716419.4 | 27384207.5 |
| 42.00 | 0.616 | 41.000 | 8402660.3 | 11883156.1 | 16805320.5 | 26571544.8 | 32543363.3 | 37577839.1 |
| 48.00 | 0.616 | 47.000 | 11041925.4 | 15615640.6 | 22083850.7 | 34917633.9 | 42765193.0 | 49380991.4 |

Flobar Capacities - Steam

| Size | K | Assumed Pipe I.D. | Differential Pressure in Inches of Water Flowrates in PPH | | | | | |
|-------|-------|-------------------|--|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | | 5 | 10 | 20 | 50 | 75 | 100 |
| 0.50 | 0.315 | 0.622 | 49.7 | 70.2 | 99.3 | 157.0 | 192.3 | 222.1 |
| 0.75 | 0.420 | 0.824 | 116.2 | 164.3 | 232.4 | 367.4 | 450.0 | 519.6 |
| 1.00 | 0.540 | 1.049 | 242.1 | 342.4 | 484.2 | 765.7 | 937.7 | 1082.8 |
| 1.25 | 0.568 | 1.380 | 440.8 | 623.3 | 881.5 | 1393.8 | 1707.0 | 1971.1 |
| 1.50 | 0.573 | 1.610 | 605.2 | 855.9 | 1210.4 | 1913.8 | 2343.9 | 2706.5 |
| 2.00 | 0.595 | 2.067 | 1035.8 | 1464.9 | 2071.7 | 3275.6 | 4011.8 | 4632.4 |
| 2.50 | 0.630 | 2.469 | 1564.9 | 2213.0 | 3129.7 | 4948.5 | 6060.6 | 6998.2 |
| 3.00 | 0.640 | 3.068 | 2454.6 | 3471.3 | 4909.2 | 7762.1 | 9506.6 | 10977.3 |
| 4.00 | 0.648 | 4.026 | 4279.7 | 6052.4 | 8559.4 | 13533.6 | 16575.2 | 19139.4 |
| 5.00 | 0.620 | 5.047 | 6435.0 | 9100.5 | 12870.0 | 20349.3 | 24922.7 | 28778.2 |
| 6.00 | 0.637 | 6.065 | 9547.5 | 13502.3 | 19095.1 | 30192.0 | 36977.5 | 42697.9 |
| 8.00 | 0.645 | 7.981 | 16740.4 | 23674.5 | 33480.7 | 52937.7 | 64835.2 | 74865.2 |
| 10.00 | 0.636 | 10.020 | 26018.6 | 36795.8 | 52037.1 | 82277.9 | 100769.5 | 116358.6 |
| 12.00 | 0.627 | 11.938 | 36410.1 | 51491.6 | 72820.1 | 115138.8 | 141015.6 | 162830.8 |
| 14.00 | 0.625 | 13.124 | 43863.5 | 62032.4 | 87727.0 | 138708.6 | 169882.6 | 196163.5 |
| 16.00 | 0.623 | 15.000 | 57116.5 | 80774.9 | 114233.0 | 180618.2 | 221211.2 | 255432.6 |
| 18.00 | 0.620 | 16.876 | 71948.5 | 101750.5 | 143896.9 | 227521.0 | 278655.2 | 321763.3 |
| 20.00 | 0.617 | 18.812 | 88970.5 | 125823.3 | 177941.0 | 281349.4 | 344581.2 | 397888.1 |
| 24.00 | 0.616 | 22.624 | 128472.5 | 181687.6 | 256945.1 | 406265.9 | 497572.0 | 574546.7 |
| 30.00 | 0.616 | 29.000 | 211089.9 | 298526.3 | 422179.9 | 667525.0 | 817547.9 | 944022.9 |
| 36.00 | 0.616 | 35.000 | 307473.5 | 434833.1 | 614946.9 | 972316.5 | 1190839.6 | 1375063.1 |
| 42.00 | 0.616 | 41.000 | 421928.9 | 596697.6 | 843857.8 | 1334256.3 | 1634123.6 | 1886923.4 |
| 48.00 | 0.616 | 47.000 | 554456.2 | 784119.5 | 1108912.5 | 1753344.6 | 2147399.8 | 2479603.7 |

Tabla 4.2. Capacidades de flobar para líquidos, gases y vapor.

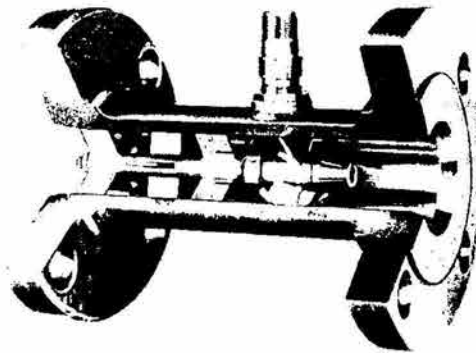
5. Tipo Cuña.



Este elemento de medición de flujo es una restricción en forma de "V" en el tubo con la cual se produce una presión diferencial. Este elemento primario ofrece gran exactitud en la medición de amplios rangos de flujo y bajos números de Reynolds ($Re=500$), además de no presentar problemas en la medición de fluidos viscosos (300 cP o más) o con viscosidad cambiante. La relación H/D se selecciona en tablas de acuerdo a los requerimientos de flujo en la tubería.

Figura 4.9. Cuña.

6. Tipo Turbina.



Para la medición de flujo en líquidos limpios de baja viscosidad el elemento primario de medición tipo turbina ofrece la mejor combinación en cuanto a costo y exactitud en la medición. En una sección de tubo se tiene un rotor con multiaspas montado en el interior y una bobina magnética montada por fuera. El paso del flujo ocasiona el giro del rotor y de este modo se induce un pulso; el número de pulsos es proporcional al flujo total, con lo cual se pueden tomar mediciones de flujo instantáneo o bien totalización de flujo.

Figura 4.10. Turbina.

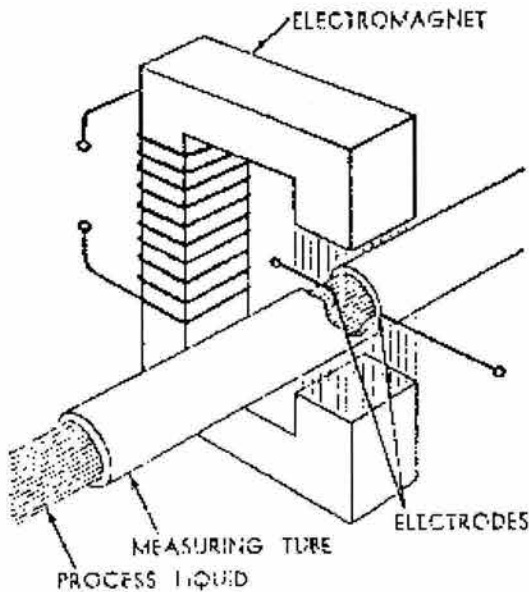
La siguiente tabla enlista las capacidades del elemento de medición de flujo tipo turbina dependiendo del flujo que se esté manejando.

Turbine Flowmeter Capacities

| Size Inches | Nominal GPM | "K" Nominal Pulses / Gal. | Nominal LPM | "K" Nominal Pulses / Liter |
|-------------|-------------|---------------------------|----------------|----------------------------|
| 0.50 | 0.55 - 5.5 | 11,000 | 2.1 - 21 | 2,906.0 |
| 0.75 | 1.3 - 13 | 4,550 | 4.9 - 49.2 | 1,202 |
| 0.75 Ext | 3.2 - 23 | 1,875 | 12.1 - 87.1 | 495 |
| 1.00 | 6.4 - 64 | 938 | 24.2 - 242.2 | 249 |
| 1.50 | 17.4 - 174 | 345 | 65.9 - 658.9 | 91 |
| 2.00 | 33 - 290 | 180 | 124.9 - 1097.7 | 48 |
| 3.00 | 60 - 600 | 50 | 227 - 2269 | 13 |
| 4.00 | 107 - 1071 | 28 | 405 - 4050 | 7.4 |
| 6.00 | 300 - 3000 | 10 | 1134 - 4290 | 2.6 |

Tabla 4.3. Capacidades de elementos tipo turbina.

7. Tipo Magnético.



Los medidores de flujo electromagnético se basan en la generación de un campo magnético por bobinas colocadas por dentro o fuera de la pared del tubo por donde pasa un líquido conductor; esto genera una fuerza electromotriz (fem) proporcional a la velocidad de flujo del líquido. Esta señal se amplifica y se alimenta a dispositivos de indicación o control. Este tipo de medidores tienen dos ventajas importantes: su alta exactitud y ausencia de caída de presión. Debido a que no hay partes móviles o en desgaste (dentro de la sección del flujo del fluido), las características del medidor prácticamente no cambian con el tiempo; se pueden manejar líquidos viscosos o abrasivos seleccionando adecuadamente el material que recubre la parte interna del medidor (tabla 4.4), sin embargo, la conductividad del líquido debe tener valores apropiados ($1 \mu\text{S}/\text{cm}$ o mayor).

Figura 4.11. Medidor de flujo tipo magnético.

| Material | Resistencia abrasión moderada | Resistencia abrasión severa | Temperatura máxima permitida | Resistencia a la corrosión |
|--------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| Teflón | Buena | No recomendada | 275-300 °F | Excelente |
| Poliuretano | Excelente | Excelente | 150 °F | Vulnerable |
| Hule natural | Excelente | Buena | 170 °F | Vulnerable |
| Neopreno | Excelente | Buena | 200 °F | Vulnerable |

Tabla 4.4. Selección del recubrimiento para medidores de flujo tipo magnético.

8. Rotámetro.

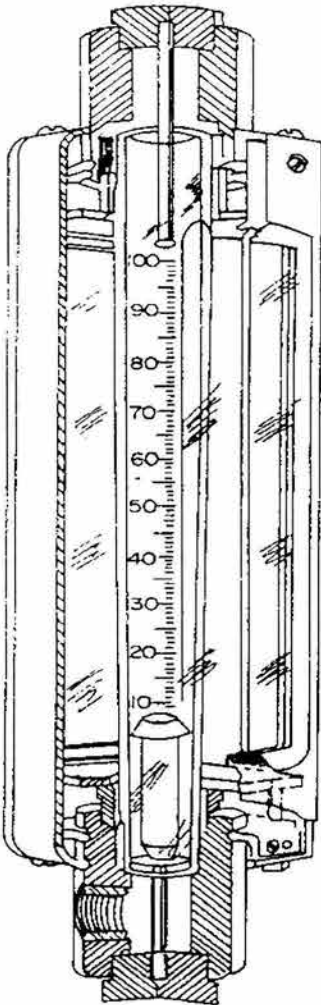


Figura 4.12. Rotámetro.

Es un medidor de área que, al igual que los medidores de presión diferencial, utiliza como base el principio de conservación de energía dado por la ecuación de Bernoulli, la cual en su forma más simplificada es definida por la ecuación de Torricelli:

$$q = CA \sqrt{2gh_L}$$

Consiste de un tubo vertical cónico con un área transversal pequeña en el fondo y grande en la parte superior. Debido a esta forma, la velocidad del fluido es máxima en la entrada y mínima a la salida. Para señalar el flujo volumétrico se utiliza un flotador como indicador que pesa más que el líquido manejado, por lo que cae hasta el fondo cuando no hay flujo pero cuando el flujo se incrementa hay una fuerza dirigida contra el flotador que lo levanta. Así, conforme el flujo avanza hacia arriba su velocidad disminuye. En algún punto de esta corriente de flujo de velocidad variable, el empuje hacia arriba iguala justamente la fuerza hacia abajo permitiendo que el flotador se estacione en un punto. Entre mayor sea la velocidad más alta será la posición del flotador y por consiguiente mayor será el flujo volumétrico. Entre los factores que afectan la exactitud de los rotámetros está la viscosidad del líquido, las pulsaciones causadas por oscilaciones verticales del flotador y las turbulencias en el flujo.

En la siguiente tabla se muestran a manera de resumen las características de los medidores de flujo anteriormente expuestos. Esta tabla permitirá la selección de los elementos primarios adecuados para la aplicación particular que se requiera.

| | Líquido limpio | Líquido sucio | Líquido viscoso | Corrosivo | Lodos | Gas limpio | Gas sucio | Vapor | Medidas disponibles | Exactitud | Número de Reynolds | Pérdidas de presión | Costo relativo | Requerimientos de tubería nominal corriente arriba | Costo instalación | Costo mantenimiento | Tipo de salida |
|---|----------------|---------------|-----------------|-----------|-------|------------|-----------|-------|---------------------|-----------|--------------------|---------------------|----------------|--|-------------------|---------------------|----------------|
| R = Recomendado NR = No recomendado L = Limitado B = Bajo M = Medio A = Alto | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Placa de orificio | R | NR | NR | NR | NR | R | NR | R | >1" | 3/4% | >30,000 | A | B | 10-30 D | M-A | M-A | ✓ |
| Tobera de flujo | R | L | NR | L | NR | R | L | L | >2" | 1-1/2% | >75,000 | A | M | 10-30 D | M | B | ✓ |
| Tubo venturi | R | L | NR | L | L | R | L | L | >2" | 1% | >75,000 | B | A | 5-10 D | M | B | ✓ |
| Flobar | R | L | NR | L | NR | R | L | R | >0.5" | 1% | >40,000 | B | B | 10-30 D | B | B | ✓ |
| Tipo Cuña | R | R | R | L | R | R | R | R | >0.5" | 1/2% | >500 | M | M | 5-10 D | B | B | ✓ |
| Tipo Turbina | R | NR | L | L | NR | R | NR | R | >0.25" | 1/2% | ≤2-15 cSt | A | M | 10-20 D | B | M-A | Lineal |
| Tipo Magnético | R | R | R | R | R | NR | NR | NR | >1" | 1/2% | Ninguno | B | A | 5 D | A | M | Lineal |
| Rotámetro | R | L | L | L | NR | R | NR | L | ≤3" | 2% | Ninguno | M | B | Ninguno | B | B | Lineal |

Tabla 4.5. Características y aplicaciones de elementos primarios de medición de flujo.



4.3. Medición de nivel.

En lo que son las variables a medir y controlar dentro de un proceso, la de nivel puede considerarse como una de las más importantes después del flujo; esto por el hecho de que la operación adecuada de un proceso se halla directamente relacionada con el almacenamiento de los fluidos utilizados.

Al proponer la instalación apropiada de un proceso en particular que involucre la medición y/o control de nivel, se deben distinguir claramente las ventajas, aplicaciones y limitaciones de los diferentes tipos de instrumentos, junto con las condiciones existentes tales como la acidez o alcalinidad de los fluidos, la presión y temperatura de cada uno de los sistemas y los tipos de materiales a utilizar. Otro punto importante en la selección del instrumento de nivel apropiado es el tipo de indicación, alarma, registro y/o control que se requiera.

Principios fundamentales.

- Determinación del volumen

Si el propósito de la medición de nivel es determinar el volumen de un líquido contenido en un recipiente con área uniforme en la sección transversal, es recomendable medir directamente la altura del nivel, esto es:

$$V = A * H$$

En esta expresión se ignoran los efectos de la densidad y la presión hidrostática. Para los casos en los que se requiera de los efectos de estas variables, se tiene que:

$$V = \frac{A * P}{\rho}$$

- Determinación del Peso

Para determinar el peso o fuerza del líquido en el fondo del recipiente o en las partes que lo soportan, se tiene la siguiente expresión:

$$w = A * P$$

$$w = A * \rho * g * H$$

- Indicador de Presión.

Para indicar el nivel se puede emplear un indicador de presión con su rango de presión correspondiente. Como la presión del fondo del tanque se origina por el peso de la columna del líquido, ésta puede expresarse en Kg./cm².

$$P = H * \rho$$

- Medidores de Presión Diferencial Hidrostática.

La presión debida a la carga hidrostática en un tanque abierto se puede medir con un simple manómetro de tubo "U". Como se muestra en la figura 4.13, la carga H del líquido en el tanque produce un levantamiento "h" del líquido del manómetro que contrabalancea la carga del primer líquido. El balance de presiones puede expresarse como:

$$h * \rho_m = H * \rho_1$$

En donde el nivel del tanque será:

$$H = h \frac{\rho_m}{\rho_1}$$

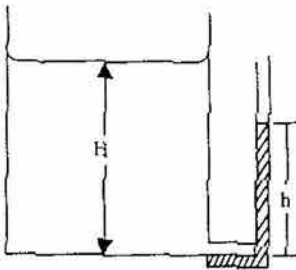
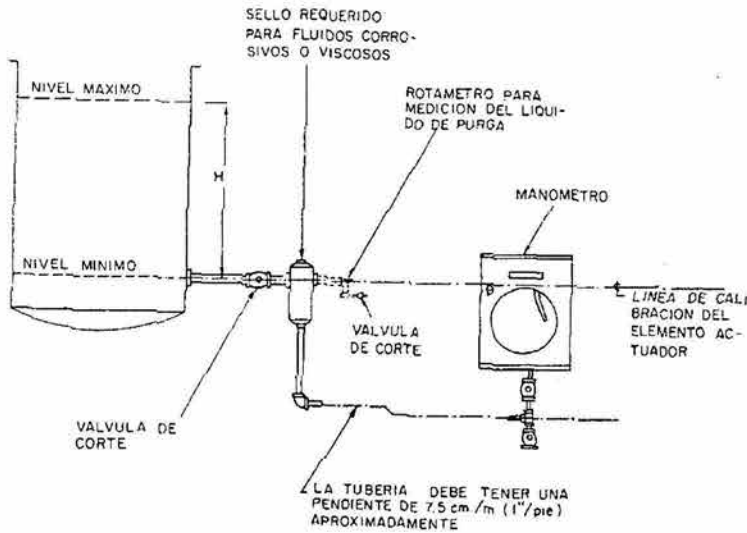


Figura 4.13. Medidor de presión hidrostática.

Nomenclatura.

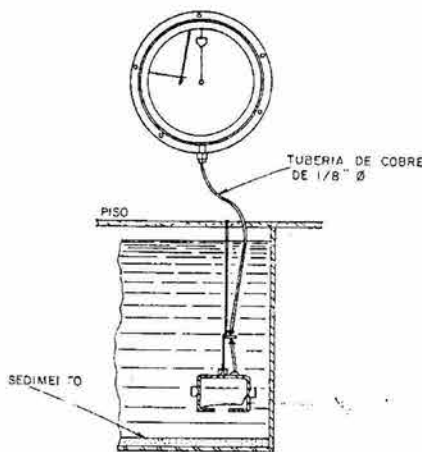
| | |
|----------|---|
| A | Área de la sección transversal del recipiente en metros cuadrados (m^2) o ft^2 |
| g | Aceleración de la gravedad igual a $9.8 m/s^2$ o $32.2 ft/s^2$ |
| h | Altura de la columna del manómetro en metros (m) o pies (ft) |
| H | Altura del líquido expresada en metros (m) o pies (ft) |
| P | Presión debida a la carga hidrostática en Newtons por metro cuadrado (Pascal) o $lb/pulg^2$ |
| ρ_1 | Densidad del líquido en el recipiente en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o lb/ft^3 |
| ρ_m | Densidad del líquido del manómetro en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o lb/ft^3 |
| V | Volumen del líquido del recipiente en metros cúbicos (m^3) o pies cúbicos (ft^3) |
| w | Peso del material en Kilogramos (Kg) |
| ρ | Densidad del líquido en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o lb/ft^3 |

Dispositivos de medición de nivel.



En la figura 4.14 se muestra la instalación más simple para tanques abiertos. Sin embargo, dentro de ciertos límites, el medidor puede montarse debajo del nivel mínimo del recipiente y ajustar el cero del instrumento para la carga de la columna del líquido adicional.

Figura 4.14. Medición de nivel por carga hidrostática.



El empleo de estos sistemas es frecuente cuando el medidor no se puede instalar directamente debajo o en el nivel mínimo del tanque. En este diseño la presión generada por la carga del líquido se balancea con la presión neumática del gas dentro de la caja. Este dispositivo es recomendable por su simplicidad mecánica; además tiene las ventajas de poderse colocar en cualquier punto y de separar los sólidos de los líquidos dentro del indicador o medidor. Las turbulencias o el flujo no afectan a este sistema, que también puede utilizarse para medir el nivel en depósitos o tanques en los que pueda formarse hielo en la superficie.

Figura 4.15. Caja de diafragma.

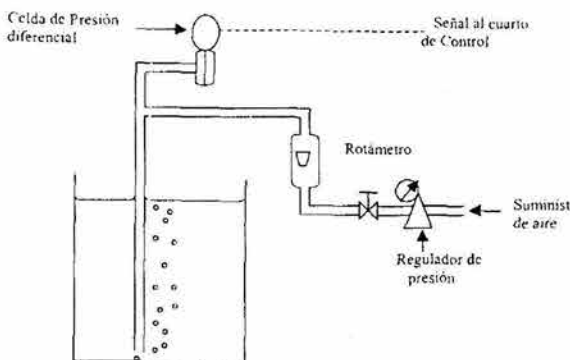


Figura 4.16. Purga o tubo de burbujeo.

Debido a que una columna de líquido produce una presión hidrostática directamente proporcional a la altura del líquido arriba del punto de referencia, a veces se utilizan técnicas neumáticas para determinar la presión en este punto. Si el líquido no cubre totalmente el extremo del tubo, la presión en el indicador caerá hasta cero. Si por el contrario el tubo se encuentra sumergido completamente en el líquido, entonces el medidor indicará la presión del aire o gas de suministro.

Por lo tanto para cualquier nivel entre las dos condiciones anteriores, habrá una presión asociada con la altura del nivel del líquido. Para asegurarse que exista un flujo de aire o gas de purga se utiliza un rotámetro. A menos que se tenga un flujo constante del aire o gas de purga, la presión indicada no reflejará el nivel del líquido. Por otro lado, si el líquido absorbiera cualquiera de los gases de purga la presión caería por esta razón y no porque el nivel hubiera cambiado. Mantener constante el flujo del aire o gas de purga es un factor de operación importante. Una ventaja del sistema de purga es que el indicador puede colocarse a casi cualquier distancia del tanque.

Un sello de balance de fuerzas (figura 4.17) puede usarse cuando los líquidos, por su naturaleza, hacen conveniente un sistema de purga, pero provocan que el aire o gas de purga reaccione desfavorablemente con el líquido. También pueden emplearse si no se desea que el aire o gas de purga se mezcle con el líquido. La presión hidrostática del líquido hace que un diafragma flexible cierre un orificio, lo que impide el escape de aire. Debido al aumento de esta presión de proceso, la presión del aire en la línea también aumenta hasta exceder a la del proceso. Esto permite el escape de aire y la caída en la presión de la línea, provocando nuevamente mayor presión del diafragma para el cierre del orificio. Esta operación continúa con la presión de purga ligeramente arriba y luego ligeramente abajo de la presión hidrostática ocasionada por la altura del líquido. La presión promedio será representativa del nivel del líquido.

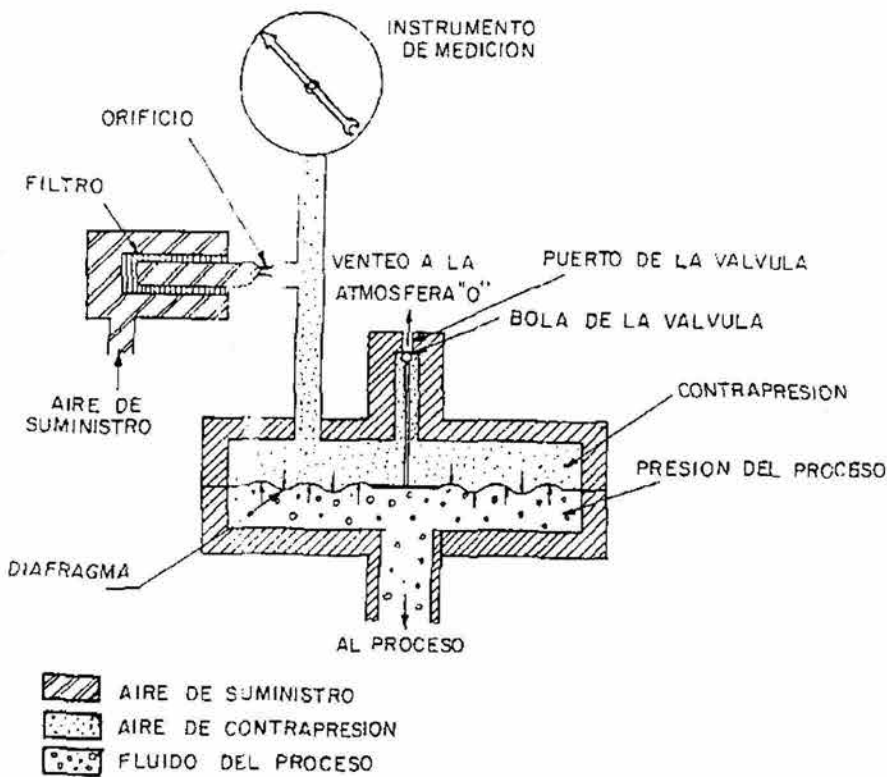


Figura 4.17. Balance de fuerzas con diafragma.

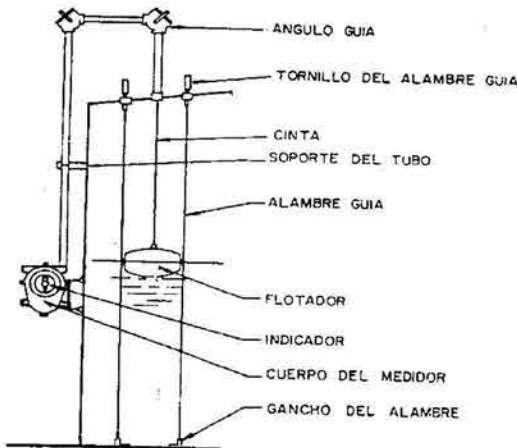


Figura 4.18. Indicador de nivel operado por flotador de cadena.

Cuando el nivel del líquido varía, el flotador se mueve en dirección vertical a lo largo de dos alambres guías; la cadena conectada al flotador va a través de ángulos y tubería hasta la caja indicadora donde se enrolla en un tambor, el cual se mantiene bajo torque accionado por resortes. La rotación del tambor a su vez mueve una flecha y está a los engranes de las agujas indicadoras; de esta manera expresa la variación del nivel en la carátula del medidor.

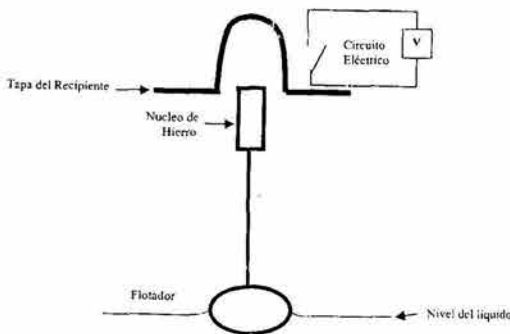


Figura 4.19. Indicador de nivel operado por flotador tipo magnético.

Este dispositivo detecta la superficie del líquido por medio de un flotador, el cual transfiere las variaciones del nivel mediante desplazamiento de un núcleo de hierro. Un imán soportado por un pivote y un micro interruptor están montados por fuera del núcleo de hierro; así, un movimiento del núcleo de hierro cerca del imán provocará que el micro interruptor gire en el pivote debido a la fuerza magnética y de esta manera cierre o abra un contacto. Cuando el nivel del líquido decrece, el núcleo de hierro eslabonado al flotador baja, y el pivote en tensión regresa al imán a su posición original.

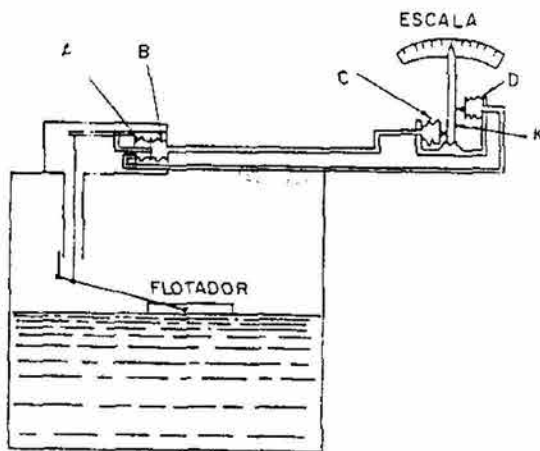
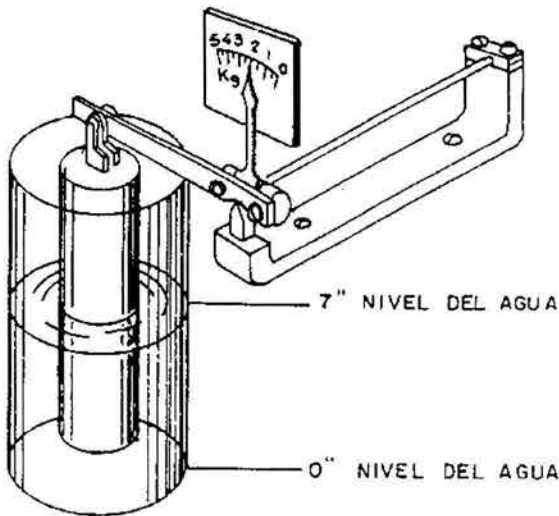


Figura 4.20 Indicador de nivel de fuelles operado por flotador.

Consta de un flotador y un brazo que acciona un arreglo de dos fuelles mecánicamente interconectados. Conforme el flotador se mueve hacia abajo, su brazo opera el eslabón de la carrera. Esto provoca que el fuelle A se expanda y succione líquido del fuelle D el cual se comprime; simultáneamente el fuelle B se comprime desplazando líquido del C. Debido a que los fuelles C y D están eslabonados, combinan su acción provocando que el puntero se mueva e indique el nivel del líquido en el recipiente. Cuando este nivel sube, mueve el flotador hacia arriba y la acción es inversa. Un arreglo de eslabones en el extremo de indicación o registro proporciona compensaciones por diferencias de temperatura a las cuales está expuesto el

sistema y la tubería de interconexión. Este principio fundamental se ha utilizado durante años en la medición de todo tipo de líquidos corrosivos o no corrosivos.



La operación de estos dispositivos se basa en el principio de Arquímedes, el cual establece que un cuerpo sumergido en un líquido sufrirá un empuje hacia arriba con una fuerza igual al peso del líquido desplazado. En este tipo de dispositivos, al cuerpo sumergido (confinado en un tubo que restringe su movimiento para evitar contactos con el recipiente) se le llama desplazador y siempre pesa más que la fuerza de flotación que desarrolla el líquido desplazado; así, la diferencia de movimientos entre el desplazador y el nivel del líquido depende del área de la sección transversal del desplazador, la densidad del líquido y la rigidez del tubo.

Figura 4.21 Medición de nivel con sistema del tipo desplazador.

La medición de nivel por métodos eléctricos contempla detectores del tipo sonda y detectores del tipo sónico. En los primeros se encuentran los que utilizan electrodos, triodos y amplificadores magnéticos. El método del electrodo (figura 4.22) utiliza la conductividad eléctrica de la solución para detectar el nivel. Un flujo de corriente de bajo voltaje fluye en la pared del tanque y en los electrodos mientras estos están cubiertos por el líquido; cuando el nivel cae por debajo del electrodo más bajo, la interrupción del circuito desenergiza a un relevador de contacto que provoca la adición de líquido al tanque hasta que el nivel alcanza al electrodo superior; esto energiza a un segundo relevador de contacto el cual a su vez cierra el primer contacto impidiendo el flujo de líquido al tanque. Generalmente los electrodos se ajustan de manera que uno esté 2 cm. arriba del otro. Este sistema de medición aplica únicamente para soluciones con electrolitos inflamables.

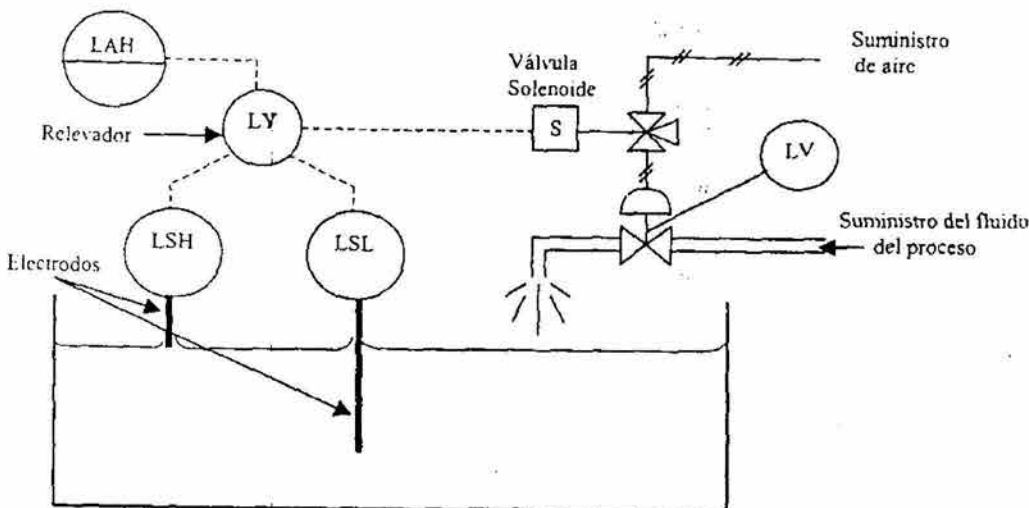
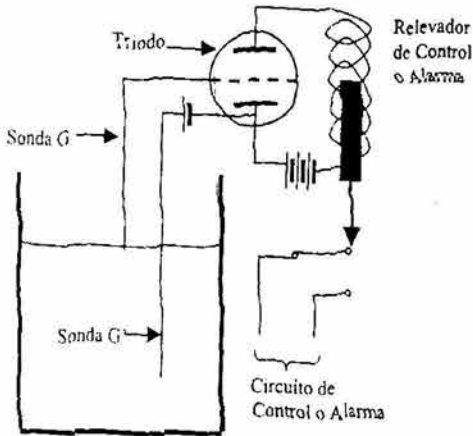
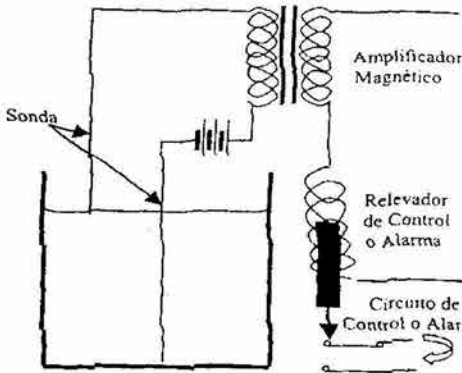


Figura 4.22. Detección de nivel con electrodos.



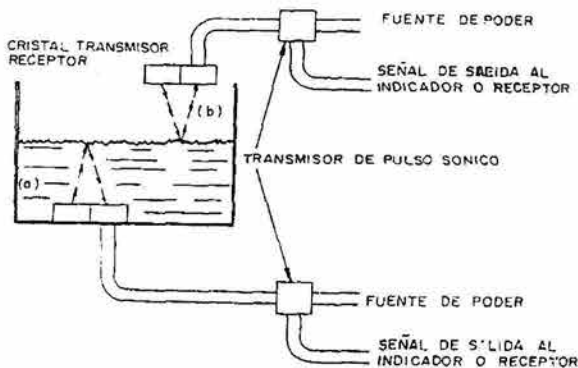
Un simple triodo puede emplearse para detectar el nivel de un líquido en un tanque. Cuando el nivel del tanque está debajo del nivel de la sonda G, no está cerrado el circuito en la rejilla del triodo, el cual acumula una carga de electrones que lo vuelve negativo y reduce la corriente de la placa del triodo de tal manera que la corriente resulta baja en la bobina del relevador para operar el circuito. Cuando el líquido sube de tal manera que el circuito entre G y la otra terminal G' cierra, hay movimiento de electrones en el circuito de la rejilla; así, en tanto que la rejilla pierda su carga negativa, la corriente de la placa continuará subiendo hasta que exista suficiente corriente en la bobina del relevador para accionarla.

Figura 4.23. Medición de nivel con triodo.



Este es otro tipo de sonda que utiliza la conductividad del líquido para permitir que fluya suficiente corriente para controlar el amplificador magnético asociado; este último a su vez regula la corriente del relevador el cual es un dispositivo de control de dos posiciones (apertura-cierre) que puede indicar si el nivel del líquido se encuentra abajo, en o arriba del punto de ajuste.

Figura 4.24. Amplificador magnético.



Este tipo de medición se basa en una fuente de emisión de onda sónica (transmisor) y la reflexión de un pulso de onda sónica (eco) al receptor. El transmisor envía a intervalos definidos pulsos sónicos desde el convertidor a la superficie del líquido; un receptor amplifica el pulso de retorno y un contador lleva los tiempos entre las transmisiones de los pulsos y las recepciones de los ecos correspondientes a los pulsos

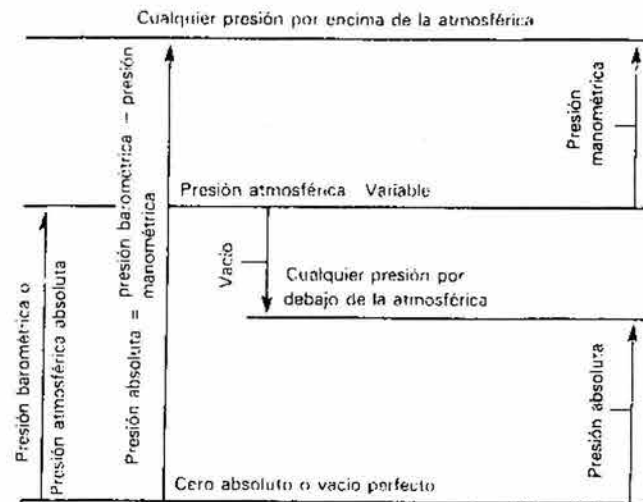
Figura 4.25. Medición de nivel de tipo sónico.

4.4. Medición de presión.

Las presiones, lo mismo que las temperaturas se expresan en escalas denominadas relativas y en escalas absolutas. A diferencia de las escalas de temperatura en donde el punto de ebullición y el punto de congelación del agua siempre tienen un valor fijo, el punto de referencia "cero" para las escalas de presión no es constante. Las mediciones de presión absoluta o relativa dependen del instrumento que se utilice; por ejemplo, un manómetro de rama abierta medirá la presión relativa puesto que su referencia es la presión atmosférica, mientras que si se cierra la terminal del manómetro y se crea el vacío, la referencia será una presión nula y la medición será una presión absoluta.

Principios fundamentales.

En la figura 4.26 se ilustra gráficamente la relación entre las presiones absoluta y relativa o manométrica. El vacío perfecto no existe en la superficie de la tierra pero es, sin embargo, el punto de referencia conveniente para la medición de la presión.



La presión barométrica es el nivel de la presión atmosférica por encima del vacío perfecto.

La presión atmosférica normalizada es 1.01325 bar (14.696 libras/pulg².) o 760 mm. de mercurio.

La presión manométrica es la presión medida por encima de la atmosférica, mientras que la presión absoluta se refiere siempre al vacío perfecto.

Vacío es la depresión por debajo del nivel atmosférico. La referencia a las condiciones de vacío se hace a menudo expresando la presión absoluta en términos de altura de columna de agua o de mercurio.

Figura 4.26. Relación entre presiones manométrica y absoluta.

La relación entre la presión relativa y la absoluta está definida por la siguiente expresión:

$$P_{\text{manométrica}} + P_{\text{barométrica}} = P_{\text{absoluta}}$$

Nomenclatura.

P Presión en Newtons por metro cuadrado (Pascal), lb/pulg² o kg/cm²

Dispositivos de medición de presión.

- Tubos bourdon
- Elementos de diafragma
- Elementos de fuelle

Los sensores de presión tipo bourdon son elementos elásticos cuyo funcionamiento sigue la ley de Hooke, la cual establece que, dentro del límite elástico la deformación que experimenta un cuerpo es proporcional al esfuerzo o fuerza que la produce, o dicho de otra forma, la deflexión es función de la presión.

Estos elementos no son adecuados para medir vacío, bajas presiones o rangos compuestos debido a que desarrollan poca fuerza en amplitudes menores de 2 kg/cm². El tubo puede tener forma de C, espiral o helicoidal.

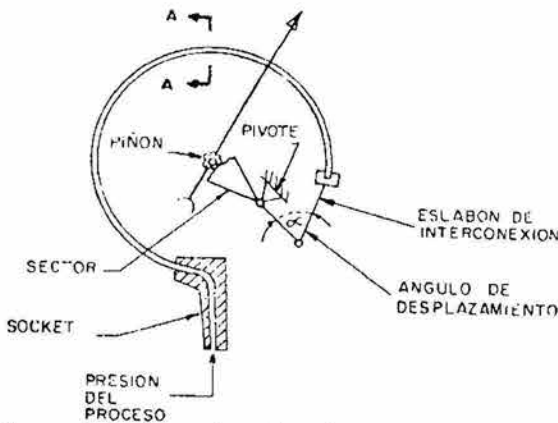


Figura 4.27. Bourdon tipo C.

En estos la presión de proceso se aplica a una conexión fija a un extremo del tubo; el otro extremo se encuentra sellado y tiene libertad de movimiento. La deflexión obtenida que es función del esfuerzo de tensión, también lo es de la longitud del tubo, del espesor de la pared y de la geometría del material empleado.

SPIRAL ELEMENTS:
 BRONZE
 BERYLLIUM-COPPER
 NI-SPAN C ALLOY
 TYPE 316 SS

PRESSURE RANGES
 0-10 TO 0-200 PSI
 0-10 TO 0-200 PSI
 0-10 TO 0-200 PSI
 0-12 TO 0-200 PSI

Son constituidos por varios tubos tipo C unidos en los extremos. Al aplicarse una presión, la espiral tiende a desenrollarse y produce un mayor movimiento de la punta, por lo cual no existe necesidad de amplificarlo. En la figura 4.28 se muestran los materiales más comúnmente utilizados para la construcción de estos elementos junto con los rangos de presión utilizados en su operación.

Figura 4.28. Bourdon tipo espiral.

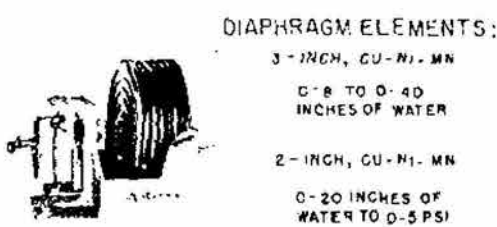
HELICAL ELEMENTS:
 BRONZE
 BERYLLIUM-COPPER
 NI-SPAN C ALLOY
 TYPE 316 SS

HEAVY DUTY HELICAL ELEMENTS:
 TYPE 316 SS

PRESSURE RANGES
 0-201 TO 0-400 PSI
 0-201 TO 0-6000 PSI
 0-201 TO 0-6000 PSI
 0-201 TO 0-6000 PSI
 0-75 TO 0-30,000 PSI
 0-40,000 TO 0-60,000 PSI

En este tipo de sensores, el movimiento del extremo libre es aún mayor que en el espiral. Su diseño permite que tenga una alta protección por sobre rango, y es adecuado para presiones pulsantes. El número de vueltas en el elemento helicoidal depende del rango de presión a medir; así los elementos para altas presiones llegan a tener hasta veinte vueltas, en tanto los sensores para amplitudes pequeñas pueden tener dos o tres.

Figura 4.29. Bourdon tipo helicoidal.



DIAPHRAGM ELEMENTS:

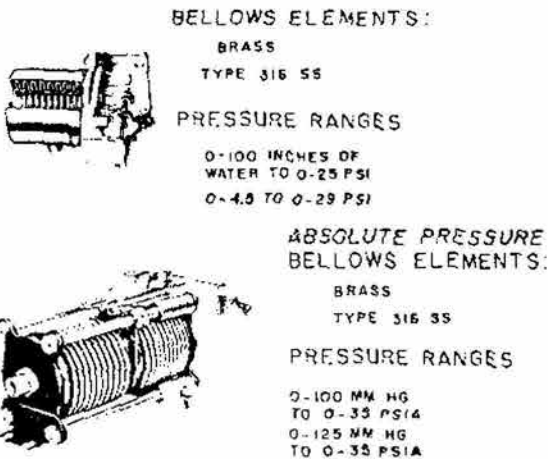
3-INCH, CU-NI-MN
0-8 TO 0-40
INCHES OF WATER

2-INCH, CU-NI-MN

0-20 INCHES OF
WATER TO 0-5 PSI

Los medidores de presión de tipo diafragma al igual que los bourdon son elementos elásticos y en estos los diafragmas son diseñados para que la deflexión producida sea lineal con la presión aplicada en el rango más amplio posible y para reducir al mínimo la histéresis y el corrimiento del cero. Por lo general estos medidores son utilizados para medición de presiones bajas, mayores o menores que la atmosférica. Los rangos típicos se muestran en la figura 4.30.

Figura 4.30. Elemento de diafragma.



BELLOWS ELEMENTS:

BRASS
TYPE 316 SS

PRESSURE RANGES

0-100 INCHES OF
WATER TO 0-25 PSI
0-4.5 TO 0-29 PSI

**ABSOLUTE PRESSURE
BELLOWS ELEMENTS:**

BRASS
TYPE 316 SS

PRESSURE RANGES

0-100 MM HG
TO 0-35 PSIA
0-125 MM HG
TO 0-35 PSIA

Otro dispositivo que se utiliza en sistemas de baja presión, particularmente en equipos que operan neumáticamente, es el medidor de fuelle. Consta de una sección de tubo delgado plegado profundamente. El material del fuelle depende de la naturaleza del fluido y el movimiento de este se halla restringido a la carrera parcial que normalmente realiza un resorte de oposición. El fuelle es un elemento axialmente flexible con capacidad para aumentar o disminuir su longitud y la selección del material se hace dependiendo las características de aplicación tales como corrosión, rango de presión y deflexión requerida. En general los fuelles detectan presiones más altas que los elementos de diafragma, pero la desventaja de estos es que presentan sensibilidad a cambios de temperatura.

Figura 4.31. Elemento de fuelle.

Interruptores de presión. Se emplean para abrir o cerrar un circuito eléctrico cuando la presión del proceso llega al punto de ajuste. Con ello es posible detectar presiones manométricas, de vacío, diferenciales y rangos de presiones compuestos. Los sensores utilizados en estos interruptores son principalmente elementos elásticos, aunque en algunos casos se emplean pistones sellados.



4.5. Medición de temperatura.

Es frecuente la confusión con respecto a los términos de temperatura y calor. La mayoría se refiere a la temperatura como una medida del grado de calentamiento o de enfriamiento de un cuerpo; en realidad la temperatura únicamente se relaciona con la habilidad de un sistema para intercambiar energía calorífica, así, un cuerpo con temperatura mayor o más caliente será capaz de transmitir calor a otro cuerpo con menor temperatura o menos caliente. La ley del equilibrio térmico o ley cero de la termodinámica es un principio importante para la comprensión del concepto de temperatura que se establece por lo siguiente:

1. Los sistemas que están en equilibrio térmico entre si tienen la misma temperatura.
2. Los sistemas que no están en equilibrio térmico entre si tienen diferentes temperaturas.

La ley cero por tanto nos da una definición operacional de la temperatura que no depende de la sensación fisiológica de caliente o frío, sino más bien se basa en la experiencia de que sistemas en contacto térmico no están en completo equilibrio entre si mientras no tengan el mismo grado de calor, es decir, la misma temperatura.

En un principio la medición de temperatura era muy arbitraria ya que dependía de las características físicas del dispositivo usado para la medición; así era casi imposible construir dos dispositivos iguales, por lo que para poder comparar la temperatura de dos cuerpos o sustancias era necesario utilizar el mismo dispositivo. Otro elemento discordante lo constituía la escala de temperatura en el hecho de que dependía de las características físicas del dispositivo utilizado y no permitía fijar un mismo patrón de referencia.

La definición actual de la escala de temperatura está basada en un punto fijo, el punto triple del agua. La temperatura absoluta de este punto se define con un valor arbitrario de 273.16 grados Kelvin exactamente (el punto triple del agua es aquella temperatura a la cual el agua líquida pura está en equilibrio con hielo y vapor de agua). La definición fija el tamaño del Kelvin ($^{\circ}\text{K}$), el grado de la escala absoluta o termodinámica. El tamaño del grado Celsius ($^{\circ}\text{C}$) se define como igual a un grado Kelvin exactamente y el origen de la escala Celsius de temperatura se encuentra en 273.15 $^{\circ}\text{K}$ exactamente. Este punto se encuentra muy cerca del punto de fusión del hielo, $T = 0.0002\text{ }^{\circ}\text{C}$. De forma similar, 100 $^{\circ}\text{C}$ está muy cerca del punto de ebullición del agua, pero no es exactamente ese punto. La diferencia es demasiado pequeña para causar problemas.

Principios fundamentales.

Trabajo y calor. En mecánica, el trabajo se define como el producto de una fuerza por un desplazamiento, esto es $w = f \times d$. En termodinámica trabajo es el medio por el cual se cambia la energía de un sistema mecánico. Así, si se eleva una masa m a una altura h contra la aceleración debida a la gravedad g , se aplica una fuerza mg sobre una distancia h y se ejerce trabajo sobre la masa: $w = m \times g \times h$. También se dice que ha cambiado la energía potencial de la masa desde una cantidad arbitraria tomada como cero en la superficie de la tierra hasta un valor nuevo mgh a la altura h . Una forma particularmente importante de trabajo es la asociada con un cambio de presión-volumen; cuando un fluido se comprime o expande se dice que el fluido recibe o transfiere trabajo desde el entorno o hacia el entorno. El trabajo es una función de trayectoria porque el valor del cambio depende del proceso o forma en que se efectúe la compresión o expansión. El trabajo es el único medio por el cual se puede transferir energía hacia o desde los sistemas mecánicos hipotéticos sencillos. Sin embargo, existe otra forma de intercambiar energía entre los sistemas del mundo real. Si existe una diferencia de temperatura entre un sistema y su entorno, la energía puede ser transferida por un flujo de calor, ya sea por radiación o conducción. Al igual que el trabajo, el calor es un medio por el cual los sistemas intercambian energía. La prueba de esto la dio James Joule, quien demostró que se puede conseguir el mismo cambio de estado (cierto aumento de temperatura por ejemplo) realizando trabajo sobre un cuerpo o calentándolo. Es más, la cantidad de calor medida en calorías y la cantidad de trabajo medada en joules necesarias para realizar cualquier cambio dado siempre están en una relación fija, es decir, una caloría de calor produce siempre el mismo cambio en el estado de un sistema que 4.184 Joules (J) de trabajo. Así pues, el trabajo y el calor son medios para cambiar la energía de un sistema y para distinguirlos basta con decir que el trabajo se refiere a la energía transferida en virtud de un



vínculo mecánico entre los sistemas y el entorno, y que el calor es la energía transferida debido a una diferencia de temperatura. El análisis de la naturaleza del calor permite llegar a la conclusión de que no es una función de estado ya que, como demostró Joule, se puede conseguir el mismo cambio de estado utilizando calor o trabajo. Esto significa que la cantidad de calor utilizada para realizar el cambio de estado depende de la trayectoria que une los estados inicial y final.

Energía. El calor y el trabajo se refieren a procesos, acontecimientos en los que ocurren desplazamientos o cambios de temperatura. En contraste, la energía es una propiedad que puede estar asociada con un único estado de equilibrio de un sistema. Por ello la energía es una función de estado. Por ejemplo, una partícula libre de masa m que se mueve en el vacío a una velocidad v . Se sabe que tal sistema tiene una energía cinética $1/2mv^2$. Si el sistema está a una altura h por encima de la superficie de la tierra su energía potencial con respecto a esta es mgh . Se ve así que las energías cinética y potencial de este sistema simple son funciones de estado, esto es, de su velocidad y posición. En el caso de la energía interna, considérense dos estados diferentes de un sistema y dos trayectorias diferentes de un sistema a y b que los conectan; si al pasar del estado 1 al estado 2 por el camino "a" hay que transferir al sistema una cantidad de energía ΔE_a y si al hacer el mismo cambio de estado siguiendo el camino "b" hay que transferir al sistema una energía ΔE_b , entonces si la energía interna es una función de estado, $\Delta E_a = \Delta E_b$. Considérese ahora el efecto de añadir energía a un sistema en la forma de una cantidad de calor q . Si la energía se conserva y el sistema no realiza trabajo w , q debe aparecer como un cambio en la energía interna del sistema:

$$\Delta E = q \quad (\text{Sin realización de trabajo})$$

Si en un experimento diferente se realiza trabajo sobre un sistema, pero no se permite la transferencia de calor desde o hacia el entorno, entonces el trabajo realizado debe aparecer como un cambio en la energía interna del sistema:

$$\Delta E = w \quad (\text{Sin transferencia de calor})$$

En general es de esperar que haya procesos en los cuales se ceda calor a un sistema y se realice trabajo sobre él, lo cual da lugar a la expresión conocida como primera ley de la termodinámica:

$$\Delta E = q + w$$

| | | | | |
|------------------------------|---|------------------------------|---|---------------------------------------|
| Cambio de energía interna | = | Calor agregado al sistema | + | Trabajo realizado sobre el sistema |
|------------------------------|---|------------------------------|---|---------------------------------------|

Entalpía. En general, las reacciones químicas no tienen lugar a volumen constante sino a una presión constante de 1 atm. En consecuencia, el calor absorbido en estas condiciones no es igual a ΔE o q_v . Para tratar de los efectos térmicos de las reacciones que tienen lugar a presión constante, es conveniente definir una nueva función de estado conocida como entalpía (H), que depende de los valores de la energía interna E , la presión P y el volumen V :

$$H = E + PV$$

Capacidad calorífica. Es la cantidad de calor requerida para elevar 1 °C o 1 °K la temperatura de un mol de material. Dado que el calor no es una función de estado, la cantidad requerida para producir un cambio dado de estado depende del camino seguido. Así pues, se utilizan dos tipos de capacidad calorífica, C_p para los cambios a presión constante y C_v para los cambios a volumen constante. Por lo tanto, la cantidad de calor necesaria para cambiar la temperatura de n moles de material desde T_1 hasta T_2 es:

$$q_p = n \int_{T_1}^{T_2} C_p dT$$



$$q_v = n \int_{T_1}^{T_2} C_v dT$$

La relación entre C_p y C_v es la siguiente:

$$C_p = C_v + \frac{d(PV)}{dT}$$

Nomenclatura.

| | |
|-------|--|
| C_p | Capacidad calorífica a presión constante en cal/g °K o J/g °K |
| C_v | Capacidad calorífica a volumen constante en cal/g °K o J/g °K |
| E | Energía interna expresada en joules (J) o calorías (cal) |
| g | Aceleración de la gravedad igual a 9.8 m/s ² o 32.2 ft/s ² |
| H | Entalpía expresada en joules (J) o calorías (cal) |
| n | Cantidad de sustancia expresada como número de moles |
| P | Presión en Newtons por metro cuadrado (Pascal) o lb/pulg ² |
| q | Cantidad de calor agregado a un sistema en joules (J) o calorías (cal) |
| T | Temperatura en grados centígrados (°C) o grados kelvin (°K) |
| V | Volumen en metros cúbicos (m ³) o pies cúbicos (ft ³) |
| w | Trabajo realizado sobre un sistema en joules (J) o calorías (cal) |

Dispositivos de medición de temperatura.

Los elementos primarios de medición de temperatura de acuerdo al tipo de salida, pueden clasificarse como sigue:

1. Elementos tipo bimetálico.
 2. Sistemas termales llenos.
 3. Termopares.
 4. Bulbos de resistencia.
 5. Termistores.
 6. Pirómetros de radiación.
-
1. Elementos tipo bimetálico. Operan bajo el principio de que un cambio de temperatura dado ocasiona un cambio de longitud diferente en metales diferentes. Estos sensores son comúnmente usados para indicación local de temperatura y en interruptores de temperatura ciegos. Entre las ventajas se tiene que en estos sensores no se hacen correcciones por temperatura ambiente, el mantenimiento es mínimo, los costos son bajos y no se requiere de elemento secundario. Como desventajas se numeran las siguientes: susceptibilidad a cambios de calibración, dificultad en las lecturas debido a vibraciones e incapacidad de realizar lecturas remotas.

2. Sistemas termales llenos.

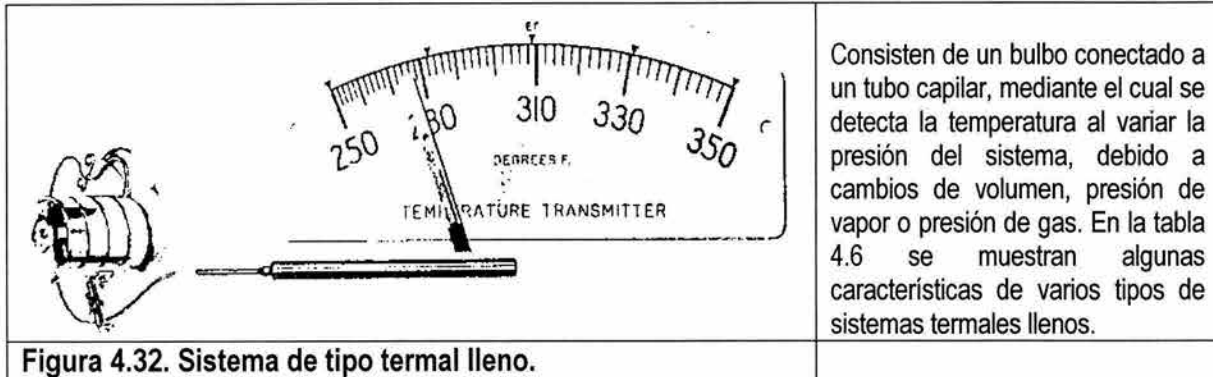


Figura 4.32. Sistema de tipo termal lleno.

| Tipo | Expansión de líquidos | Presión de vapor | Presión de gas | Expansión de mercurio |
|---|-------------------------|--|---|-------------------------|
| Clase | IA, IB | IIA, B, C, D | IIIB | VA, VB |
| Límite de temperatura | -300 a +600 °F | -425 a +600 °F | -450 a +1400 °F | -38 a +1200 °F |
| Espacio mínimo en la escala | 40 °F | 70 °F | 200 °F | 100 °F |
| Espacio máximo en la escala | 600 °F | 400 °F | 1000 °F | 1200 °F |
| Límite de sobrerango | 100% de los espacios | IIA, C, D: 50 °F arriba del tope de la escala. IIB: 120 o 212 °F | 1400 °F y 250 °F para espacios estrechos en la escala | 200% de los espacios |
| Longitud máxima de tubo | IA: 100 ft IB: 20 ft | 150 ft | 100 ft | VA: 100 ft VB: 50 ft |
| Bulbo máximo Bulbo mínimo | 6 X 3/8 3 X 1/4 | 6 X 5/8 2 X 3/8 | 10 X 7/8 6 X 5/8 | 6 X 5/8 3 X 1/2 |
| Tiempo para alcanzar 63% de la temperatura | 6 segundos | 2 segundos | 2-8 segundos | 2-6 segundos |
| Costo relativo | Alto | Bajo | Medianamente bajo | Medianamente alto |
| Escala | Uniforme | No uniforme | Uniforme | Uniforme |

Tabla 4.6. Características y aplicaciones de sistemas termales llenos.

La Asociación Manufacturera de Aparatos científicos (SAMA por sus siglas en inglés) ha dividido en clases a los sistemas termales llenos y les ha asignado las siguientes letras: A para indicar la operación del sistema arriba de la temperatura ambiente, B para hacerlo abajo, C para indicar un sistema en donde el bulbo puede cruzar la temperatura ambiente y D para sistemas que operen a temperatura ambiente.

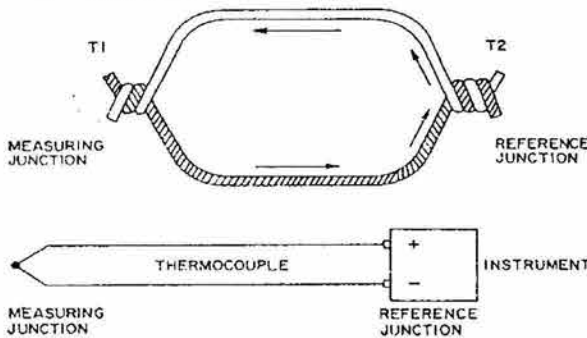
Los sistemas termales llenos clase I o por expansión de líquidos contienen un líquido orgánico (butano, propano, xileno, octano, etc.) y se caracterizan por espacios estrechos en la escala, bulbos pequeños, alta exactitud y capacidad para mediciones diferenciales. En los sistemas de tipo IA se requiere de un capilar auxiliar para compensación por temperatura ambiente y a menudo esto resulta complicado y con costos elevados.

En los sistemas termales llenos clase II o por presión de vapor, se tiene una relación logarítmica de la temperatura del fluido (cloruro de metilo, bióxido de azufre, etanol, tolueno, entre otros) y su presión de vapor (ecuación de Clausius-Clapeyron)³ por lo que la temperatura externa sobre el capilar no influye en la presión de vapor del fluido ni en la medición de la temperatura; esto significa que el sistema no requiere compensación por cambios en la temperatura ambiente, aunque debido a su escala no lineal requieren de mecanismos que compensen la no linealidad de la medición.

Un sistema termal lleno clase III o por presión de gas utiliza por lo general nitrógeno (o helio para medición de temperaturas muy bajas). En estos sistemas resulta difícil compensar por errores de temperatura ambiente por lo cual los diseños son con bulbos de tamaños grandes para reducir los efectos a límites aceptables y para aplicaciones particulares.

A los sistemas por expansión de mercurio o clase V se les clasifica por separado de los sistemas termales llenos clase I debido a las características únicas del mercurio, por ejemplo, toxicidad y nocividad para algunos procesos y productos industriales. El bulbo utilizado en estos sistemas es generalmente más grande en diámetro y de costo mayor a los utilizados en los sistemas por expansión de líquido y presión de vapor.

3. Termopar.



Consiste de dos alambres de materiales diferentes (fierro y constantano) con un delta de temperatura, que unidos en sus extremos producen una fuerza electromotriz (fem). La junta de medición o punta caliente se inserta en el medio en donde se necesita medir la temperatura, mientras que la junta de referencia o punta fría (a 0°C) va normalmente conectada a las terminales del instrumento de medición.

Figura 4.33. Termopar.

En la siguiente tabla se presentan algunos de los datos más representativos de termopares y sensores de resistencia:

| Tipo | Límites de temperatura | | Mínimo span | | | | | Máximo sobre rango de temperatura |
|-------------------------------|------------------------|---------|---------------|-------------|--------------|---------------|---------------|-----------------------------------|
| | Min. | Máx. | -100 a +200 F | 200 a 500 F | 500 a 1000 F | 1000 a 2000 F | 2000 a 3000 F | |
| Termo pares Cobre-constantano | -300 F | +650 F | 250 F | 200 F | 160 F | - | - | 1100 F |
| Fierro-constantano | -300 F | +1400 F | 200 F | 175 F | 160 F | 150 F | - | 1800 F |

$$^3 \ln \frac{P_2}{P_1} = -\frac{\lambda_{vap}}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$



| | | | | | | | | |
|------------------------------------|--------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Cromel-alumel | -300 F | +2000 F | 250 F | 225 F | 220 F | 220 F | - | 2200 F |
| Platino/ Platino Rodio | +32 F | +2650 F | - | 900 F | 800 F | 700 F | 650 F | 3100 F |
| Bulbos de resistencia Niquel | -320 F | +600 F | 5 F | 5 F | 5 F | - | - | 660 F |
| Platino | -420 F | +1650 F | 120 F | 120 F | 120 F | 120 f | - | 1800 F |
| Cobre | -320 F | +250 F | 200 F | 200 F | - | - | - | 300 F |

Tabla 4.7. Características y aplicaciones para sensores eléctricos de medición.

La fem de un termopar se incrementa a medida que la diferencia de temperaturas en las juntas también aumenta. En la figura 4.34 se muestra la relación de salida de fem contra temperatura para los tipos de termopares más comúnmente usados.

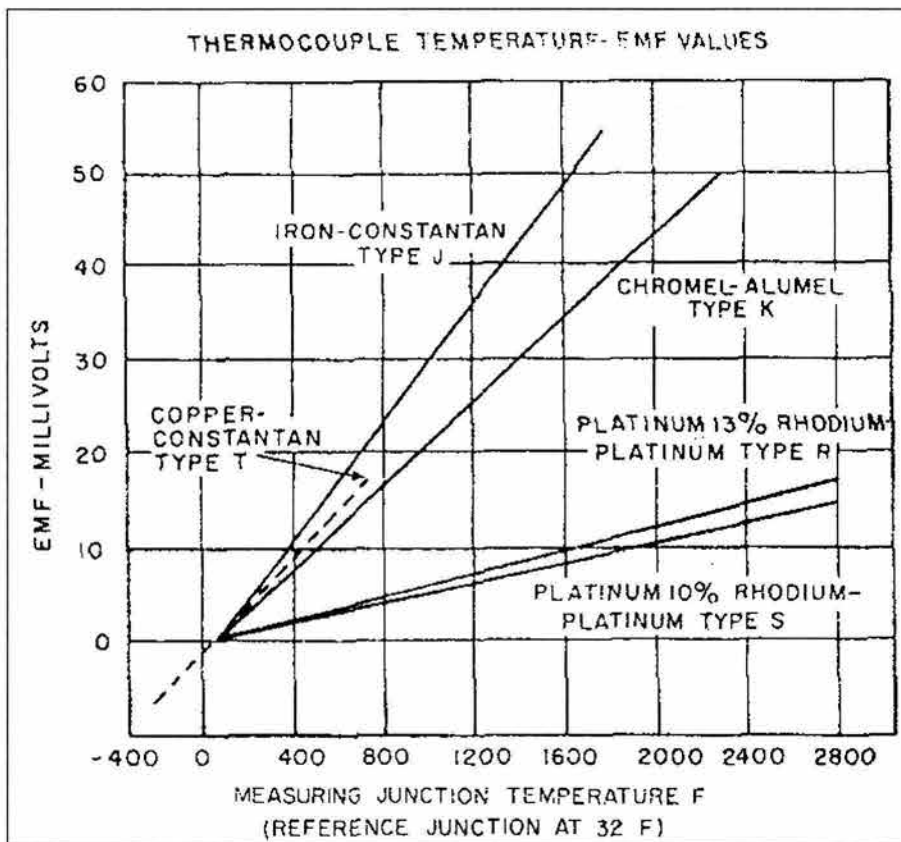
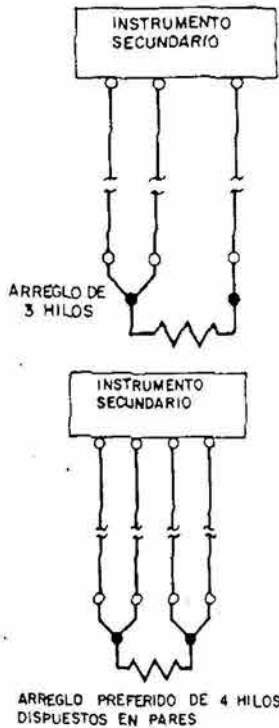


Figura 4.34. Relación de valores temperatura-fem para termopares estándar.

Debido a la fragilidad del termopar, se acostumbra utilizar una funda protectora metálica llamada termopozo. Con esto se tiene la desventaja de introducir retrasos de tiempo en la medición de la señal, por lo tanto es aconsejable introducir respuesta derivativa en el modo de operación del control.

Algunas de las ventajas que presentan los termopares en la medición de temperatura son el generar respuestas rápidas y lo adecuados que resultan para mediciones remotas. Entre las desventajas se tiene que necesitan de cables de extensión, requieren compensación eléctrica en la junta de referencia, generan errores asociados al gradiente de temperatura en el cable de extensión, requieren de elementos secundarios para transmitir 4-20 mA C.D.

4. Bulbos de resistencia.



La termometría de resistencia se basa en el cambio de conductividad eléctrica con la temperatura. Los bulbos de níquel realizan la medición con exactitudes de hasta 0.1 °F. Los bulbos de platino son capaces de realizar mediciones precisas de temperatura arriba de los 1650 °F. Es recomendable el uso de bulbos con rango de 100 ohms debido a que resistencias menores tienen respuestas menores de voltaje y resistencias mayores a esta requieren de un sensor de menor tamaño que es de mayor costo. Los bulbos de resistencia pueden contar con dos, tres o cuatro cables de resistencia para interconexión con el elemento secundario. El arreglo de cuatro hilos es el menos afectado por cambios de temperatura de los cables conductores y, por ello es utilizado para medir diferencias de temperatura y para mediciones con alto grado de exactitud. El arreglo de 3 hilos es el más utilizado en la mayoría de mediciones mientras que el de dos hilos resulta inexacto. Entre las ventajas de los bulbos de resistencia están su alta exactitud, estabilidad, capacidad para realizar mediciones dentro de amplitudes de medición reducidas, lo adecuados que resultan para mediciones remotas mientras que en las desventajas se encuentran la susceptibilidad a errores por autocalentamiento ocasionado por la corriente en el circuito del bulbo, necesidad de compensación por la resistencia del cable conductor, ruido eléctrico en la señal y requerimiento de fuente de energía.

Figura 4.35. Bulbos de resistencia.

5. Termistores. Son hechos de óxidos metálicos tratados térmicamente y su composición está en función del rango de temperatura y sensibilidad necesaria. La mayoría de los termistores tienen un coeficiente negativo de temperatura. Algunas de las ventajas son su alta sensibilidad, los tamaños manejados que van desde 0.12 mm y lo adecuados que resultan para mediciones remotas. Entre las desventajas se tiene la susceptibilidad a errores por autocalentamientos, ruidos en los cables conductores y limitación para amplitudes de medición grandes.
6. Pirómetros de radiación. Utilizan un sistema óptico para enfocar la energía radiada de un cuerpo sobre un sensor (por ejemplo un arreglo de termopares). Estos sistemas son usados para la medición de temperaturas en donde el contacto con el objeto a medir es imposible; la exactitud es dependiente de factores tales como fenómenos de reflexión, gases presentes en la trayectoria de la radiación entre otros.



4.6. Mediciones analíticas.

Las mediciones analíticas buscan analizar los componentes de una corriente de proceso y de esa manera facilitar el control de su composición. Algunas mediciones son físicas mientras que otras son electroquímicas. Ejemplos de mediciones físicas son la medición de humedad, densidad, presión de vapor diferencial, punto de ebullición y turbidez. Algunas otras tales como espectroscopia, osmometría y polarografía que son técnicas de laboratorio también se encuentran ubicadas dentro de la clasificación de mediciones físicas aunque no son muy usuales en lo que es el control automático.

Muchas otras mediciones analíticas tales como conductividad, corriente eléctrica, voltaje, potencia eléctrica, pH (concentración de iones hidrógeno), ORP (potencial de óxido-reducción) y concentración específica de iones son mediciones electroquímicas.

Principios fundamentales.

Conductividad eléctrica. Aunque la disociación en iones y las concentraciones iónicas resultantes han sido conceptos útiles en el pasado, el hecho es que no todos los iones presentes en una solución son necesariamente efectivos; algunos de ellos pueden ser "complejos" esto es, ser obstrucciones para otros iones y, por consiguiente, no aprovechables para la reacción. Un compuesto dado se puede disociar a varios grados, descritos por la constante de disociación, en iones, y algunas porciones de estos iones que son los "activos", son descritos por el coeficiente de actividad. En muchas de las reacciones el valor del coeficiente de actividad es cercano a la unidad por lo que la actividad y la concentración se utilizan indistintamente; sin embargo, en muchos otros procesos la actividad iónica es lo suficientemente diferente de la concentración iónica por lo que resulta útil hablar de estas en términos diferentes. Las mediciones electroquímicas miden en general actividad más bien que concentración.

La habilidad para conducir electricidad es lo recíproco de la resistencia al flujo de electricidad, y se conoce como conductancia. La unidad de esta medición es la recíproca del ohm y se conoce como mho. La conductancia de cualquier conductor depende de varios factores, tales como la naturaleza del material, el tipo de trayectoria del conductor y la temperatura. Para fines analíticos resulta importante el tipo y la actividad de los iones presentes; así, el término conductividad se refiere a la conductancia de cierto material por unidad de longitud y área, esto es:

$$\text{Conductancia} = \text{conductividad} \cdot \text{área} / \text{longitud}$$

La medición se hace mediante sumergir una celda de conductividad de geometría conocida (1 cm de longitud por un centímetro cuadrado de área) en el fluido y la resistencia (o conductancia) a través de la celda es medida. Mientras que la unidad de la conductancia es el mho, la unidad de la conductividad será:

$$\text{mho} \frac{\text{cm}}{\text{cm}^2} \quad \text{o} \quad \frac{\text{mho}}{\text{cm}}$$

Debido a los rangos de medición de conductividades en muchos electrolitos, se acostumbra el uso del micromho/cm que es la millonésima parte del mho. Como tales mediciones dependen de la geometría de la celda utilizada, se ha definido una constante de la celda, por lo cual la conductividad también puede ser expresada como sigue:

$$\text{Conductividad} = \text{conductancia} \cdot \text{constante de la celda}$$

Un instrumento de medición dado puede tener un cierto rango de conductancia (resistencia), sin embargo, se pueden tener una variedad de rangos de conductividad por el simple hecho de utilizar celdas de diferentes



constantes. Por ejemplo, un instrumento con un rango de 0-100 micromhos/cm y una celda con constante de 0.01 tendrá un rango de 0-1000 micromhos/cm si la celda es sustituida por otra con una constante de 0.1. Cuando se pasa corriente eléctrica a través de una solución se da el efecto electroquímico conocido como polarización. Este efecto si no se minimiza, ocasiona errores en las mediciones. Uno de los efectos de la polarización es la electrolisis. En la electrolisis generalmente se produce una película o capa gaseosa en la superficie del electrodo, incrementando la resistencia de la solución. Es por esta razón por la cual una corriente de voltaje directa no resulta práctica para mediciones de conductividad. Si se revierte la corriente la película de gas tenderá a regresar al seno de la solución y por ello si se alterna la corriente los efectos de polarización decrecerán.

Nomenclatura.

| | |
|-----|---|
| C | Conductividad expresada en mhos/centímetro (S/cm) o micromhos/centímetro ($\mu\text{S/cm}$) |
| ppm | Concentración expresada en partes por millón (mg/l) |

Dispositivos de medición analíticos.

1. Los instrumentos para medición de conductividad normalmente vienen equipados con:
 - a. Calibración en micromhos o en ohms
 - b. Calibración en términos de concentración de electrolito

- a. Calibración en micromhos o en ohms.

Los instrumentos de este tipo son calibrados en unidades absolutas, ohms, mhos/cm o micromhos/cm. Pueden usarse para mediciones de conductividad de electrolitos a cualquier temperatura, dentro de los límites de la celda de medición. La conductividad de muchas soluciones se incrementa a medida que la temperatura aumenta; además, si un instrumento para medición de conductividad calibrado en micromhos es utilizado para una solución con una concentración determinada, la lectura del instrumento cambiará si la temperatura de la solución cambia.

La compensación por este efecto de la temperatura sobre la conductividad de la solución es posible únicamente si el coeficiente de conductividad a tal temperatura de la solución es conocido. Por ejemplo, si un instrumento calibrado desde cero a 100 micromhos/cm fuera provisto con compensación por temperatura para una solución de cloruro de sodio, el instrumento no compensaría correctamente para cualquier otra solución. Por esta razón, los instrumentos calibrados en unidades absolutas generalmente no vienen equipados con compensación por temperatura, salvo en el caso de requerirse y sólo para una solución en particular.

- b. Calibración en términos de concentración de electrolito.

Los instrumentos calibrados en términos de concentración de electrolito arrojan lecturas en porcentaje de concentración, gramos por litro y partes por millón (ppm). Este tipo de calibración es hecho con valores de conductividad dentro de rangos de concentración específicos y a la temperatura especificada del electrolito. Además, el instrumento se puede usar únicamente a las condiciones para las cuales ha sido calibrado.

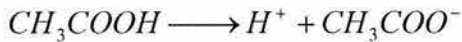
Estos instrumentos son útiles en soluciones múltiples de electrolitos. Si el material de interés es mucho más conductivo que los otros en la solución, estos últimos tienen un efecto despreciable en las lecturas.

En la figura 4.36 se muestra una celda de conductividad típica para mediciones de concentración de sales, ácidos o bases. Los electrodos pueden ser de platino o de carbón e ir montados en una estructura de vidrio pirex con la finalidad de minimizar posibles daños y ensuciamiento.

2. Actividad de iones hidrógeno (pH).

El grado de acidez o alcalinidad en una solución puede ser medido en términos de la actividad de los iones hidrógeno contenidos en la solución (pH). Las mediciones analíticas de pH son ampliamente usadas en muchos procesos industriales para el análisis de soluciones acuosas.

Para el ácido clorhídrico la constante de disociación es prácticamente infinita, lo que significa que la molécula de HCl se rompe o disocia completamente en iones hidrógeno cargados positivamente (H^+) y en iones cloro cargados negativamente (Cl^-). A causa de esta alta disociación iónica, al ácido clorhídrico se le considera como un ácido fuerte. Por otra parte, el ácido acético tiene una constante de disociación baja:



De modo que en la solución se encuentran presentes muy pocos iones hidrógeno, algo así como uno por cada 100 moléculas no disociadas de ácido acético por lo que a este se le considera como débil. Se puede ver que la fuerza de una solución ácida depende del número de iones hidrógeno disponibles. A su vez el número de iones hidrógeno disponibles depende no únicamente del peso del compuesto en la solución sino también de la constante de disociación del compuesto particular y del coeficiente de actividad de los iones disociados.

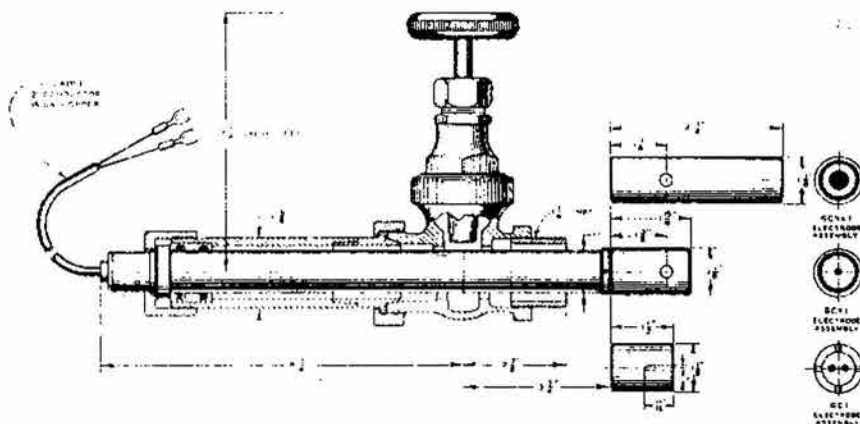
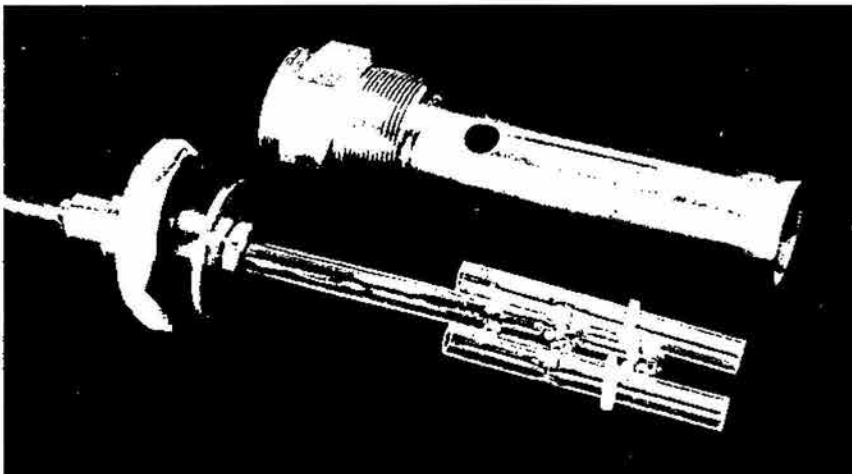


Figura 4.36. Celda de conductividad.



El agua pura se disocia en iones H^+ y OH^- y se considera como débil en el sentido de que el número de moléculas de agua disociadas es muy pequeño en comparación con las no disociadas, por lo que el valor de la actividad del agua $[H_2O]$ puede considerarse como 1. La constante de disociación del agua tiene un valor (a 24 °C) de 1×10^{-14} . El producto $[H^+][OH^-]$ es entonces 1×10^{-14} . Si la concentración de iones hidrógeno y iones hidroxilo es la misma, entonces deberá ser de 1×10^{-7} y 1×10^{-7} respectivamente.

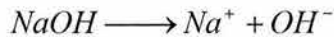
Si un ácido fuerte tal como ácido sulfúrico se adiciona al agua, muchos iones hidrógeno son agregados por consiguiente. Con esto se reduce la cantidad de iones hidroxilo. Por ejemplo, si el HCl se adiciona hasta que la concentración de H^+ llegue hasta el valor de 1×10^{-2} , la concentración de iones OH^- deberá ser de 1×10^{-12} .

Debido a la incomodidad resultante de pensar en términos de concentraciones fraccionales como 1×10^{-7} , 1×10^{-12} o 1×10^{-2} es práctica común el utilizar un código especial de pH para representar el grado de acidez o actividad de iones hidrógeno. Así, el pH se define como el valor negativo del logaritmo de la actividad del ión hidrógeno o bien como el logaritmo base diez del recíproco de la actividad del ión hidrógeno. Si la actividad del ión hidrógeno es 1×10^x entonces el pH será x. Por ejemplo, en agua pura a 24 °C la actividad del ión hidrógeno es 1×10^{-7} y entonces el pH será de 7.

Una solución ácida siempre tiene más iones hidrógeno que iones hidroxilo. Además, la actividad de los iones hidrógeno siempre debe ser mayor que 1×10^{-7} , es decir 1×10^{-6} , 1×10^{-5} , 1×10^{-4} , etc., y el pH de una solución ácida siempre debe ser más bajo que el valor de 7, es decir 6, 5, 4, etc.

Si los iones OH^- exceden a los iones H^+ la actividad de iones hidrógeno deberá ser menor a 1×10^{-7} , es decir 1×10^{-8} , 1×10^{-9} , 1×10^{-10} , etc., y el pH deberá ser mayor que 7, es decir 8, 9, 10, etc.

Cuando los iones OH^- predominan la solución se considera básica o alcalina. La disociación de estos compuestos es como la siguiente:



El hidróxido de sodio se disocia casi completamente y por ello se le llama una base fuerte. Por otro lado, el hidróxido de amonio se disocia muy poco en los iones NH_4^+ y OH^- y se le considera como una base débil.

Por tal razón, se puede ver que la fuerza de una base depende del número de iones hidroxilo disponibles. A su vez el número de iones hidroxilo disponibles depende no únicamente del peso del compuesto en el agua sino también de la constante de disociación del compuesto particular y del coeficiente de actividad de los iones disociados.

Resulta importante recordar, en especial al hablar de control de pH en una solución, que el número representado por el pH es en si mismo un número con valor exponencial. La tabla 4.8 ilustra este hecho. Se puede apreciar que la variación de sólo una unidad de pH significa un cambio de 10 veces la fuerza ácida. Por ello la necesidad de seleccionar equipo con la precisión y sensibilidad adecuados para la medición y control de esta variable.

| Iones hidrógeno (gramos por litro) | Valor de pH |
|------------------------------------|-------------|
| 1.0 | 0 |
| 0.1 | 1 |
| 0.01 | 2 |
| 0.001 | 3 |
| 0.0001 | 4 |
| 0.00001 | 5 |

| | |
|------------------|----|
| 0.000001 | 6 |
| 0.0000001 | 7 |
| 0.00000001 | 8 |
| 0.000000001 | 9 |
| 0.0000000001 | 10 |
| 0.00000000001 | 11 |
| 0.000000000001 | 12 |
| 0.0000000000001 | 13 |
| 0.00000000000001 | 14 |

Tabla 4.8. Actividad de iones hidrógeno.

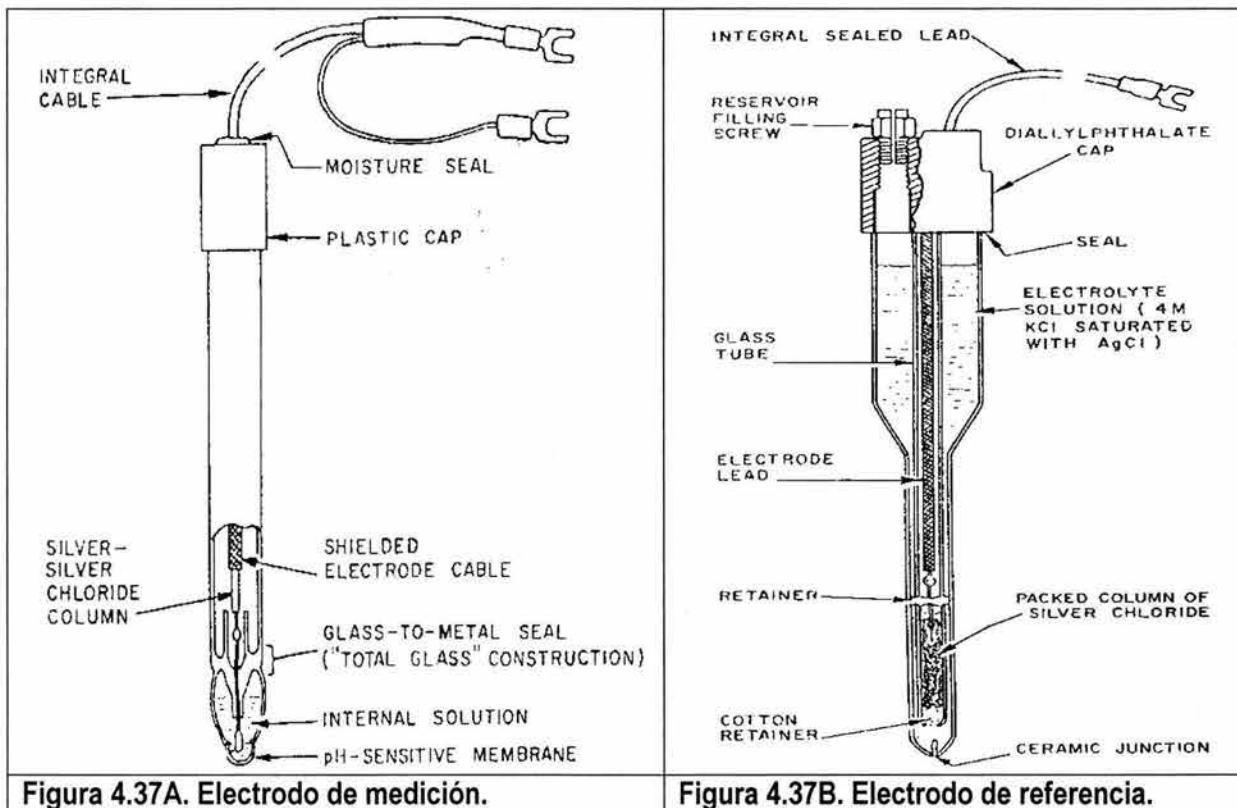


Figura 4.37A. Electrodo de medición.

Figura 4.37B. Electrodo de referencia.

Los electrodos de pH son dos medias celdas; uno de ellos es para la medición de la variable y el otro es el electrodo de referencia (figuras 4.37A y 4.37B); el primero está constituido de vidrio de alta resistencia mientras que el de referencia es de plata/cloruro de plata o en algunas ocasiones es electrodo de calomel. Estas medias celdas son inmersas en la solución en donde se requiere medir el pH, formando una celda generadora de



potencial. El potencial producido por la celda varía con la actividad de los iones hidrógeno (pH) presentes en la solución. El voltaje producido es difícil de medir debido a que la celda posee una resistencia interna extremadamente alta; por ello, la resistencia de entrada y de salida del voltímetro son factores importantes. El electrodo de pH tiene una respuesta rápida, sin embargo el proceso en el cual se aplica pudiera representar retrasos y generar dificultades en el control. La operación del equipo de medición de pH puede verificarse mediante poner los electrodos en una solución de pH conocido, la cual se le llama solución buffer.

La medición de pH se hace en una extensa variedad de procesos en los cuales el grado de acidez o alcalinidad de una solución acuosa se necesita determinar, tales como procesos de coagulación, floculación y control de pérdida de efluentes.

3. Potencial de óxido-reducción (ORP).

Las mediciones del potencial de óxido-reducción determinan la oxidación o reducción de los reactivos en una reacción química. En electroquímica se entiende por oxidación la pérdida de electrones de un reactivo en una reacción química mientras que la reducción representa la ganancia de electrones. En una reacción no puede haber oxidación si no hay una reducción; por ejemplo, un ión ferroso (Fe^{2+}) puede perder un electrón y convertirse en un ión férrico (Fe^{3+}) (la ganancia de electrones incrementa la carga positiva) sólo si una reacción de reducción (por decir un ión estañico (Sn^{4+}) que pase a ión estañoso (Sn^{2+})) ocurre al mismo tiempo.

En este tipo de mediciones se utilizan electrodos similares a los usados en las mediciones de pH (excepto que en estas mediciones de ORP se usa vidrio en lugar de metal), más no por esto significa que se trata de la misma medición; la medición de ORP depende de las propiedades químicas reductoras de los reactivos (no necesariamente oxígeno); el electrodo del metal inerte contra el electrodo de referencia produce un voltaje que se relaciona con el balance de los iones oxidados contra los iones reducidos en la solución.

4. Mediciones de ion selectivo.

Ciertas aplicaciones requieren que la actividad de un ión particular en solución sea medido; esto se puede lograr mediante diseñar un electrodo para el ión particular del cual se requiere medir la concentración. Estos electrodos son similares en apariencia a los empleados para la medición de pH, salvo que estos son electrodos de membrana de vidrio, electrodos de membrana sólida, membrana de intercambio iónico líquido y electrodos impregnados de silicón. Un ejemplo de medición de ión selectivo se encuentra en muchas plantas municipales de tratamiento de agua. Para esta aplicación la medición de la actividad del ión fluoruro se puede relacionar con la concentración. El electrodo de medición es hecho de plástico que sujeta un cristal de fluoruro de lantano a través del cual los iones fluoruro son conducidos. El electrodo de referencia es el mismo que el usado para mediciones de pH.

5. Capacitancia.

La capacitancia eléctrica existe entre dos conductores separados por un aislante o dieléctrico. La cantidad de capacitancia depende de las dimensiones físicas de los conductores y de la constante dieléctrica del material aislante. La constante dieléctrica K para el vacío tiene el valor de uno. Todos los demás materiales dieléctricos tienen una K mayor a uno. Por ejemplo, para aire, la $K=1.00588$, para papel seco $K=2.0$ a 3.0 ; para agua pura $K=80$. Las mezclas de materiales tienen valores compuestos de K que pueden relacionarse con la composición. En general, la técnica de capacitancia presenta una solución a muchos de los problemas de medición que no pueden solucionarse fácilmente por métodos convencionales, tales como determinaciones de agua presente en papel o aceite crudo. La siguiente tabla compara la aplicación de las técnicas de medición analíticas descritas anteriormente.



| | Conductividad | pH | ORP | Capacitancia |
|---------------------------------|----------------------|-----------|------------|---------------------|
| Sensitividad | Regular | Bueno | Excelente | Excelente |
| Fluidos conductores | No aplica | Bueno | Bueno | Bueno |
| Fluidos no conductores | Bueno | No aplica | No aplica | No aplica |
| Mantenimiento | Bajo | Bajo | Alto | Mediano |
| Problemas de instalación | Pocos | Pocos | Muchos | Pocos |
| Costo | Bajo | Bajo | Mediano | Bajo |

Tabla 4.9. Comparación de técnicas de medición analíticas.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**



5. CIRCUITO BÁSICO DE CONTROL.

Un controlador en general puede clasificarse de dos maneras: por el mecanismo físico que emplea puede ser neumático, electrónico, hidráulico, digital, etc., y en términos de la forma o modo de control con la cual reacciona para corregir una señal de error.

Se define modo o algoritmo de control a la acción correctiva del controlador sobre el elemento final de control para hacer que la variable controlada se mantenga en un valor deseado, señal de referencia o punto de ajuste.

Los modos de control más sencillos y que cubren la mayor parte de los requerimientos de los procesos actuales son los siguientes:

- Control de dos posiciones.
- Control proporcional.
- Control integral, también llamado de reajuste automático o restauración (reset).
- Acción derivativa (rate o pre-act).

5.1. Control de dos posiciones.

En esta forma de control el elemento final de control va de un extremo a otro recorriendo toda su carrera y quedando en una de sus dos posiciones extremas, o todo abierto o todo cerrado dependiendo si el error con respecto al punto de ajuste es negativo o positivo; esto es, dependerá de que la variable controlada esté arriba o abajo del punto de control (figura 5.1).

El control de dos posiciones es usado por su simplicidad, su acción es esencialmente cíclica en procesos donde la variable controlada varía con regularidad

Una modificación al control de dos posiciones la constituye el control de dos posiciones con diferencial, en donde se tienen dos valores de salida y dos puntos de ajuste por medio de los cuales el control da un valor de salida de 0 a 100 %, al cortar la variable el punto de ajuste considerado. Al intervalo entre los dos puntos de ajuste se le denomina zona diferencial o zona muerta (figura 5.2).

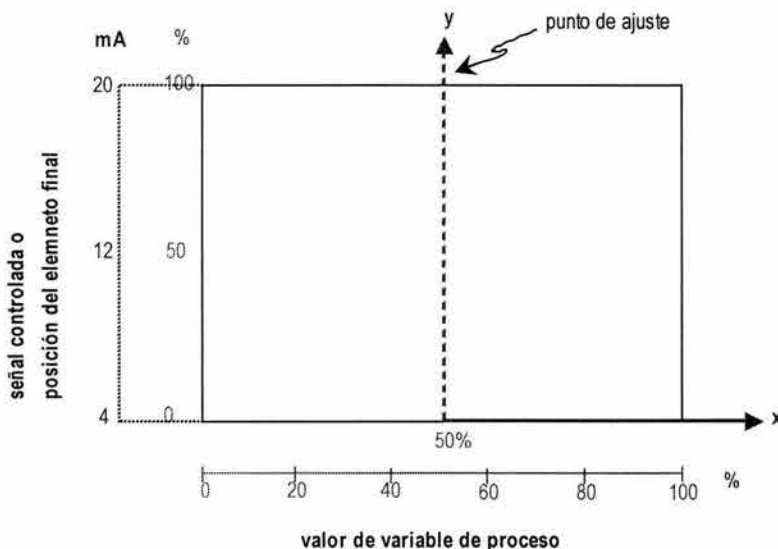


Figura 5.1. Acción de control de dos posiciones.

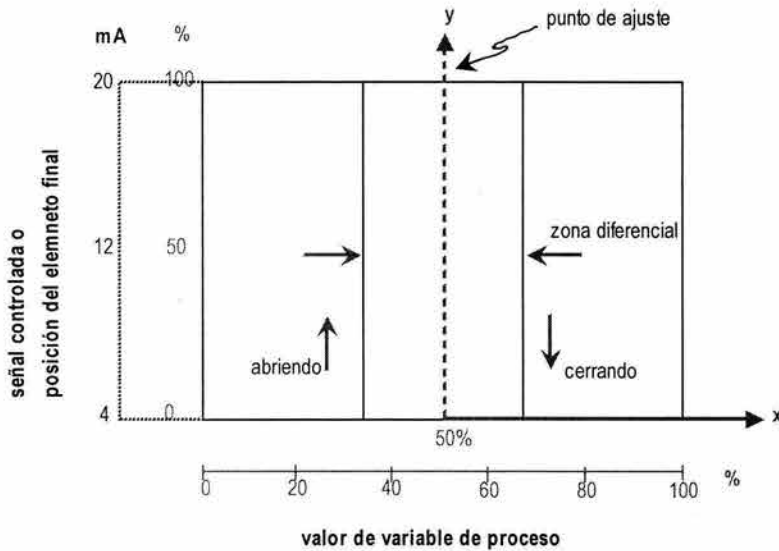


Figura 5.2. Acción de control de dos posiciones con zona diferencial.

5.2. Control proporcional.

El control proporcional es aquel en el cual la posición del elemento final de control es proporcional a la magnitud de la desviación o error; este último es definido como el punto de ajuste menos la variable de proceso. Dicho de otro modo, en el control proporcional se tiene que a cada posición de la válvula corresponde un valor de la variable de proceso, esto es, conforme la válvula va abriendo el valor de la variable de proceso va aumentando. Los controladores que utilizan algoritmo de control proporcional tienen un ajuste llamado banda proporcional.

La banda proporcional se define como el porcentaje en la escala del instrumento necesario para que el elemento final de control pase de la posición "cerrado" a la posición "abierto". La ganancia de un controlador es el inverso de la banda proporcional, esto es, $K_c = 1/B_p$.

La acción de un control proporcional se puede expresar con la ecuación de la recta: $y = mx + b$ en donde la pendiente de la recta es $m = \tan \alpha$, "y" es la señal de salida del controlador o la posición de la válvula en %, "x" es el error igual al valor del punto de ajuste menos el valor de la variable de proceso ($e = pa - vp$) y "b" representa el valor de la ordenada al origen que para el caso del control proporcional vale 0.5, esto es, la mitad de la carrera de la válvula (50%) cuando el valor de la variable de proceso es igual al punto de ajuste. Si la banda proporcional es $B_p = (\%x / \%y) * 100$ se tiene entonces que $m = 1 / B_p$ (ya que $\tan \alpha$ es igual a $\%y / \%x$). De lo anterior se desprende que la ecuación para un control proporcional es la siguiente:

$$y = \frac{1}{B_p} (pa - vp) + 0.5$$

En la figura 5.3 se tienen varias rectas con 0.5 de ordenada al origen y se observa que el valor de la pendiente es dependiente del valor de la banda proporcional; por ejemplo, cuando $B_p = 50\%$ la recta tiene un determinado ángulo α , cuando $B_p = 100\%$, $\alpha = 45^\circ$. Se tiene también que cuando $B_p = 50\%$ la válvula abre al 25% del valor de la variable de proceso y cierra cuando el valor de la variable llega al 75%, lo que significa que el controlador manda una señal de 4 mA de corriente directa al transductor para que este la convierta en una señal neumática equivalente y la válvula abra, mientras que para el cierre del elemento final de control la señal proveniente del controlador hacia el transductor deberá ser de 20 mA CD.

Cuando $B_p = 100\%$ la válvula abre al detectar una señal neumática equivalente a 4 mA CD proveniente del controlador, mientras que cierra totalmente al detectar 20 mA de corriente directa. Finalmente, si $B_p = 200\%$ se tiene que el elemento final de control no abre ni cierra totalmente, esto es, el elemento final de control abrirá únicamente al 25% al detectar la señal del controlador correspondiente a 8 mA CD y cerrará de igual manera solo al 75% cuando el transductor envíe la señal neumática equivalente a 16 mA CD, para una variación entre el 0 y 100% de la variable de proceso.

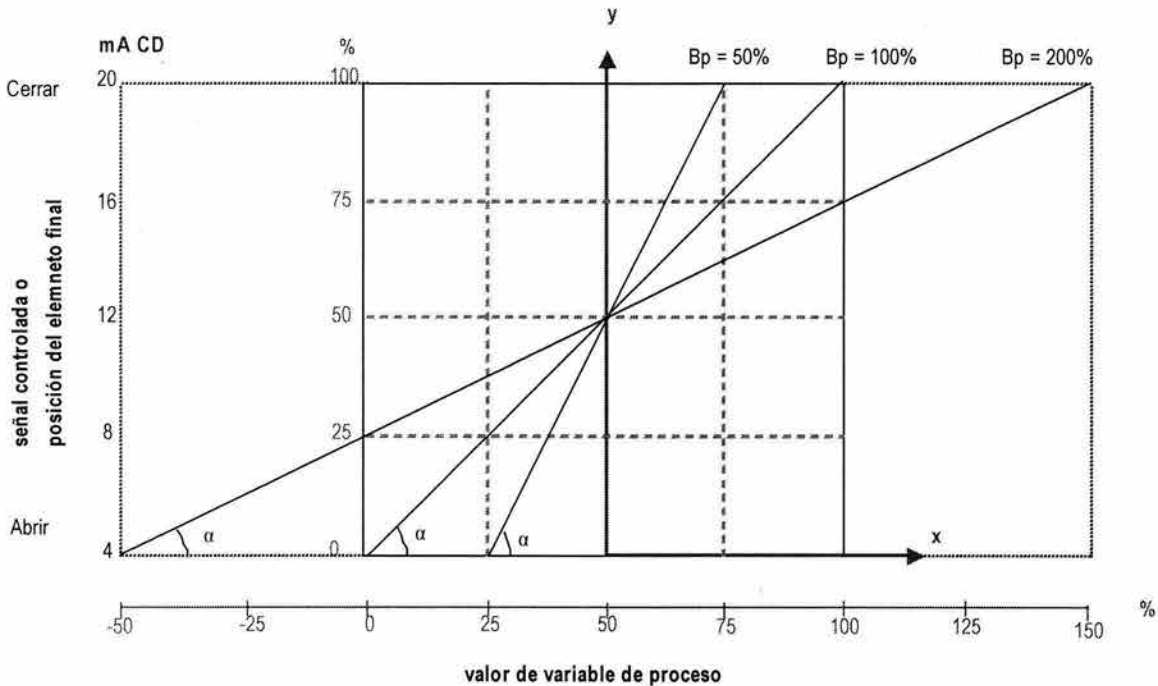


Figura 5.3. Algoritmos de control proporcional.

La figura 5.4 muestra que cuando el valor de la banda proporcional permanece fija, se tienen familias de rectas paralelas que dependen solamente del valor del punto de ajuste. También se observa que al correrse la recta con los valores del punto de ajuste, habrá posiciones en las cuales la válvula o no abre o no cierra totalmente; por ejemplo, cuando el punto de ajuste $p_a = 25\%$, el elemento final de control sólo podrá recorrer del 25 al 100% de su carrera, es decir abrirá totalmente al detectar 4 mA CD pero no cerrará completamente sino solo tres cuartas partes al detectar la señal correspondiente a 20 mA CD, mientras que si $p_a = 75\%$, la válvula cerrará tres cuartas con 16 mA CD y abrirá totalmente con la respectiva señal neumática del transductor equivalente a 4 mA CD.

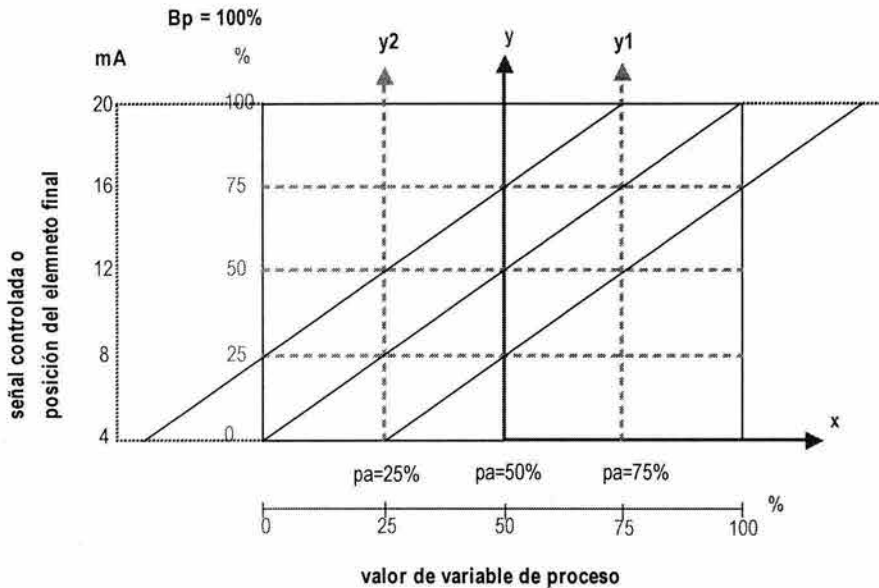


Figura 5.4. Control proporcional con banda proporcional fija y diferentes puntos de ajuste.

5.3. Control proporcional-integral.

Uno de los modos de control que ayuda a evitar la desviación característica del control proporcional es el control integral o de reajuste automático (reset); la finalidad de este es repetir la acción efectuada por el modo proporcional hasta eliminar el error (punto de ajuste menos valor de la variable de proceso), sin importar la posición del elemento final de control.

Partiendo de la ecuación del control proporcional y agregando la acción del reajuste automático se tiene que:

$$y = mx + mr \int_0^t x dt + k, \text{ sustituyendo valores:}$$

$$y = \frac{1}{B_p} (pa - vp) + \frac{r}{B_p} \int_0^t (pa - vp) dt + k; \text{ derivando con respecto al tiempo:}$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{1}{B_p} \frac{d(pa - vp)}{dt} + \frac{r}{B_p} (pa - vp)$$

En donde "r" es el reajuste automático en repeticiones por minuto (rep/min) y se refiere al número de veces que la acción de reposición automática reproduce lo que la acción proporcional haría por sí sola. "k" es una constante igual a la suma algebraica de "b" (0.5) más la constante de integración.

Si se tiene un control con $B_p=100\%$, $e=10\%$ y $r=1$ rep/min, el control proporcional corregirá 10%, el reajuste automático corregirá 10%/min y la corrección total en un minuto será igual a la corrección del control proporcional más el control integral, esto es, 20%.

Si el reajuste es de 2 rep/min con $b_p=100\%$ y $e=10\%$, se tiene que el control proporcional corregirá 10%, el reajuste automático corregirá 20%/min y la corrección total en un minuto será de 30%.

De lo anterior se desprende que el reajuste automático al cabo de un minuto repite la corrección efectuada por la acción proporcional en un instante. Si no existe error o desviación, $y = k$ en la ecuación de control proporcional-integral y el reajuste automático no actúa.

Cuando se aplica el control proporcional-integral el elemento final de control adquiere una nueva posición y se consigue que el valor de la variable de proceso regrese al valor del punto de ajuste, eliminando con esto el error.

En la figura 5.5 se tiene un control con banda proporcional, $B_p=100\%$, reajuste automático, $r=1$ rep/min y un error, $e=10\%$. En un instante dado, la acción proporcional actúa de la siguiente manera:

$$y = \frac{1}{B_p}(pa - vp) + 0.5; \quad y = \frac{1}{1}(0.1) + 0.5; \quad y = 0.6 = 60\%.$$

La acción del control proporcional corrige la abertura de la válvula en un 10% (punto P). Al no ser suficiente esta corrección debido a que el valor de la variable de proceso no regresa al punto de ajuste, el reajuste automático empieza a actuar:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{r}{B_p}(pa - vp) = \frac{1}{1}(0.1); \quad \frac{dy}{dt} = 0.1 = 10\%$$

Al cabo de un minuto la desviación o error se anula, esto es $vp=pa$ (punto R) y el control con reajuste automático deja de actuar teniendo el elemento final de control una corrección total del 20% (el doble del efecto causado por la acción proporcional en un instante) con lo cual $y = 70\%$.

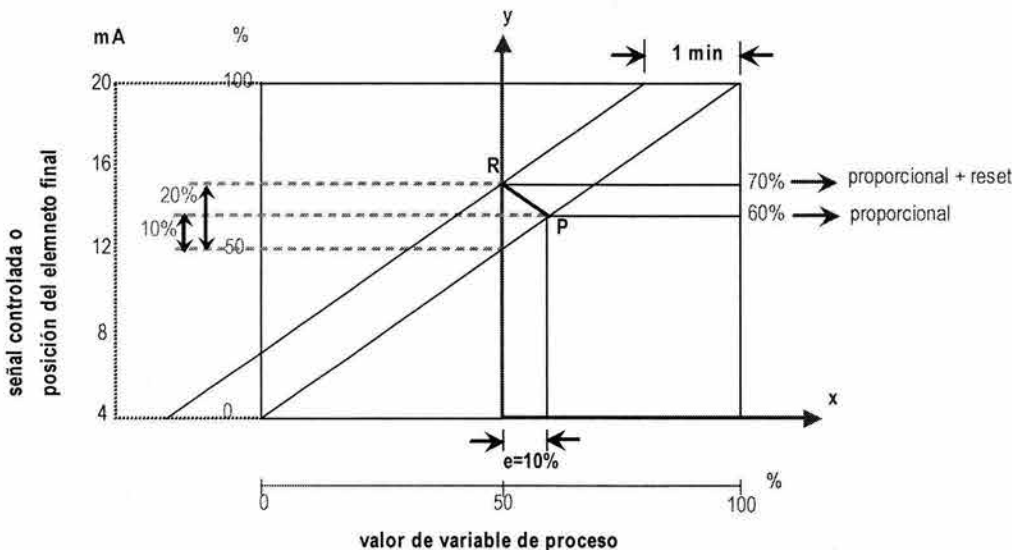


Figura 5.5. Control proporcional-integral.

5.4. Control proporcional-integral-derivativo (PID).

Dentro de un circuito de control se tiene que la distancia de transmisión recomendada para señales neumáticas es de 300 m (1000 ft aproximadamente), esto debido al tiempo de respuesta.

El tiempo de respuesta es el tiempo que tarda el elemento primario de medición en detectar el 63.2% de la variable de proceso.

El tiempo muerto es el tiempo que tarda el elemento primario de medición en responder, esto es, el tiempo en que se detectan los cambios en la variable de proceso.

Los procesos con mucho tiempo muerto o atrasos en la transmisión pueden representar serias dificultades para su control aun cuando se utilice control proporcional con reajuste automático. El control proporcional es óptimo cuando en el proceso no hay cambio de cargas; cuando estos cambios se dan se causan errores excesivos y se requiere de mucho tiempo para volver al punto de control.

La acción derivativa o rate proporciona una continua relación entre los cambios de carga de la variable controlada y la posición del elemento final de control. La acción derivativa nunca existe sola sino en combinación con el control proporcional o con el control proporcional-integral y lo que hace es una sobre corrección inicial cuando sucede una desviación, con lo cual el elemento final de control se mueve en forma adelantada al principio; así, el efecto del rate es anticiparse a los efectos que pudieran producir cambios de carga en procesos con tiempo muerto.

La ecuación que representa los tres modos de control, PID es la siguiente:

$$y = mx + mr \int_0^t x dt + mR \frac{dx}{dt} + k, \text{ sustituyendo valores:}$$

$$y = \frac{1}{B_p} (pa - vp) + \frac{r}{B_p} \int (pa - vp) dt + \frac{R}{B_p} \frac{d(pa - vp)}{dt} + k$$

En donde "R" es el adelanto en minutos del valor de la corrección que efectuará la acción proporcional al cabo de un tiempo determinado, debido a una velocidad de cambio del error (dx/dt). Cuando se dice que el control rate tiene un ajuste de dos minutos significa que con la derivada se obtuvo un control en la variable de proceso dos minutos antes, que no se lograría si únicamente se empleara una acción proporcional para controlar el proceso.

Se tiene un control con los siguientes ajustes: $B_p=100\%$, $R=1$ min si existe una desviación de $dx/dt = 10\%/min$ (cuando $dx/dt = 0$ la acción derivativa no actúa). El control automático corregirá 10% en un minuto por la acción proporcional y 10% instantáneamente por efecto de rate, es decir se adelantará un minuto a la acción correctora de la banda proporcional; por lo tanto, al cabo de un minuto la corrección total de la válvula será de 20%, 10% de la banda proporcional y 10% de rate.

Como ejemplo, se tiene que instantáneamente empieza a existir una velocidad de cambio del error $dx/dt = 10\%$ cuya duración es de 1/3 de minuto; posteriormente empieza a disminuir hasta llegar a cero al cabo de 2/3 de minuto. Al primer instante en que el control detecta que $dx/dt = 10\%/min$, la banda proporcional se hace corta de manera que la válvula se mueve en ese instante 10% (punto D). En cuanto $dx/dt = 0$ la pendiente de la recta empieza a disminuir hasta llegar nuevamente a su valor original ($B_p=100\%$) (figura 5.6).

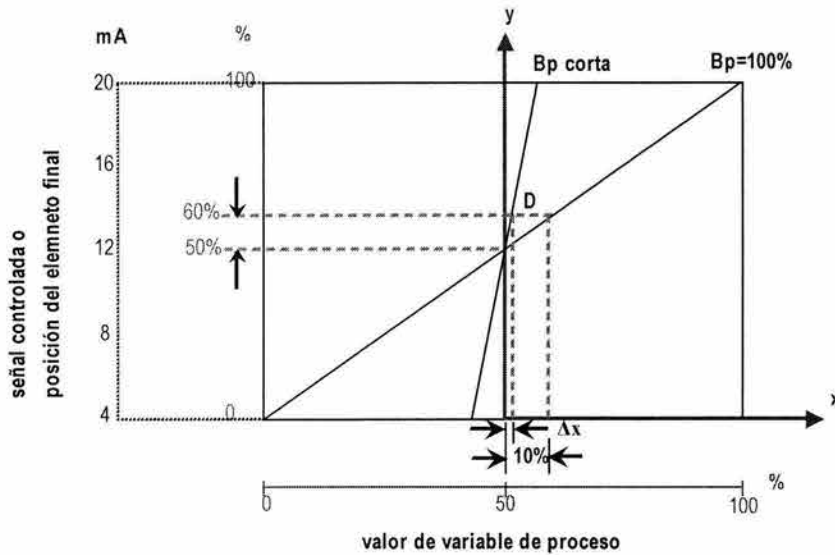


Figura 5.6. Acción proporcional-derivativa.

5.5. Diagrama de bloques Feedback o Retroalimentado.

Algunas veces resulta difícil la aplicación del control retroalimentado debido a que los procesos son diferentes unos de otros, en especial en cuanto a su comportamiento dinámico; sin embargo, en la actualidad existen muchas similitudes entre los sistemas y el identificar estas puede aliviar por mucho los problemas del control. En la figura 5.7 se tiene un intercambiador de calor; el propósito del sistema de control es el de mantener la temperatura del fluido de proceso en un valor específico llamado punto de ajuste (set point) que se introduce al controlador manualmente; el controlador manipula una válvula en la línea de vapor para suministrar la cantidad de vapor necesaria que mantiene la temperatura del fluido en el valor del punto de ajuste.

Un sistema necesariamente tiene que ser controlado debido a que el proceso se encuentra sujeto a perturbaciones; por ejemplo, en el sistema de la figura 5.7 cambios en la presión del vapor, variaciones en la velocidad de flujo del fluido de proceso, condiciones ambientales cambiantes y diferentes cantidades de vapor pueden ocasionar disturbios que afecten al sistema. La figura 5.8 muestra el diagrama de bloques correspondiente al circuito de control retroalimentado. La variable de referencia que constituye el punto de ajuste se introduce manualmente al controlador; el elemento de retroalimentación detecta continuamente el valor de la variable controlada y la manda al controlador para que este, mediante compararla con la variable de referencia, haga los ajustes necesarios e incida sobre el elemento final de control para dar salida a la variable manipulada hacia el proceso.

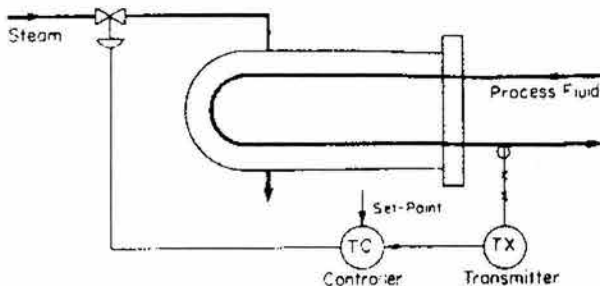


Figura 5.7. Control de temperatura con retroalimentación en un intercambiador de calor.

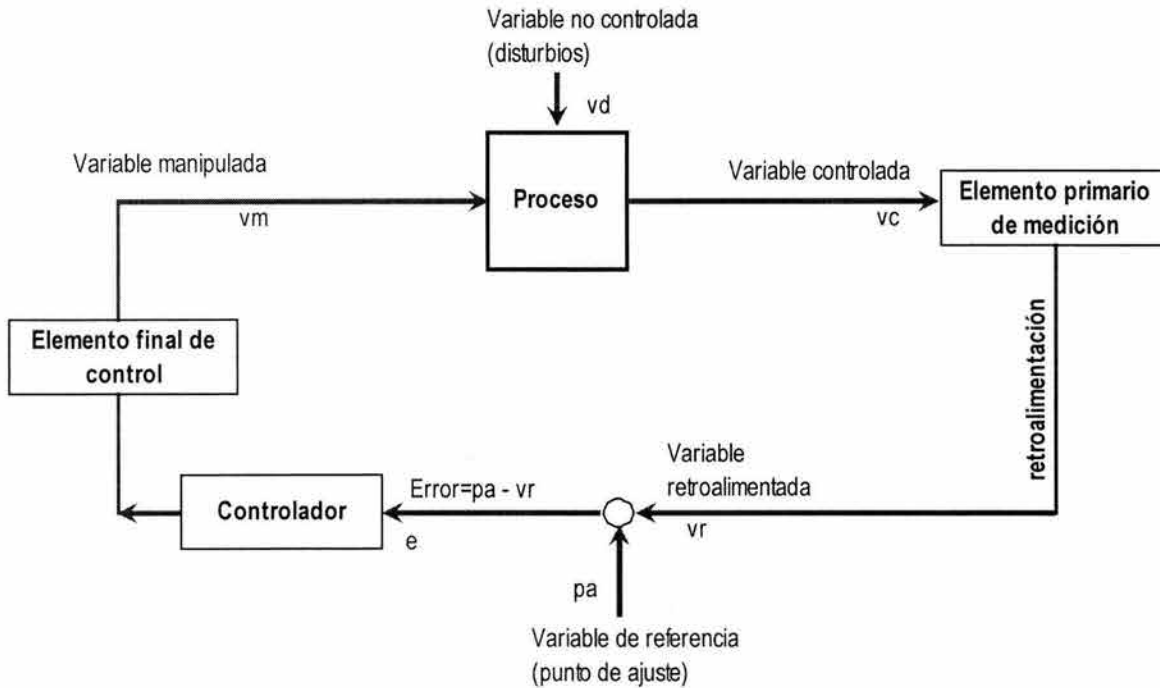


Figura 5.8. Diagrama de bloques de circuito de control con retroalimentación.

5.6. Diagrama de bloques Feedforward o Prealimentado.

El control prealimentado es una estrategia usada para compensar por disturbios en un sistema antes de que afecten la variable controlada. Un sistema de control prealimentado mide un disturbio en la variable, predice su efecto sobre el proceso y aplica una acción correctiva para anular el efecto del disturbio.

Un diagrama de bloques de un sistema de control prealimentado se muestra en la figura 5.9. El transmisor mide la variable afectada por el disturbio tal como entra al proceso y transmite esta información al controlador prealimentado. El controlador es el encargado de determinar el cambio requerido en la variable manipulada de manera que cuando el efecto del disturbio se combina con el efecto del cambio en la variable manipulada, no afecte sobre la variable controlada. La variable afectada puede ser parte de la variable no controlada o puede venir de otra fuente; la salida del control prealimentado incluye un componente bias requerido para vigilar la variable no controlada y un componente secundario que cambia en respuesta al disturbio en la variable. Este componente secundario debe incluir el estado estacionario, el estado dinámico y otras características no lineales de la variable afectada por el disturbio, de manera que la señal correctiva de salida tenga la magnitud correcta y ocurra al mismo tiempo para cancelar completamente el efecto del disturbio.

Teniéndose un modelo matemático exacto del proceso, el control prealimentado ajustará exitosamente la variable manipulada de modo que la variable controlada no sea afectada por el disturbio. Se debe notar que la capacidad del sistema para mantener la variable controlada en su valor requerido es totalmente dependiente de la acción del control prealimentado; la variable controlada en si misma no tiene influencia sobre el control debido a que el sistema no tiene retroalimentación.

El control prealimentado puede ser un simple recurso de relevo al presentarse algún disturbio en una variable a la entrada de un transmisor y proveer una salida para operar una válvula en la línea de la variable manipulada. Sin embargo, la relación entre la entrada y la salida del control prealimentado no es una a una ni mucho menos lineal; ajustes de ganancia y bias son necesarios para vigilar la variable manipulada.

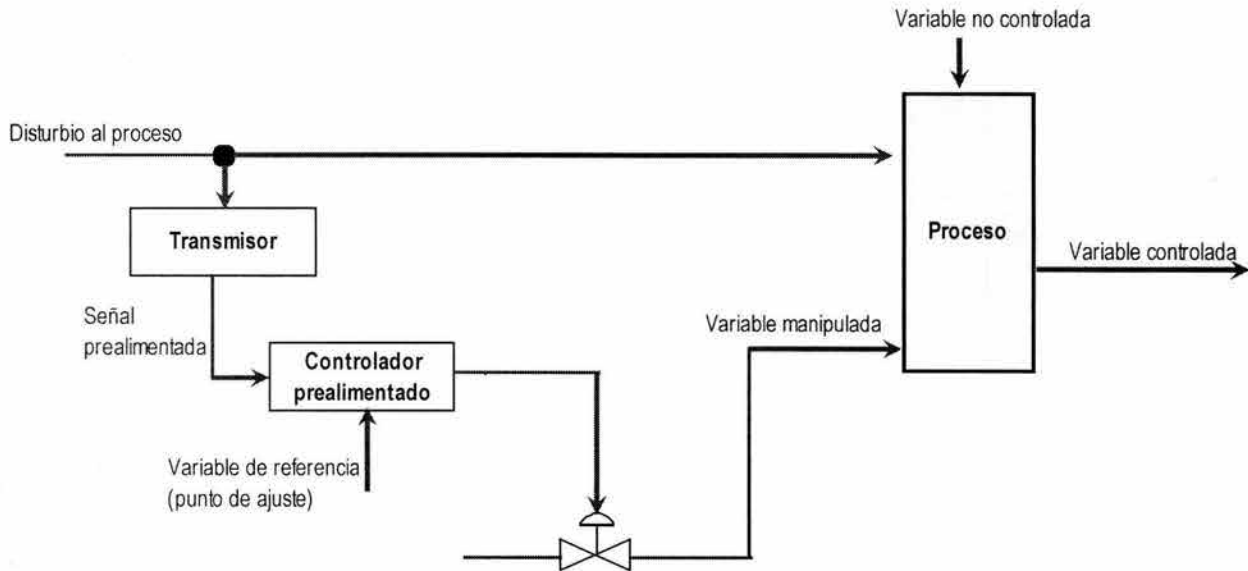


Figura 5.9. Diagrama de bloques de circuito de control prealimentado.

Un control prealimentado presenta los siguientes inconvenientes:

- El modelo del proceso debe ser exacto.
- Todos los instrumentos en el circuito de control deben estar correctamente calibrados.
- Disturbios en variables diferentes de la que el controlador prealimentado trata no son controlados.

Por lo anterior el control prealimentado por si mismo resulta insuficiente; sin embargo combinado con un control retroalimentado convencional se constituye en una poderosa herramienta de control. Si un cambio dentro de un proceso ocurre con frecuencia de modo que el retroalimentado no puede controlarlo o si el disturbio es tan grande que la variable controlada no puede mantenerse dentro de los límites de tolerancia y si la variable afectada por el disturbio no puede ser controlada, se puede adicionar un control prealimentado al sistema.

Un sistema de control prealimentado-retroalimentado se muestra en la figura 5.10. El control retroalimentado hace el mismo trabajo y tiene la misma responsabilidad como si estuviera actuando solo, pero su capacidad para mantener un buen control se mejora por la función del prealimentado.

Las ventajas de un control prealimentado-retroalimentado son las siguientes:

- El prealimentado anula el efecto de los disturbios medidos mientras el retroalimentado actúa sobre el sistema como un vigilante
- El efecto de otros cambios diferentes de los disturbios medidos son corregidos por el sistema retroalimentado.

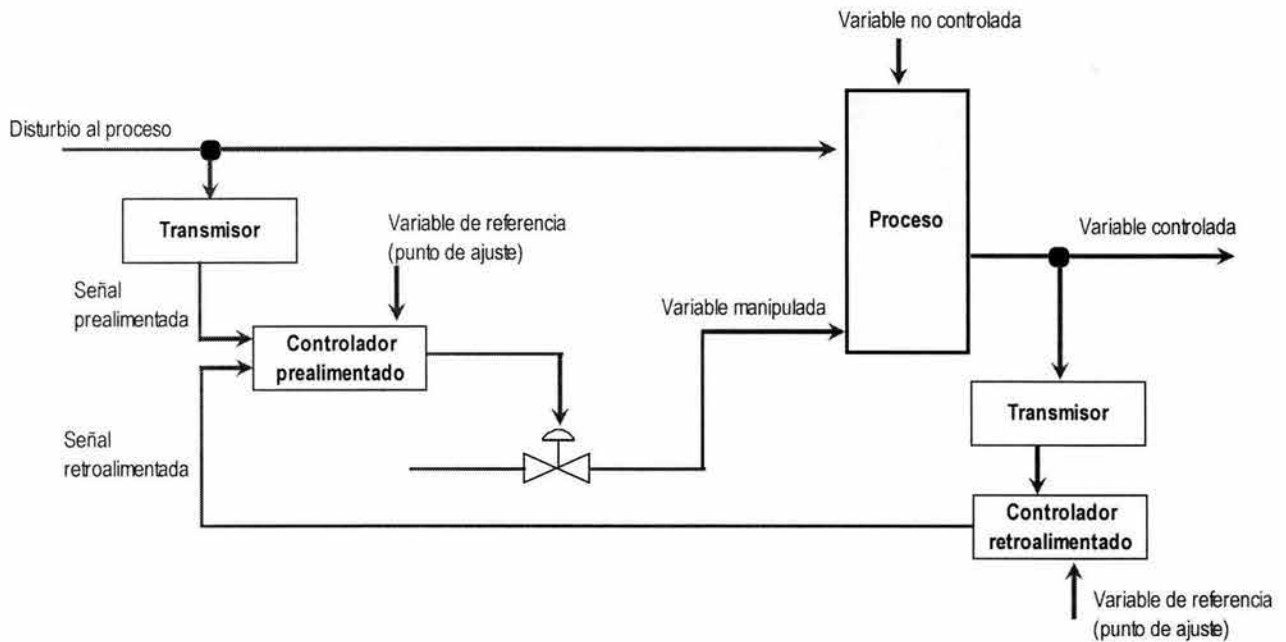


Figura 5.10. Diagrama de bloques de circuito de control prealimentado-retroalimentado.

Los sistemas de control prealimentado y control en cascada a menudo son confundidos debido a las similitudes que presentan: medición de dos variables, una variable manipulada y un punto de ajuste independiente. Sin embargo, para el caso del sistema de control en cascada se tiene un control maestro que determina el punto de ajuste de otro control llamado esclavo (figura 5.11). En contraste, las correcciones de prealimentado y retroalimentado ajustan de manera independiente la válvula de control y no se aplica el control a la variable

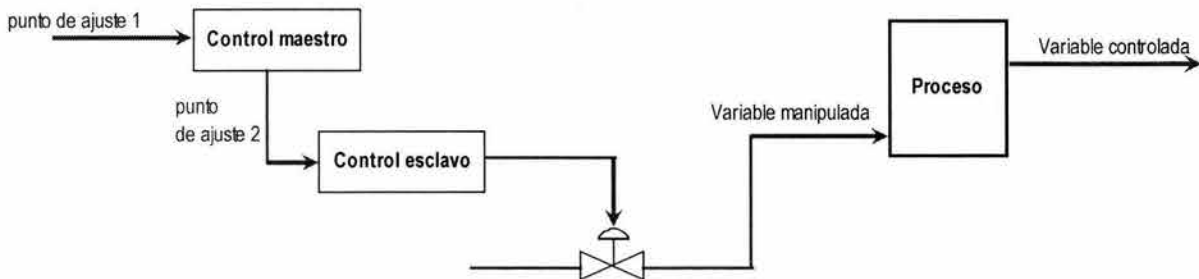


Figura 5.11. Diagrama de bloques de circuito de control en cascada.

En resumen, el control con retroalimentación es la primera alternativa y de hecho es el control más comúnmente usado; sin embargo, cuando el controlador debe operar con valores bajos de ganancia y reiniciar para puestas óptimas, los disturbios pueden causar severos trastornos y la recuperación del sistema puede tomar demasiado tiempo. El uso del control con prealimentación ajusta los disturbios más grandes, aunque resulta mejor si tales disturbios se detectan y se hacen las correcciones rápidamente sobre la variable manipulada.

El control con prealimentación ha tenido éxito en aplicaciones en las cuales la respuesta en los circuitos de control con retroalimentación es lenta mientras que la trayectoria del prealimentado genera respuestas rápidas.

En las figuras 5.12 y 5.13 se muestra un ejemplo de cómo un control prealimentado puede utilizarse para compensar por perturbaciones en un sistema antes de que estos afecten la variable controlada. Se tiene que el pH de una corriente es controlado mediante la adición de un reactivo químico. Un control retroalimentado mide el valor de pH en la corriente de salida y ajusta una válvula en la línea de alimentación del reactivo químico para mantener la salida del valor de pH en el punto de ajuste.

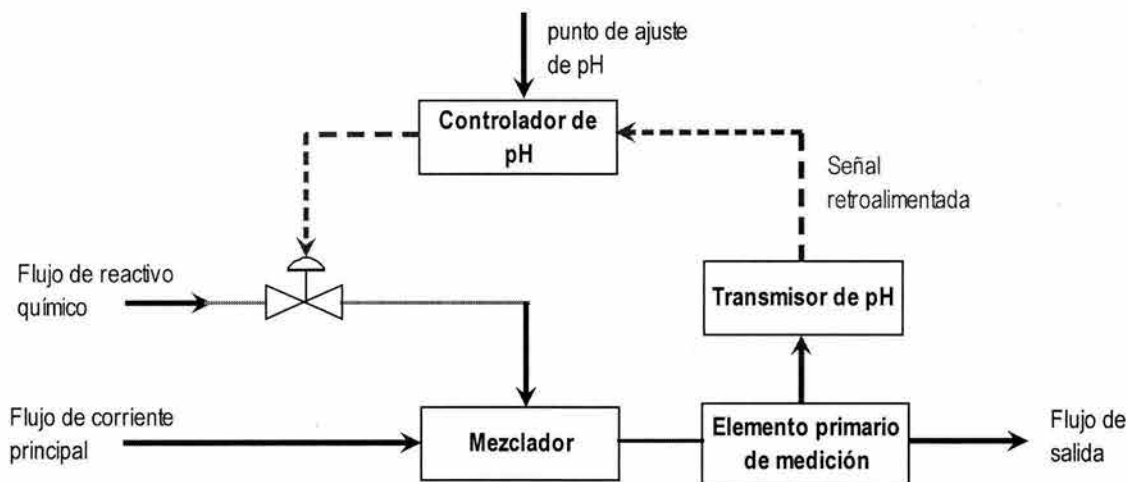


Figura 5.12. Diagrama de bloques de sistema de control de pH con retroalimentación.

Las perturbaciones en la corriente de flujo principal requieren de ajustes correctivos en el flujo del reactivo químico; sin embargo, el sistema no puede darse cuenta de estos disturbios hasta que su efecto sea detectado en el flujo de salida. Si el control de pH no es satisfactorio, la incorporación de un control prealimentado puede ayudar.

La adición de un control prealimentado al sistema de control retroalimentado proporciona los medios para aplicar ajustes correctivos en el flujo del reactivo químico antes de que las perturbaciones en la corriente de flujo principal sean detectadas en el flujo de salida. Tales perturbaciones pueden deberse a la velocidad del flujo o bien al pH de la corriente principal. Para el caso específico del ejemplo, se asume como causante de los disturbios a la velocidad. La velocidad del flujo de la corriente principal es medida para ajustar el flujo del reactivo químico en la proporción correcta de manera que no afecte en la salida de pH.

En la figura 5.13 se muestra el sistema de control retroalimentado con la inclusión de control prealimentado. Este sistema tiene un control de flujo ratio entre la corriente de flujo principal y el flujo del reactivo químico, en donde el flujo de la corriente principal es la variable independiente, el flujo del reactivo químico la variable dependiente y el control ratio se proporciona en el cálculo de prealimentado. El valor del control ratio se establece con la salida del algoritmo de control de pH. A fin de hacer que este sistema opere apropiadamente, la válvula instalada en la línea de dosificación de reactivo químico debe ser diseñada para suministrar en proporción de uno a uno entre la corriente de flujo principal y la corriente de flujo de reactivo químico. Esto es, la entrada de un rango completo de control a la válvula deberá corresponder a la cantidad de reactivo químico requerido para la salida de un rango completo del transmisor de flujo.

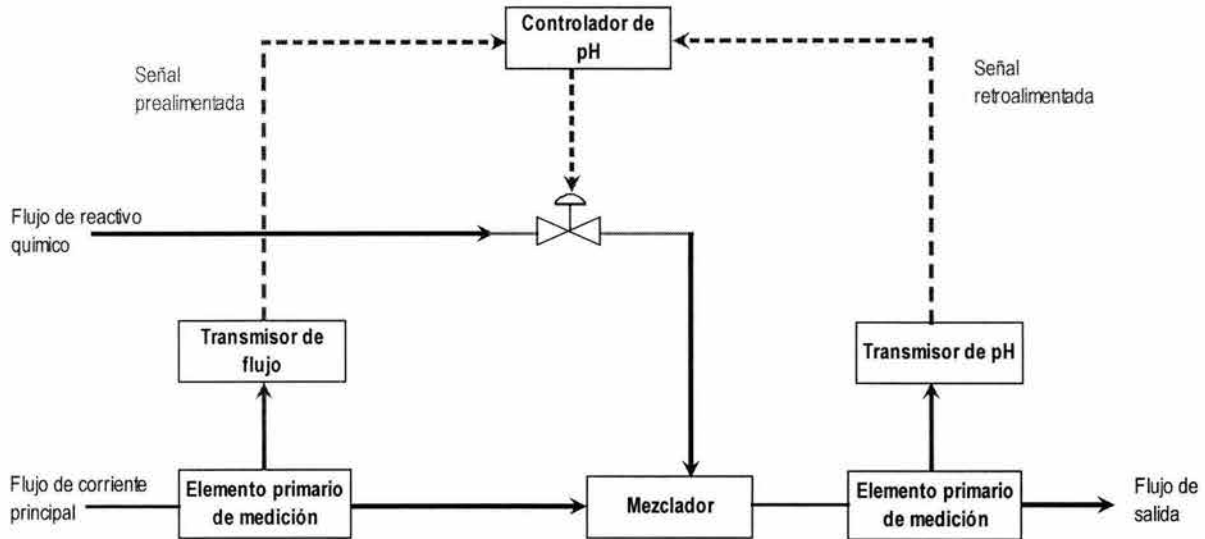


Figura 5.13. Diagrama de bloques de sistema de control de pH con prealimentación-retroalimentación.

En un circuito de control ratio lo que se controla es la relación de dos variables medidas. El control se lleva a cabo mediante el ajuste de una de las dos variables llamada variable controlada, la cual sigue en proporción a la segunda que es la variable no controlada (figura 5.14). La constante de proporcionalidad K es la relación entre tales variables. Aplicaciones de control ratio se encuentran en procesos químicos donde se adicionan varios reactivos, relaciones de aire-combustible en calderas y simple mezclado de corrientes.

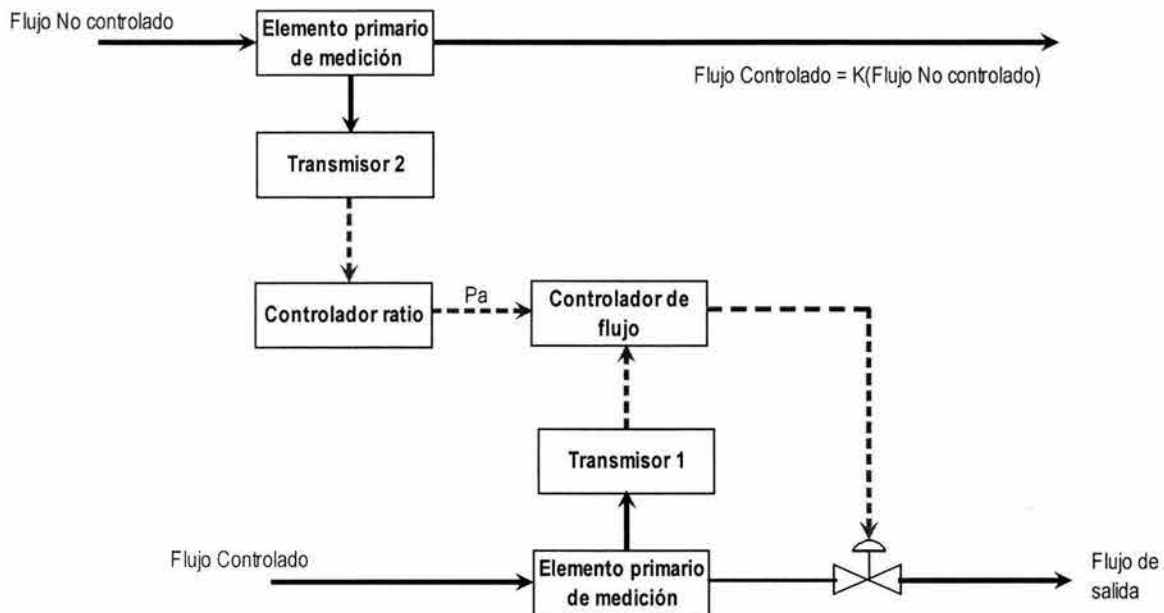


Figura 5.14. Control de flujo ratio.



La efectividad de un control prealimentado-retroalimentado depende de la capacidad del sistema para ajustar el flujo del reactivo químico para compensar por variaciones en la velocidad del flujo de la corriente principal. Tal capacidad se puede mejorar mediante adicionar un control de flujo a la corriente de suministro de reactivo químico. Esto forma un sistema de control cascada en donde el controlador de pH es el maestro y el controlador de flujo de reactivo químico es el esclavo (figura 5.15).

La válvula de control de flujo del reactivo químico forma parte ahora del circuito de control esclavo y las características de la válvula ⁴ ya no son importantes para la alimentación del flujo de reactivo químico debido a la consideración del "ratio" en el control prealimentado. La entrada al control prealimentado proveniente del transmisor de flujo instalado en la línea principal se combina con la salida del algoritmo de control de pH que a su vez constituye el punto de ajuste dado al control de flujo (esclavo) para que este actúe sobre el elemento final de control.

⁴ La gran mayoría de las válvulas de control utilizadas en los procesos industriales presentan una de las siguientes tres características: lineales en las que el incremento de flujo es directamente proporcional al incremento de carrera, de igual porcentaje las que dan cambios con igual porcentaje de flujo por incremento de carrera y de apertura rápida las que no siguen patrones de flujo definidos.

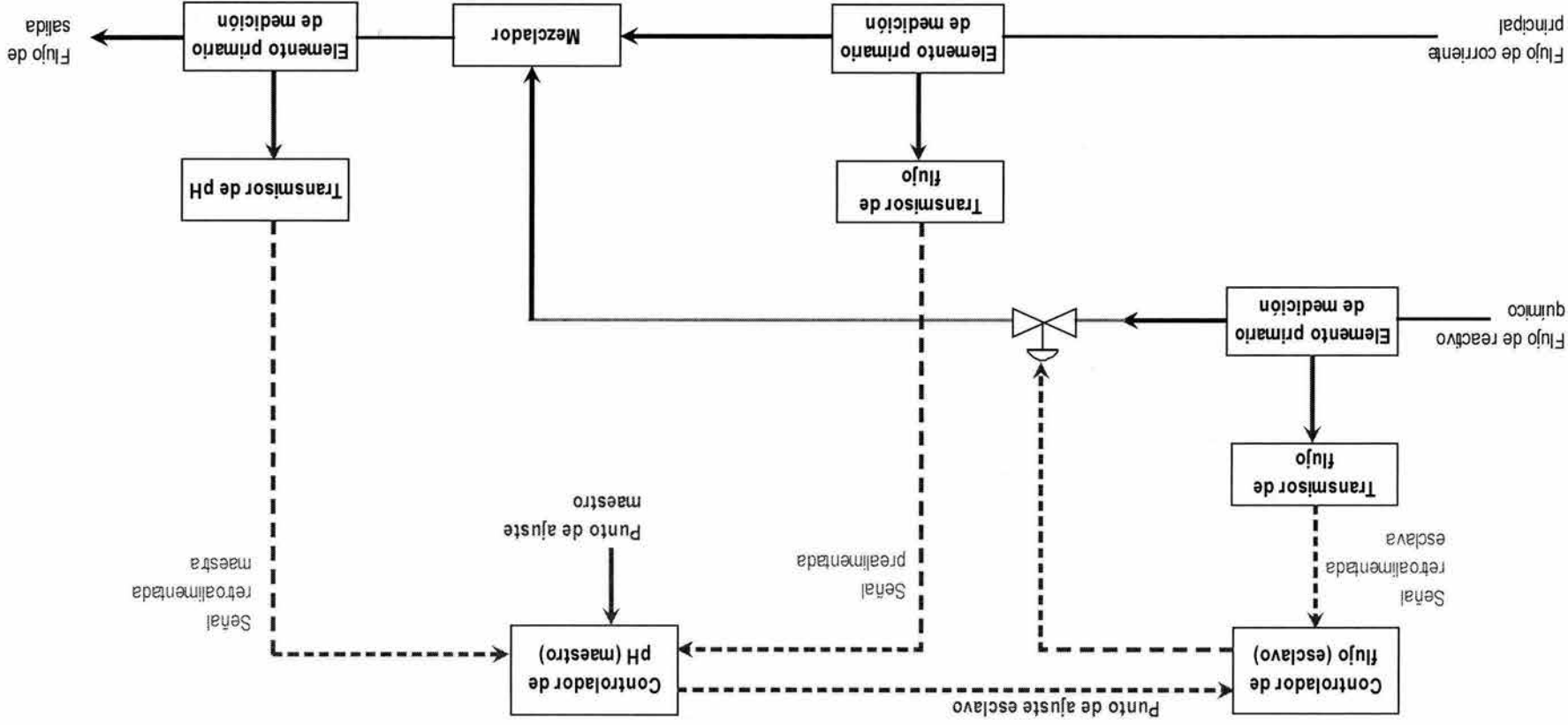


Figura 5.15. Diagrama de bloques de sistema de control de pH con prealimentación-retroalimentación y control cascada.



6. SIMBOLOGÍA UTILIZADA EN INSTRUMENTACIÓN. DIAGRAMAS TÍPICOS DE INSTRUMENTOS.



Durante el desarrollo del presente trabajo, se ha definido una serie de elementos con el propósito de generar la estructura básica para el tratamiento de un agua para uso industrial; se ha visto (capítulo 3, figura 3.1) que en la mayoría de plantas químicas y refinerías se sigue un patrón similar en la distribución que se le da al agua; además, se han establecido los fundamentos para el tratamiento y se han señalado las variables a medir para que el control propuesto resulte eficiente.

Es entonces cuando, teniendo todos los ingredientes dispuestos, se puede generar el boceto que describa la "instrumentación para la medición y control de variables en una planta de tratamiento de agua para uso industrial." Este bosquejo es lo que se conoce como Diagrama de Tuberías e Instrumentación o "DTI".

Un Diagrama de Tuberías e Instrumentación (DTI) es extensión de un diagrama de flujo. En el diagrama de flujo cada uno de los pasos del proceso se muestra conectado entre sí con flechas. De este modo la secuencia del proceso queda establecida. En la figura 6.1 se muestra el diagrama de flujo correspondiente al proceso del tratamiento de agua cruda, para su uso posterior en cualquier planta química o refinería.

Este tipo de diagrama de flujo es conocido como "diagrama de bloques" y en este, como ya se ha mencionado, los pasos del proceso se muestran representados en cajas o bloques. Sin embargo, en esta primera aproximación al proceso, el tipo de equipo que se va a utilizar tal como bombas, ventiladores, reactores, etc., no se expone.

La interpretación del diagrama de bloques es como sigue:

El abastecimiento de agua cruda a la planta puede provenir de una fuente de agua natural tal como un río. Accesan al complejo 1000 galones por minuto (alrededor de 5450 m³ diarios),⁵ los cuales entran en su totalidad al equipo de clarifloculación, previa desinfección con cloro gas en la línea de agua cruda. De hecho, el propósito de clorar en este punto es con la finalidad de evitar el crecimiento biológico en el clarifloculador y, por consiguiente en los filtros y demás sistemas posteriores a estos. La adición de sulfato de aluminio y polielectrolito se hace en el reactor para estimular la coagulación y floculación de sólidos suspendidos para de ese modo, obtener a la salida del clarifloculador un agua con menor cantidad de sólidos que la que ingresa. La purga del equipo es dirigida hacia un sistema de tratamiento de lodos en donde se recuperan alrededor de 4.5 galones por minuto (24.5 m³ diarios) de los 5 GPM que se purgan. Estos 4.5 GPM de agua recuperada se envían a un cárcamo de captación dispuesto para la recolección y almacenamiento de agua de reuso. El agua ya clarificada accesa al sistema de filtración en donde se elimina una mayor cantidad de sólidos suspendidos y es en esta parte del proceso en donde la calidad de esta agua filtrada es buena para distribuirse a usuarios como red contra incendio, sistema de enfriamiento, planta desmineralizadora y hacia uso doméstico. Los enjuagues y retrolavados de los filtros no se descargan al drenaje, sino que se reorientan al cárcamo de captación dispuesto para la recolección y almacenamiento de agua factible a reusarse. El agua que se manda al tren de generación de vapor requiere de excelente calidad, sobre todo ausencia de sólidos, dureza y sílice que son perjudiciales para equipos tales como calderas e intercambiadores de calor; es por esta razón que se trata antes en una planta desmineralizadora. De los 404.5 GPM (2204.5 m³/d) dirigidos a esta planta, 364 GPM (1984 m³/d) son los que se envían finalmente a generación de vapor, mientras que los 40.5 GPM restantes (agua utilizada para regeneración de resinas de las unidades catiónicas y aniónicas) se descargan a una fosa para neutralización y posterior envío a una fuente de agua externa al complejo (laguna o río). Así mismo se disponen 200 GPM (1090 m³ diariamente) de agua filtrada para uso doméstico, previa adsorción con carbón activado para la eliminación de olores y sabores y otros tipos de materia presente que no ha sido removida (tal como fenoles y materia orgánica). El agua de enjuagues y retrolavados de las columnas (5 GPM) es conducida al cárcamo de captación dispuesto para la recolección y almacenamiento de agua factible a reusarse. También se desinfecta esta agua vía inyección de cloro gas en la línea.

⁵ Flujos ideales, propuestos en base a memorias de cálculo y recomendaciones de proveedores de los equipos integrantes del proceso.



La planta ha dispuesto un cárcamo de captación para la recolección y almacenamiento de agua factible a reusarse. Este tipo de agua es la proveniente de los enjuagues y retrolavados de los filtros de arena, las columnas de adsorción de carbón activado y el agua obtenida del tratamiento de lodos. Esta agua (30 GPM) se reorienta al clarifloculador para que, en conjunto con los 1000 GPM provenientes del límite de batería (fuente de agua natural tal como un río), se trate en el sistema.

Se tiene instalado un sistema de separación de grasas y aceites que realiza un desbaste de la corriente proveniente del drenaje aceitoso, para que el efluente descargado a la fuente externa al complejo (laguna o río) cumpla con las condiciones de normatividad vigente (NOM-001-ECOL-1994).

Como se puede ver, el diagrama de bloques es de gran utilidad ya que se ocupa de la secuencia del proceso y de los requerimientos másicos (balance de materia), pero sin envolver demasiadas consideraciones en cuanto a equipos. Es por esta causa que el diagrama de bloques se vuelve limitado debido a que la selección de equipo es necesaria para obtener un balance de materia más completo. También, la selección de equipo es necesaria para la construcción de la planta.

Así, el próximo paso hacia el diagrama de tuberías e instrumentación (DTI) es el "Diagrama de Flujo de Proceso" o DFP.

Aquí el equipo necesario para el proceso es considerado, y la simbología para cada uno de estos equipos ya ha sido estandarizada a lo largo de los años. Cabe hacer mención que estos símbolos no corresponden a los usados para DTI's. Si la simbología de un equipo específico no se encuentra en los estándares uno mismo puede inventarla. En este tipo de diagramas las válvulas por lo general no se representan (si acaso válvulas de seguridad importantes en el proceso). También, para el caso de bombas o ventiladores en una corriente dada, basta con representar esquemáticamente de una a tres; los motores no se muestran en este tipo de diagramas, aunque en algunos casos se pueden incluir para una mejor comprensión del funcionamiento del equipo (acción encomendada a los DTI's). Así, el diagrama de flujo de proceso o DFP muestra la secuencia y el equipo pertinente a usar en el proceso, pero también cada una de las corrientes son enumeradas y la información de estas es plasmada en tablas que se anexan al plano, justo abajo del esquema. Es recomendable al numerar las corrientes, dejar 2 o 3 números vacíos por cada 5 o más números asignados. Esto permitirá adicionar corrientes que puedan surgir posteriormente, dándoles un número cercano a las corrientes vecinas.

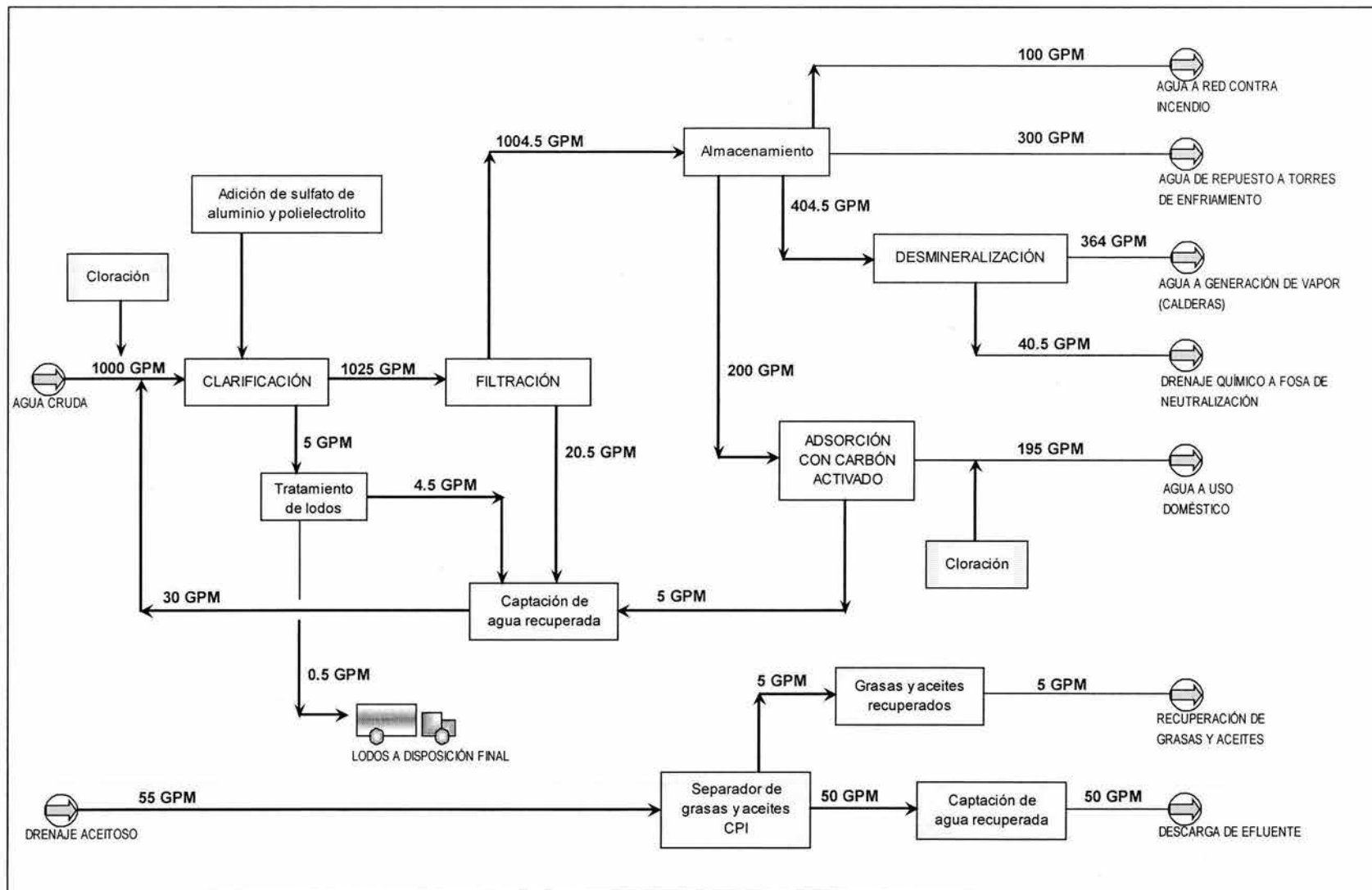


Figura 6.1. Diagrama de bloques del sistema de tratamiento de agua.



El propósito entonces de un DFP es definir el proceso y ayudar en la producción de balances de materia y energía. Las figuras 6.2, 6.3 y 6.4 muestran el ejemplo correspondiente al proceso del tratamiento de agua cruda para su uso posterior en cualquier planta química o refinería. Los números de corriente y un texto son incluidos en el diagrama y se colocan cercanos a las piezas con las cuales están asociados. El texto es únicamente descriptivo y no constituye el nombre del equipo (el mejor formato para esto es el diagrama de tuberías e instrumentación).

También es conveniente numerar los equipos haciendo a la vez una lista de equipo que puede contener en un inicio algunos nombres y descripciones. A menudo el tipo específico de equipo no es definido en estos diagramas, sino hasta que se realiza el primer acercamiento del DTI.

La interpretación del diagrama de flujo de proceso (DFP) es como sigue:

El agua cruda requerida por el complejo accesa por la bocatoma (canal de llegada en donde se encuentran los equipos de bombeo) y de aquí se distribuye hacia los consumidores mediante las bombas BA-01 y BA-01A, una en operación y la otra en espera. Se prevé que la calidad de esta corriente no sea apta para su uso y es común que, entre otras cosas contenga gran cantidad de sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos (SD), turbiedad, cationes y aniones disueltos y tal vez algo de grasas y aceites y coliformes.

En primera instancia se efectúa una desinfección en línea mediante el equipo de dosificación de gas cloro identificado como CL-01, con el objeto de eliminar los coliformes y evitar la proliferación de organismos biológicos tanto en las líneas como en los equipos tales como clarifloculador, filtros de arena y unidades catiónicas y aniónicas. Es muy importante que la inyección de cloro sea la requerida estequiométricamente para mantener el nivel de cloro libre residual (entre 0.2 y 1.5 ppm según dato de la tabla 3.3). La adición de sulfato de aluminio y polielectrolito se hace en el reactor directamente y se cuenta para esto con sistemas dosificadores, integrados por recipientes de almacenamiento del químico (TD-01 para sulfato de aluminio y TD-02 para polielectrolito) y bombas dosificadoras (BD-01 y BD-02 respectivamente). Es importante que al adicionarse el coagulante se verifique el pH, ya que como se sabe, la solubilidad de la sal formada está directamente ligada a esta variable. En caso de que el pH estuviera fuera del rango requerido, se debe adicionar algún ácido o base (según sea el caso) para satisfacer los requerimientos de la operación. También resulta significativo el que la dosificación se lleve a cabo de acuerdo a las condiciones de turbiedad presentes (ver tabla 3.4). Así pues, si hiciéramos una comparación de los valores vertidos en la corriente 9 contra los valores de la corriente a la salida del clarifloculador (corriente 10), tendríamos que la turbidez ha disminuido y, por consiguiente, también la cantidad de sólidos suspendidos totales (en el ejemplo figuras 6.2 y 6.3, se tienen valores de 20 contra 8 a la salida y de 50 contra 10 para turbidez y SST respectivamente).⁶

Se tiene que la purga del equipo (corriente 41) es dirigida hacia un sistema de tratamiento de lodos constituido por una fosa o cárcamo de captación, FC-02, un filtro prensa para la deshidratación de lodos, FP-01, un recipiente de almacenamiento de polielectrolito TD-03, una bomba dosificadora BD-03 y las bombas BA-08 y BA-08A. La función del polielectrolito en esta parte del proceso es la misma que en la clarifloculación, esto es, acondicionar los lodos para inducir una mayor floculación y, por consiguiente, obtener una mayor eficiencia en el proceso. El agua que se recupera en el filtro prensa se envía mediante bombeo (BA-09 y BA-09A) al cárcamo de captación FC-01 que ha sido dispuesto para la recolección y almacenamiento de agua factible a reusarse. Lo mismo sucede con las corrientes provenientes de los enjuagues y retrolavados de las filtros de arena y las columnas de adsorción de carbón activado: estas son direccionadas también al FC-01 y de este se bombea un flujo de aproximadamente 30 GPM de agua al clarifloculador, producto del reuso de las corrientes descritas anteriormente (13, 33 y 44 según figura 6.2).

⁶ Valores ideales, supuestos y acomodados de tal forma para que el ejemplo que compete (construcción y formato de un DFP) sea entendible.



El agua ya clarificada se almacena en el tanque TA-01 y de aquí se envía mediante las bombas BA-03 y BA-03A a los filtros de arena a presión. El TA-01 garantiza un flujo mínimo para que las bombas tengan siempre presión a la succión y por tanto se evite que estas caviten. En esta parte del proceso se logrará una reducción importante en la cantidad de turbiedad presente y por consiguiente de sólidos suspendidos totales (SST). Al comparar los valores para las corrientes de entrada y salida a los filtros (11 y 12 respectivamente) se corrobora lo anterior: la turbidez disminuye de 8 NTU's a 0.1 NTU mientras que los SST bajan de 10 ppm a sólo 0.1 ppm. El agua filtrada se almacena en el tanque TA-2 y de aquí se distribuye mediante las bombas BA-04 y BA-04A al sistema de contraincendio (es recomendable una fuente de almacenamiento independiente para este sistema que constituye de hecho una parte "delicada" en cualquier planta); el bombeo de agua filtrada al área de torres de enfriamiento se lleva a cabo por las BA-05 y BA-05A, mientras que para la planta desmineralizadora se tienen las bombas BA-6/6A y para uso doméstico las BA-07/07A.

Para el caso de la planta desmineralizadora, se tiene un arreglo de 3 unidades catiónicas seguido de un desgasificador y 3 unidades aniónicas que, de acuerdo a la tabla 3.6 corresponde a un agua con alta dureza, alcalinidad, sulfatos, cloruros y sílice. Sabemos que para la generación de vapor es necesaria una excelente calidad en el agua, por ello es que con este arreglo de las unidades en la planta desmineralizadora se espera dureza 0 (o casi cero) y ausencia de sílice a la salida de esta. Para la regeneración de las resinas de las unidades catiónicas se utiliza ácido sulfúrico, el cual se agrega mediante un sistema dosificador integrado por 2 tanques TD-04 y TD-04A y 2 bombas dosificadoras BD-04 y BD-04A (1 tanque y su bomba operan normalmente, y el otro tanque y bomba quedan en espera o "stand-by"); la regeneración de las resinas de las unidades aniónicas se hace con sosa cáustica diluida, mediante un sistema dosificador integrado por 2 tanques TD-05 y TD-05A y 2 bombas dosificadoras BD-05 y BD-05A (1 tanque y su bomba operan normalmente y el otro tanque y bomba quedan en espera (stand-by)). La presión del efluente a la salida del desgasificador no es suficiente para su ingreso a las unidades aniónicas, por ello se hace necesario un sistema de bombeo integrado por las bombas BA-10/10A. El agua producto de los enjuagues, retrolavados y regeneraciones de las resinas lleva una considerable cantidad de aniones y cationes (producto principalmente de la regeneración) disueltos, por ello no es apta para reuso (se pueden realizar análisis en las corrientes de enjuagues y retrolavados y de ese modo determinar si estas son susceptibles a reuso); lo que se hace es descargarla a la fuente externa que se tiene para este propósito, previa neutralización en una fosa.

Las bombas BA-07 y BA-07A son las encargadas de distribuir el agua filtrada al tren destinado para uso doméstico (en lavabos, inodoros, etc. de oficinas, talleres, laboratorios del propio complejo o incluso colonias aledañas). Esta agua accesa a un tren de columnas de adsorción de carbón activado (CCA-01/02/03) para la eliminación, como se ha dicho, de olores y sabores y otros tipos de materia presente que no ha sido removida (tal como fenoles y materia orgánica). Una vez hecha esta operación se lleva a cabo una desinfección en línea (cilindros de cloro gas CCL-02/02A y gabinete de cloración CL-02), con la finalidad de eliminar residuos de coliformes y organismos biológicos no destruidos en la primera cloración hecha al agua cruda, además de mantener el nivel adecuado de cloro libre residual.

Finalmente se trata el drenaje aceitoso mediante un separador de grasas y aceites primario denominado CPI-01. El aceite separado se almacena en el tanque TA-03 y con las bombas BA-11 y BA-11A se manda a un área destinada para la contención o desecho de este, mientras que el agua se almacena en el TA-04 y de aquí, mediante bombeo con las BA-12 y BA-12A se descarga a la fuente externa que se tiene para este propósito (tal como una laguna o río).

Como se puede ver, en el diagrama de flujo de proceso se maneja una cantidad mayor de información en relación con el diagrama de bloques: se definen los equipos y se plasma el balance de materia en tablas que incluyen, tanto el balance másico como el balance iónico; en estas tablas también se muestran características propias de las corrientes tales como temperatura, presión, pH, turbidez, conductividad, coliformes, etc. Un ejemplo típico de la información que por lo general se presenta en un DFP es el siguiente:



| | UNIDADES | AGUA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------------------------------|-------------------------------|------|------------|---------------------|-----------------|-------------------------------|---|--|---------------------------|---------------------|
| | | RIO | AGUA CRUDA | ADICION DE CLORO | AGUA CLORADA | AGUA CLORADA Y DEL CARC. 2 | ADICION DE Al ₂ (SO ₄) ₃ | AGUA C/(Al ₂ (SO ₄) ₃) y Cl ₂ | PURGA DEL CLARIFICADOR | AGUA CLARIFICADA |
| FLUJO | GPM | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| FLUJO | M ³ /D | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| FLUJO | L/D | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| IDENTIFICACION | | | | | | | | | | |
| CATIONES | | | | | | | | | | |
| Ca ⁺⁺ | mg/l como CaCO ₃ | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Mg ⁺⁺ | mg/l como CaCO ₃ | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Na ⁺ | mg/l como CaCO ₃ | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| K ⁺ | mg/l como CaCO ₃ | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Total Cationes | | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| ANIONES | | | | | | | | | | |
| HCO ₃ ⁻ | mg/l como CaCO ₃ | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| CO ₃ ⁻ | mg/l como CaCO ₃ | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| OH ⁻ | mg/l como CaCO ₃ | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SO ₄ ⁻ | mg/l como CaCO ₃ | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| NO ₃ ⁻ | mg/l como CaCO ₃ | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Cl ⁻ | mg/l como CaCO ₃ | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Total Aniones | | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Dureza Total | mg/l como CaCO ₃ | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Alcalinidad A (AM) | | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Alcalinidad B (F) | | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Silice | mg/l como SiO ₂ | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Bioxido de Carbono | mg/l como CO ₂ | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Hierro | mg/l como Fe ⁺⁺ | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Turbiedad | Unidades NTU | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Color Unidades | APHA | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Materia Orgánica | deter. como KMnO ₄ | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Sólidos Disueltos Totales | mg/l | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| pH | unidades | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Conductividad Eléctrica | m mhos/cm | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Cloro total (residual) | mg/l | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Sólidos suspendidos totales | mg/l | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Sólidos totales | mg/l | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Oxígeno disuelto | mg/l | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Nitrógeno Amoniacal | mg/l | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Nitrógeno Orgánico | mg/l | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Nitrógeno total | mg/l | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Grasas y Aceites | mg/l | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| DQO Total | mg/l | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| DBO ₅ Total | mg/l | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Fenoles totales | mg/l | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Coliformes Totales | NMP/100 ml | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Piomo | mg/l | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Temperatura | °C | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Materia Flotante | | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Sólidos sedimentables | mg/l | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Tabla 6.1. Descripción de corrientes en un DFP de tratamiento de agua.

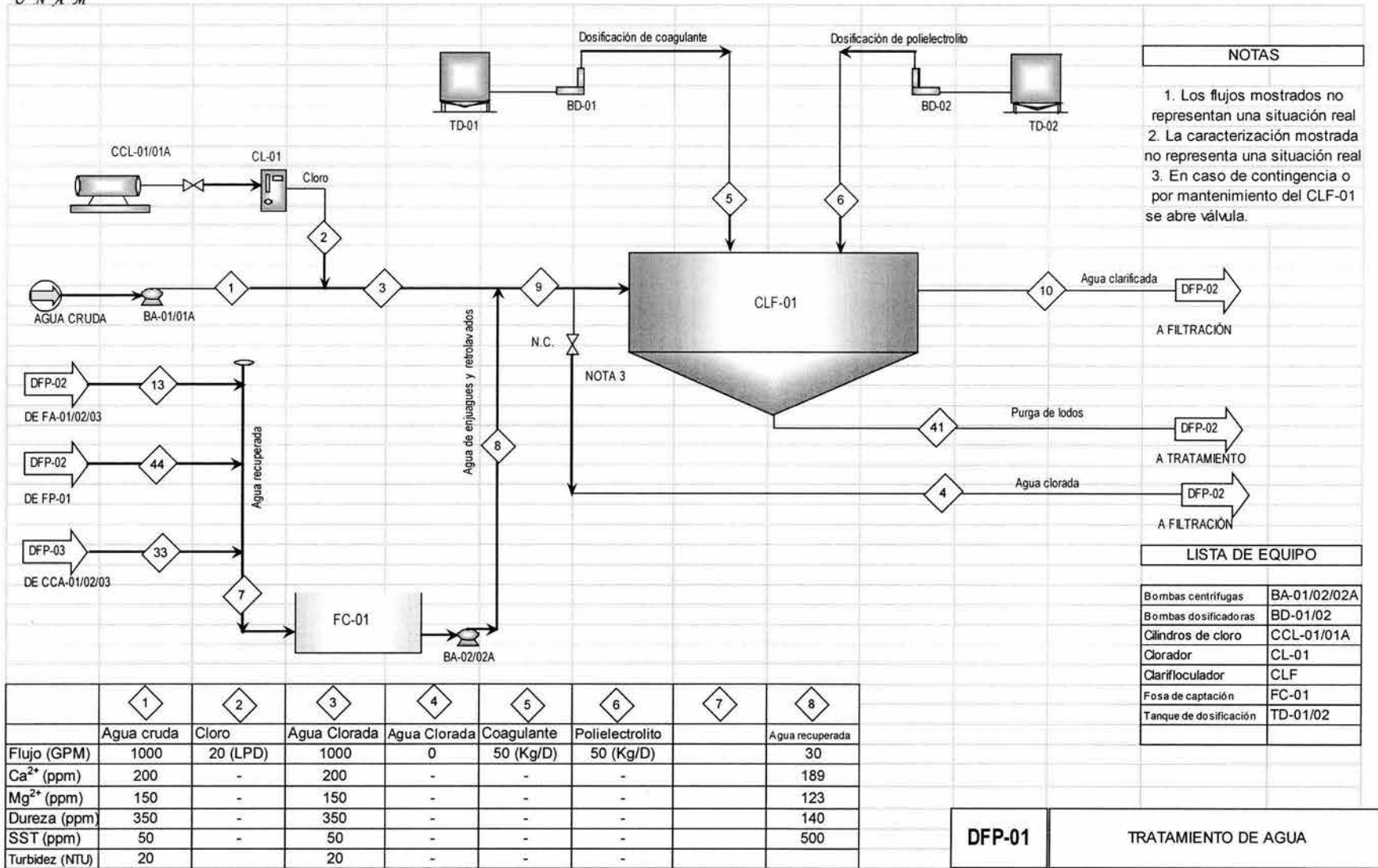


Figura 6.2. Diagrama de flujo de proceso de pretratamiento de agua.

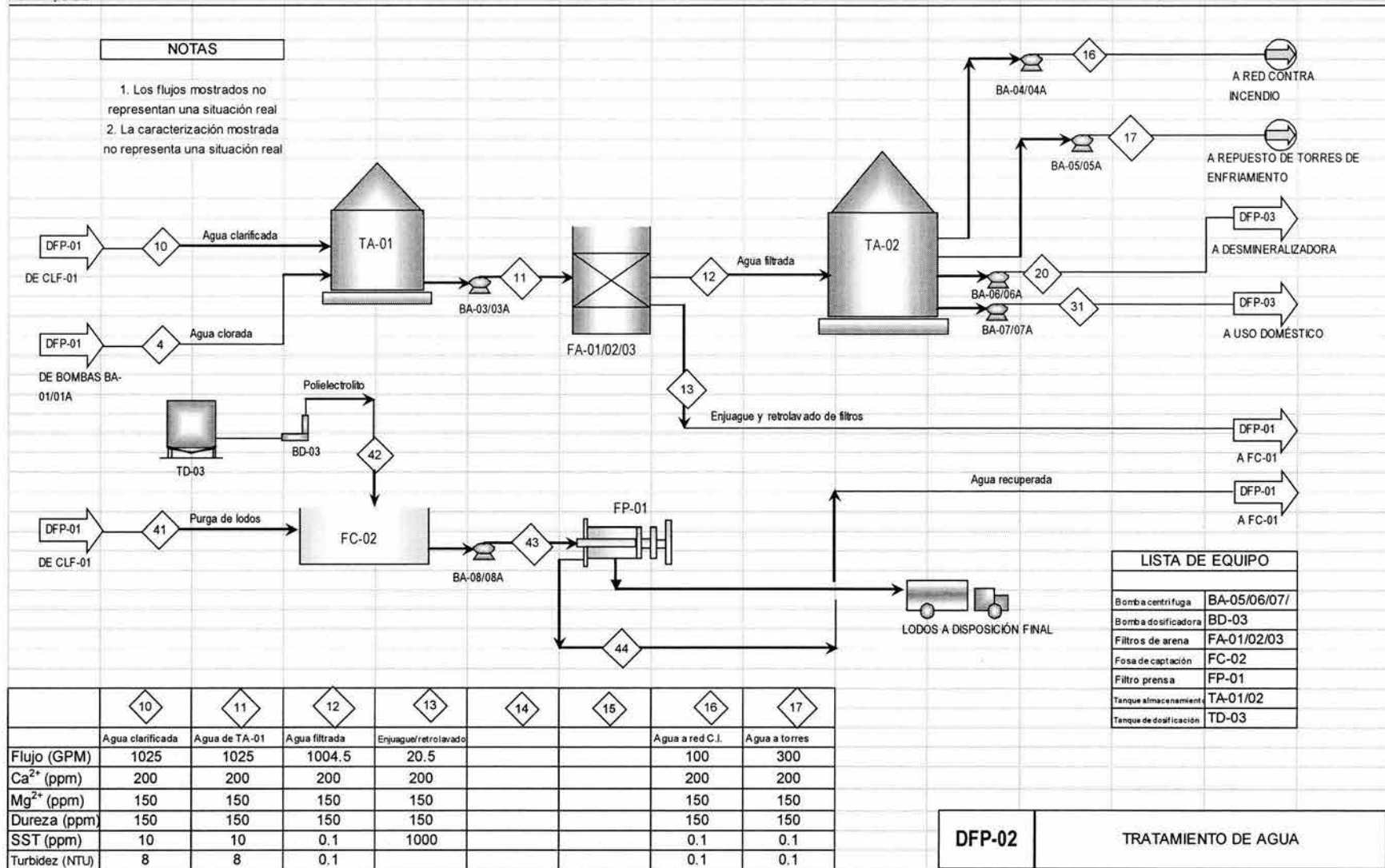


Figura 6.3. Diagrama de flujo de proceso de filtración de agua y tratamiento de lodos.

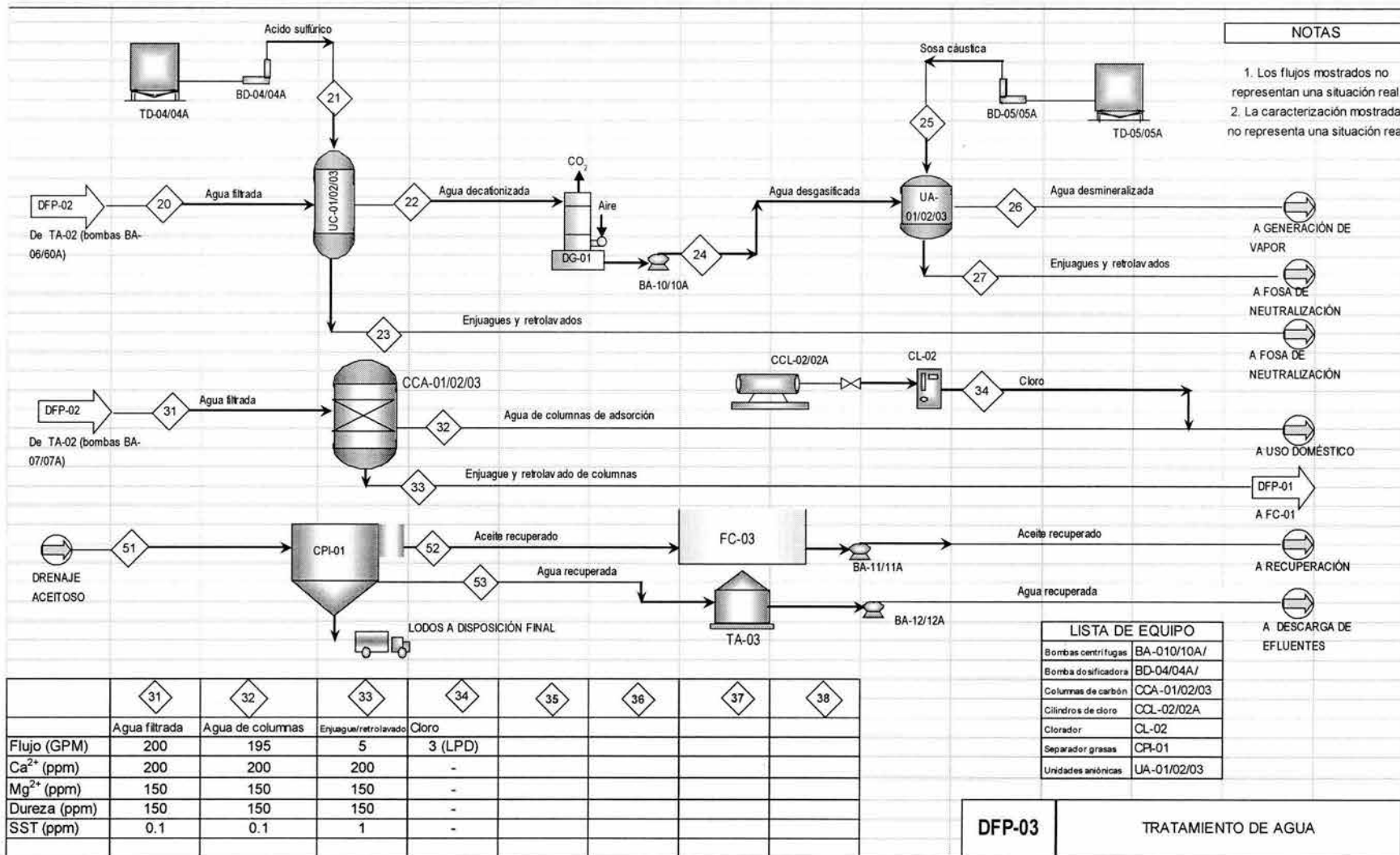


Figura 6.4. Diagrama de flujo de proceso de desmineralización de agua, adsorción con carbón activado y tratamiento de aceites.



6.1. Instrumentación requerida para controlar el proceso.

Es posible hacer un diagrama de tuberías e instrumentación sin generar los correspondientes diagramas de bloques y diagramas de flujo de proceso, aunque lo recomendable es que se realicen algunos bosquejos de estos por lo menos a mano alzada antes de iniciar la generación del DTI.

La evolución de un DTI a partir de un DFP consiste, de manera general en la adición de instrumentos para la medición y el control de las variables del proceso. La siguiente tabla comparativa muestra, a manera de resumen, las diferencias existentes entre un diagrama de flujo de proceso y un diagrama de tuberías e instrumentación:

| Características | DFP | DTI |
|--|-----|-----------------|
| Se usa en la construcción | No | Si ⁷ |
| Muestra todos los procesos y tuberías | No | Si |
| Indica todos los controles | No | Si |
| Muestra todos los motores | No | Si |
| Muestra aislantes térmicos | No | Si |
| Muestra el equipo principal | Si | Si |
| Muestra el flujo | Si | No |
| Muestra la caracterización de las corrientes | Si | No |

Tabla 6.2. Características presentes en DFP's y DTI's típicos.

Al inicio de un proyecto, el DFP es un dibujo que se hace necesario y de hecho es el más importante mientras el balance de materia se elabora. Más tarde, el DFP se constituye en la guía para elaboración del DTI. Finalmente, el diagrama de tuberías e instrumentación suple al diagrama de flujo de proceso, eclipsándolo totalmente. De manera general se identifica a ambos como:

- Herramientas de comunicación.
- Antecedentes.
- Ayudas para la comprensión del proceso.

En el caso de la primera y segunda función, se aprecia que tanto el DFP como el DTI se prestan en un proyecto a estandarizar criterios, cálculos y consideraciones generales y particulares de los equipos y el proceso, esto es, permiten que se hable un solo lenguaje; además, las revisiones o versiones que van surgiendo a lo largo del proyecto, se constituyen en antecedentes del trabajo realizado y en un momento dado se pueden volver a consultar para realizar verificaciones.

La tercera función se aprecia mejor vía el siguiente ejemplo:

La figura 6.5 muestra un circuito en el cual un tanque recibe líquido de otra parte del proceso que viene sin controlar. A la descarga del tanque se encuentra un control de nivel y un control de flujo. Para comprender el proceso, el circuito trabaja como sigue. Si la presión P1 en la línea de entrada disminuye (y el flujo por consiguiente) en un 10 %, la válvula de nivel responde mediante disminuir el flujo de salida para mantener el nivel y, en forma simultánea, la válvula del control de flujo abre para mantener el flujo constante; el resultado final

⁷ Esta es la distinción más relevante. El DTI en el campo de trabajo es probablemente uno de los documentos más usados.



es una válvula de flujo completamente abierta (y además inoperante), de tal manera que el control de nivel es el que está operando satisfactoriamente el circuito de control y por lo tanto, tal circuito instalado no es satisfactorio.

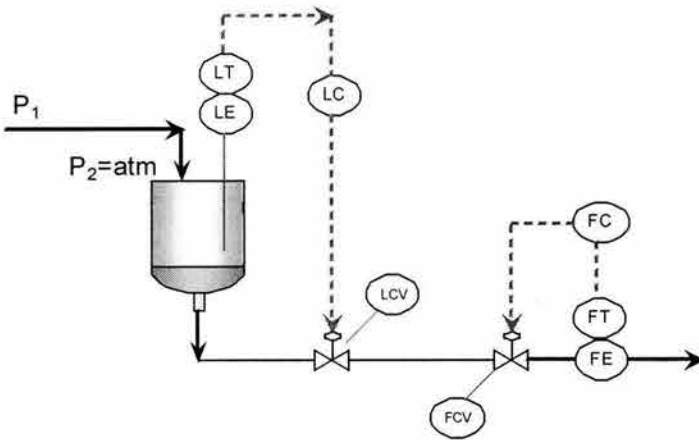


Figura 6.5. Conflicto entre controles de flujo y nivel.

La instalación de la válvula de flujo en el la línea de entrada al tanque como se muestra en la figura 6.6 proporciona una operación razonable. La válvula de nivel actuará en consecuencia a los cambios del control de flujo. Por ejemplo, si el operador cambia el punto de ajuste sobre el flujo, disminuyéndolo en un 10 %, el control de nivel rápidamente detectará esto y también reducirá 10 % para mantener el nivel.

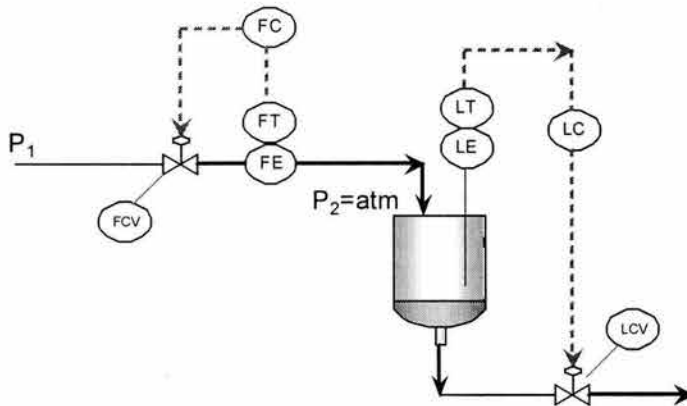


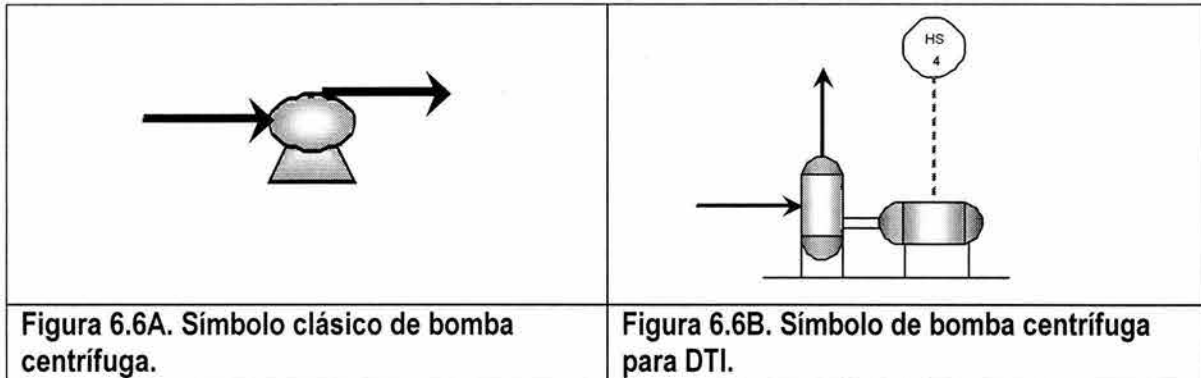
Figura 6.6. Armonía entre controles de flujo y nivel

Esta descripción nos muestra como el DTI constituye una gran ayuda en la comprensión que acompaña al proceso de diseño.

Simbología utilizada en los diagramas de tuberías e instrumentación.

Los símbolos utilizados para equipo de proceso en un diagrama de tuberías e instrumentación son por lo general más elaborados que los símbolos usados en un diagrama de flujo de proceso. Esto es con la finalidad de que una mayor cantidad de características se muestren en el dibujo.

Una bomba centrífuga constituye un magnífico ejemplo de esto. La figura 6.6A muestra el símbolo que comúnmente se utiliza para representar una bomba centrífuga. Este símbolo clásico es probablemente uno de los más reconocidos en el mundo de la ingeniería, ya que se distingue fácilmente de otros símbolos; sin embargo no muestra partes y piezas asociadas a la bomba misma. El motor es una de estas partes, e incluso en años anteriores era por lo regular omitido. La presencia de este únicamente se asumía. Los instrumentos y los sellos de las purgas parecían conectarse a la cubierta de la bomba.



El nuevo símbolo corrige esas deficiencias (figura 6.6B). En un DTI el nuevo símbolo ha reemplazado poco a poco el símbolo clásico de una bomba. De hecho, para fines de un DFP, el símbolo clásico es más que suficiente.

Muchos de los símbolos en un DTI tienden a ser elaborados para situaciones particulares; así, en caso de requerirse una bomba centrífuga vertical del tipo sumergible, se haría como lo muestra la figura 6.7:

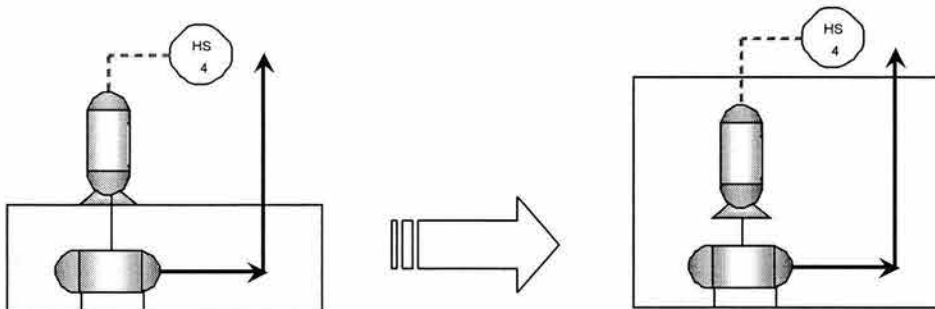


Figura 6.7. Desarrollo de un símbolo para una bomba tipo sumergible.

De manera general, un símbolo puede componerse partiendo de las 4 formas geométricas siguientes:

- Líneas
- Círculos o arcos circulares
- Elipses o arcos elípticos
- Polígonos de menos de 7 lados

Algunas convenciones hechas al respecto resultan de gran utilidad y son extensamente empleadas. La convención en la cual se asume que la representación de la gravedad (un fluido trasvasado a un recipiente por gravedad) va hacia abajo es un ejemplo. Otra convención popular es que la mayoría de las líneas de flujo se mueven de izquierda a derecha. Estas convenciones pueden estar sujetas a excepciones dependientes de los requerimientos del dibujo.

La convención más comúnmente usada para simbología de instrumentos es la contenida en el estándar de la "Instrument Society of America (ISA)" (tabla 6.4).



Para el caso de tubería, se deberá dibujar toda incluyendo la de gas natural y agua potable en caso de que estas tengan conexión con el proceso. Las reducciones de tuberías también se deben considerar y colocar en la posición correcta, a lo largo del sentido del flujo. Algunas de las convenciones más útiles y que deben tenerse presentes en la elaboración de un DTI son las siguientes:

- Casi siempre las líneas de tuberías e instrumentos deberán ponerse horizontales o verticales.
- Los cortes de línea para evitar el cruce de líneas entre horizontales y verticales se hacen en las líneas verticales.
- Los números de los equipos deberán ponerse cerca de la esquina superior derecha de cada equipo.

A manera de resumen, los pasos para el desarrollo de un diagrama de tuberías e instrumentación son los siguientes:

1. Concepción.
2. Definición del proceso (elección del tipo de equipos y condiciones del proceso).
3. Selección del equipo que se mostrará en el DTI.
4. Selección y desarrollo de los símbolos.
5. Definir la distribución de cada uno de los símbolos.
6. Realizar el primer borrador.
7. Hacer la numeración de equipos.
8. Hacer la numeración de instrumentos.
9. Hacer la numeración de líneas.
10. Incorporar dibujos dados por proveedores.

Desarrollo del diagrama de tuberías e instrumentación.

Los diagramas de tuberías e instrumentación para el proceso de tratamiento de agua para su uso en una planta química o refinería típica se presentan en los planos identificados como DTI-01, DTI-02, DTI-03 y DTI-04. En el primer plano se plasma lo correspondiente al acceso de agua cruda y al pretratamiento de clarifloculación y desinfección que se le da a esta, además del tratamiento propuesto para lodos que se purgan en el clarifloculador. En el DTI-02 se tiene el proceso de filtración del agua una vez que ha sido clarificada y clorada, además de la repartición de esta agua a los usuarios tales como sistema de red contra incendio, área de enfriamiento, área de generación de vapor y agua para uso doméstico. En el DTI-03 se considera el sistema correspondiente al agua de enfriamiento junto con el tratamiento de grasas y aceites que se generan en el complejo. Finalmente se presenta en el DTI-04 lo correspondiente al proceso de desmineralización del agua antes de su acceso al área de calderas.

Es importante para la comprensión correcta de estos planos, tener presente cada uno de los conceptos que se desarrollaron en los capítulos 2 y 3, además de las consideraciones hechas para cada caso particular del proceso. También es fundamental el conocimiento de la simbología usada en la construcción de los DTI's. Las tablas 6.3 a 6.9 contienen dicha lista de símbolos.

En la tabla 6.4 se presenta una relación de las letras utilizadas para la identificación de instrumentos y, de acuerdo con la ISA (Instrument Society of America), su interpretación es como sigue:

La primera columna contiene las variables principales a medir, tales como análisis representado por la letra A, voltaje expresado por la E, flujo por la F, nivel por la L y otra serie de letras cuya relación con una variable determinada se deja a elección del usuario (C, D, G, M, N, O). La posición de la letra siempre se presenta al inicio de izquierda a derecha. Para las letras subsecuentes se tiene que la primera columna corresponde a una función pasiva o "anunciador", la segunda columna a una función de salida y la última vendría ser la modificación a la variable. También se tiene que cualquier primera letra usada en combinación con modificaciones a la variable, se deberá entender como una variable nueva e independiente a medir.



Así por ejemplo, en el instrumento identificado como LS, la tabla 6.4 nos muestra que la "L" utilizada como primera letra adquiere el significado de "nivel", mientras que para las letras subsecuentes la "S" se relaciona en la columna de función de salida con "interruptor", de modo tal que entonces el LS es lo correspondiente a un interruptor de nivel. Si a la función de salida (esto es, al interruptor) se le agrega una modificación tal como una "L" que representa de acuerdo a la tercera columna de letras subsecuentes "bajo", el instrumento será entonces un interruptor por bajo nivel, LSL (ver tabla 6.3).

Para el instrumento identificado como PI, la tabla 6.4 nos muestra que la "P" utilizada como primera letra adquiere el significado de "presión", mientras que para las letras subsecuentes la "I" se relaciona en la columna de función pasiva con "indicación" o "indicador", de modo tal que entonces el PI es lo correspondiente a un indicador de presión o manómetro. Si a la variable principal (esto es, la presión) se le agrega una modificación tal como una "D" que representa de acuerdo a la segunda columna de primeras letras "diferencial", el instrumento será entonces un indicador de presión diferencial o PDI (ver tabla 6.3).

| | |
|--|--|
| | <p>Variable Medida: Nivel. Función: Interruptor de baja. Número: 1.</p> |
| | <p>Variable Medida: Presión diferencial. Función: Indicación. Número: 1.</p> |

Tabla 6.3. Combinación de letras para identificación de instrumentos.



Table 1 — Identification Letters

| | FIRST-LETTER (4) | | SUCCEEDING-LETTERS (3) | | |
|---|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|------------------------------|
| | MEASURED OR INITIATING VARIABLE | MODIFIER | READOUT OR PASSIVE FUNCTION | OUTPUT FUNCTION | MODIFIER |
| A | Analysis (5, 19) | | Alarm | | |
| B | Burner, Combustion | | User's Choice (1) | User's Choice (1) | User's Choice (1) |
| C | User's Choice (1) | | | Control (13) | |
| D | User's Choice (1) | Differential (4) | | | |
| E | Voltage | | Sensor (Primary Element) | | |
| F | Flow Rate | Ratio (Fraction) (4) | | | |
| G | User's Choice (1) | | Glass, Viewing Device (9) | | |
| H | Hand | | | | High (7, 15, 16) |
| I | Current (Electrical) | | Indicate (10) | | |
| J | Power | Scan (7) | | | |
| K | Time, Time Schedule | Time Rate of Change (4, 21) | | Control Station (22) | |
| L | Level | | Light (11) | | Low (7, 15, 16) |
| M | User's Choice (1) | Momentary (4) | | | Middle, Intermediate (7, 15) |
| N | User's Choice (1) | | User's Choice (1) | User's Choice (1) | User's Choice (1) |
| O | User's Choice (1) | | Orifice, Restriction | | |
| P | Pressure, Vacuum | | Point (Test) Connection | | |
| Q | Quantity | Integrate, Totalize (4) | | | |
| R | Radiation | | Record (17) | | |
| S | Speed, Frequency | Safety (8) | | Switch (13) | |
| T | Temperature | | | Transmit (18) | |
| U | Multivariable (6) | | Multifunction (12) | Multifunction (12) | Multifunction (12) |
| V | Vibration, Mechanical Analysis (19) | | | Valve, Damper, Louver (13) | |
| W | Weight, Force | | Well | | |
| X | Unclassified (2) | X Axis | Unclassified (2) | Unclassified (2) | Unclassified (2) |
| Y | Event, State or Presence (20) | Y Axis | | Relay, Compute, Convert (13, 14, 18) | |
| Z | Position, Dimension | Z Axis | | Driver, Actuator, Unclassified Final Control Element | |

Tabla 6.4. Letras para la identificación de instrumentos.



La siguiente tabla cuya nomenclatura se basa en las reglas citadas anteriormente, presenta una relación de los instrumentos utilizados en la construcción de los 4 DTI's del tratamiento de agua para su uso en una planta química o refinería típica.

| Letras del Instrumento | Significado |
|-------------------------------|---|
| AAH | Alarma por alto análisis |
| AC | Controlador de análisis |
| AIT | Indicador-Transmisor de análisis |
| AE | Sensor (elemento primario) de Análisis |
| ASH | Interruptor de alto análisis |
| CIT | Indicador-Transmisor de conductividad |
| FE | Sensor (elemento primario) de flujo |
| FC | Controlador de flujo |
| FI | Indicador de flujo |
| FIC | Indicador-Controlador de flujo |
| FIT | Indicador-Transmisor de flujo |
| FQI | Indicador-Totalizador de flujo |
| FT | Transmisor de flujo |
| FV | Válvula de flujo |
| FZ | Posicionador de flujo |
| LCV | Válvula de control de nivel |
| LG | Mirilla o vidrio de nivel |
| LI | Indicador de nivel |
| LSH | Interruptor de alto nivel |
| LSL | Interruptor de bajo nivel |
| PCV | Válvula controladora de presión |
| PDCV | Válvula controladora de presión diferencial |
| PDSH | Interruptor de presión diferencial alta |
| PI | Indicador de presión |
| PSH | Interruptor de alta presión |
| PSL | Interruptor de baja presión |
| PSV | Válvula de alivio de presión |
| TE | Sensor (elemento primario) de temperatura |
| TI | Indicador de temperatura |
| TSH | Interruptor de alta temperatura |
| WSH | Interruptor por alto par o torque |
| XV | Válvula automática ON/OFF |
| XY | Válvula solenoide |
| ZSC | Interruptor de posición cerrado |
| ZSO | Interruptor de posición abierto |

Tabla 6.5. Instrumentación requerida en los DTI's 01, 02, 03 y 04.



Algunos otros símbolos de instrumentación útiles para la interpretación de DTI's son los siguientes:

| INSTRUMENTOS DISCRETOS | PANTALLA Y CONTROLES (DCS) | PLC | DESCRIPCIÓN |
|------------------------|----------------------------|-----|--|
| | | | Montado en campo. Accesible al operador |
| | | | Localizado en cuarto de control principal o central, montado en el panel principal y visible en pantalla. Accesible al operador |
| | | | Localizado en cuarto de control principal o central, montado detrás del panel y no visible en pantalla. Inaccesible al operador |
| | | | Localizado en cuarto de control secundario o local, montado en panel de campo o local y visible en pantalla. Accesible al operador |
| | | | Localizado en cuarto de control secundario o local, montado detrás del panel de campo o local y no visible en pantalla. Inaccesible al operador |

Tabla 6.6. Simbología de instrumentación.

| Nombre | Símbolo |
|---|---------|
| ACTUADOR DE VÁLVULA OPERACIÓN MANUAL | |
| ACTUADOR DE VÁLVULA CILINDRO/PISTÓN | |
| ACTUADOR DE VÁLVULA OPERADOR NEUMÁTICO | |
| ELEMENTO PRIMARIO DE MEDICIÓN DE FLUJO TIPO MAGNÉTICO | |
| ELEMENTO PRIMARIO DE MEDICIÓN DE FLUJO TIPO PLACA DE ORIFICIO | |



| | |
|---|--|
| ELEMENTO PRIMARIO DE MEDICIÓN DE FLUJO TIPO TURBINA O PROPELA | |
| INTERLOCK LÓGICO INDEFINIDO | |
| SEÑAL ELÉCTRICA | |
| SEÑAL NEUMÁTICA | |
| SELLO QUÍMICO DE DIAFRAGMA | |
| TRASDUCTOR DE SEÑAL ELÉCTRICA A NEUMÁTICA | |
| VÁLVULA DE SEGURIDAD DE ALIVIO DE PRESIÓN | |

Tabla 6.7. Simbología miscelánea.

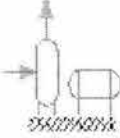
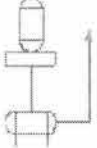

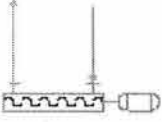
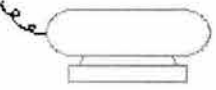
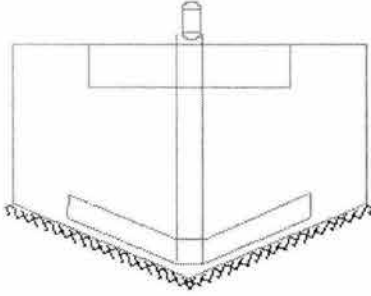
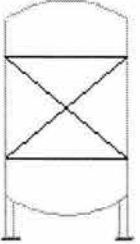
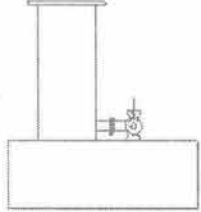
Una vez identificada la nomenclatura correspondiente a los instrumentos para la medición de las variables, es fundamental conocer los símbolos propios de los equipos, válvulas, elementos primarios y algunos otros dispositivos usados en los diagramas.

Es práctica común que junto al paquete de planos que se entregan para un proyecto específico, se anexen uno o varios planos con la simbología utilizada (Ver notas 1 y 2 de los DTI's 01, 02, 03 y 04), y cuyo contenido presenta entre otras cosas nomenclaturas de instrumentos, simbología de equipos y simbología de líneas y válvulas.

En la siguiente tabla se exponen los símbolos de los equipos que conforman el proceso del tratamiento de agua plasmado en los diagramas de tuberías e instrumentación DTI-01, DTI-02, DTI-03 y DTI-04.

| Equipo | Símbolo |
|----------|---------|
| AGITADOR | |



| | |
|--|---|
| BOMBA CENTRÍFUGA HORIZONTAL |  |
| BOMBA CENTRÍFUGA VERTICAL |  |
| BOMBA DOSIFICADORA |  |
| BOMBA DE CAVIDAD PROGRESIVA |  |
| CILINDRO CONTENEDOR DE GAS CLORO |  |
| CLARIFLOCULADOR |  |
| COLUMNA DE ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO |  |
| DESGASIFICADOR |  |



| | |
|---|--|
| EQUIPO DE DOSIFICACIÓN DE CLORO | |
| EYECTOR | |
| FILTRO DE ARENA A PRESIÓN | |
| FILTRO PRENSA | |
| FOSA DE CAPTACIÓN | |
| RECIPIENTE DE ALMACENAMIENTO DE QUÍMICOS | |
| SEPARADOR DE GRASAS Y ACEITES | |
| TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE ÁCIDO SULFÚRICO Y SOSA CÁUSTICA | |
| TANQUE ATMOSFÉRICO DE ALMACENAMIENTO DE AGUA | |



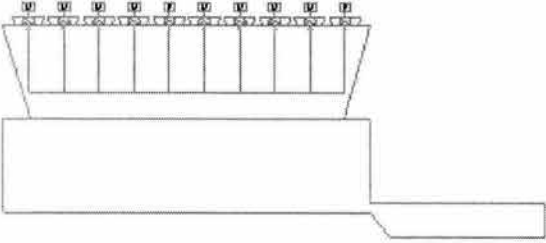
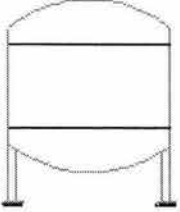

| | |
|------------------------------|--|
| <p>TORRE DE ENFRIAMIENTO</p> |  |
| <p>UNIDAD ANIÓNICA</p> |  |
| <p>UNIDAD CATIONICA</p> |  |

Tabla 6.8. Simbología de equipo para los DTI's 01, 02, 03 y 04.

Finalmente se ha extraído la siguiente tabla del estándar de simbología e identificación de instrumentos de la ISA (Instrument Society of America) para lo concerniente a tipos de válvulas.












| | | | |
|--|---|---|--|
| <p>1</p>  <p>GENERAL SYMBOL</p> | <p>2</p>  <p>ANGLE</p> | <p>3</p>  <p>BUTTERFLY</p> | <p>4</p>  <p>ROTARY VALVE</p> |
| <p>5</p>  <p>THREE-WAY</p> | <p>6</p>  <p>FOUR-WAY</p> | <p>7</p>  <p>GLOBE</p> | <p>8</p> |
| <p>9</p>  <p>DIAPHRAGM</p> | <p>10</p>  <p>11</p>  <p>12</p>  <p>DAMPER OR LOUVER</p> | | |

Tabla 6.9. Simbología de válvulas.



La interpretación de los diagramas de tuberías e instrumentación o DTI's es como sigue:

DTI-01

El agua cruda demandada por el complejo se toma de un canal, al cual se le ha llamado bocatoma, mediante las bombas BA-01 y BA-01A; estas son de tipo vertical y succionan directamente de la bocatoma para alimentar al clarifloculador con líneas de 10 pulgadas calculadas de acuerdo al flujo de 1000 GPM (5450 m³/d). Cada una de estas bombas cuenta con su manómetro a la descarga (PI-01 y PI-02 respectivamente), válvula de bloqueo y válvula tipo check para garantizar columna de agua en la línea. Justo antes del acceso al clarifloculador se lleva a cabo la desinfección para evitar el desarrollo de algas y proliferación biológica en este y en el tanque de almacenamiento de agua clarificada; para ello se cuenta con un sistema de dosificación de cloro gas almacenado en cilindros presurizados CCL-01 y CCL-01A con manómetros (PI-12 y PI-13 respectivamente) integrados. La dosificación de cloro como se ha comentado anteriormente, está en función del flujo o caudal a tratar y de la cantidad de cloro residual requerida en el clarifloculador y en la salida del tanque de almacenamiento de agua clarificada; es por esta razón por la cual se tienen medidores de flujo y de análisis en la línea de agua cruda. Ahora bien, el equipo para la dosificación de cloro consta de los cilindros antes mencionados, un gabinete de cloración identificado como CL-01 y un eyector EY-01 para el mezclado del cloro gas con agua de ayuda. El cloro gas es alimentado de los cilindros hacia el clorador CL-01 mediante líneas de 1 pulgada. En cada una de las líneas se tienen instaladas válvulas autorreguladoras de presión (PCV-01 para el CCL-01 y PCV-02 para el CCL-01A), calibradas para controlar una presión predeterminada del gas cloro antes de su entrada al gabinete de cloración. En estas líneas también se han colocado interruptores para la detección de baja presión (PSL-03 y PSL-04), de forma que al agotarse el gas en un cilindro, el PSL detecte el vacío y mande una señal a la válvula de control FV-02 (que es una válvula de tres vías) para que esta mediante cambiar su puerto, haga el cambio automáticamente a la línea del cilindro lleno. La acción de los 2 PSL's se enlaza a la válvula de control vía un interlock lógico que es el que controla o bien la señal del PSL-03 o la del PSL-04 para avocarla hacia la FV-02. El gabinete de cloración CL-01 consta de un manómetro PI-14, un rotámetro FI-03 en el cual se lee la cantidad de cloro gas que entra, una válvula controladora de presión diferencial PDCV-01 la cual ajusta el delta P (presión de entrada menos presión de salida en el clorador) a un valor predeterminado, una válvula de flujo FV-03 y un control de flujo identificado como FC-03. La inyección de cloro se hace mediante la línea 1"-CL-103-CPVC⁸ que se interconecta a la línea de agua cruda 10"-ACR-101-AcC proveniente de las bombas BA-01 y BA-01A. En esta última línea se tiene un sensor de cloro AE^{Cl₂}-01 que detecta las partes por millón de cloro libre residual y un transmisor (que también cuenta con indicación de la lectura) AIT^{Cl₂}-01 que envía señales eléctricas al control de flujo de gas cloro FC-03 instalado en el gabinete CL-01. También se halla en esta línea un medidor de flujo del tipo turbina FE-01, además de un totalizador FQI-01 que va registrando el flujo total de agua cruda y un transmisor FT-01 que envía la señal eléctrica correspondiente al flujo de agua cruda que pasa por la línea a cada instante dado. De esta manera es como, dependiendo del valor de agua en GPM o m³/d que mande el FT-01 al control FC-03 y de la concentración en ppm de cloro libre residual que haga llegar el AIT^{Cl₂}-01 a este mismo control, la válvula FV-03 abrirá para ajustar la cantidad de cloro a la salida que le indique el control. La función del eyector EY-01 en esta parte del proceso de cloración consiste en diluir el cloro gas que sale del CL-01, para lo cual se capta una pequeña cantidad de agua denominada "agua de ayuda" que es succionada por el EY-01 de la línea de agua cruda mediante la línea 1"-ACR-105-AcC.

A esta tubería de agua cruda numerada como 10"-ACR-101-AcC también se interconecta la 4"-ART-113-AcC proveniente de la fosa o cárcamo de captación FC-01. Esta última línea transporta el agua recuperada de los enjuagues y retrolavados de los filtros de arena a presión y las columnas de adsorción de carbón activado, además del agua recuperada en la deshidratación de lodos del clarifloculador (esta contribución se debe tener en cuenta para el cálculo de cloro libre residual mantenido en la línea, ya que de lo contrario, la desinfección resultará deficiente).

⁸ PVC resistente a la luz ultravioleta



Se ha colocado una válvula para controlar el flujo de entrada de agua cruda al clarifloculador, pues, como se ha dicho anteriormente, el flux volumétrico es una variable que se debe controlar para que el clarifloculador se mantenga siempre a un nivel de llenado que permita una adecuada operación de remoción de lodos y de producción de agua clarificada. Así, el transmisor FT-01 manda a cada instante la señal del flujo que está pasando por la línea al control FIC-01 para que este, mediante un transductor de I a P (dispositivo que transforma la señal eléctrica de 4 a 20 mA en señal neumática), ejerza la acción de mantener a un tanto por ciento de abertura a la FV-01 y con esto se controle el flujo de entrada deseado al clarifloculador.

La dosificación de coagulante y floculante se hace en el interior del reactor clarifloculador, y para esto se cuenta con sistemas independientes, siendo el TD-01 el recipiente en donde se almacena el coagulante (sulfato de aluminio), y BD-01 la bomba con la cual se realiza la dosificación. Debido a que la presentación de sulfato de aluminio es en sacos de 50 Kg. generalmente, en el complejo se tiene que hacer la mezcla, razón por la cual se tiene un agitador magnético AG-01 para el mezclado de agua ⁹ con el compuesto químico. El polielectrolito (floculante) se dosifica de la misma forma y se cuenta para esta acción con el recipiente de almacenamiento TD-02, el agitador AG-02 y la bomba dosificadora BD-02.

En el clarifloculador se ha instalado un sensor para la medición y control de turbidez presente, un interruptor por alto nivel LSH-01 y se tiene acoplado al motor de las rastras un interruptor por alto torque o par WSH-01. La turbidez representa el parámetro a controlar en el reactor y, por tal motivo el AET^{TUR}-02 tiene por misión detectar los valores a cada instante de esta variable; a su vez, el transmisor AIT^{TUR}-02 (que también cuenta con indicación) manda estos valores al control AC-02 para que este, de acuerdo al set point establecido, gobierne sobre los variadores de frecuencia (FZ-01 y FZ-02) de las bombas dosificadoras BD-01 y BD-02 y estos mediante pulsos manden la dosificación de químicos requerida. Es importante que el sensor se coloque justo a la salida del agua clarificada y no más abajo, para que no se tengan mediciones erróneas de turbidez que repercutan en consumos altos de químicos y en bajas eficiencias de remoción.

El interruptor de alto nivel LSH-01 es encargado de accionar la válvula de purga de lodos XV-101. Esta es una válvula automática ON/OFF que se abre para purgar sólo cuando recibe una señal de 4 a 20 mA del LSH-01. Cuando se presenta la condición de alto nivel (set point predeterminado) el LSH-01 genera dicha señal.

Finalmente, el sistema tiene acoplada una protección en las rastras de forma tal que cuando el set point establecido para las revoluciones por minuto es sobrepasado, el interruptor WSH-01 para en automático el motor.

La purga del clarifloculador es dirigida a un sistema de tratamiento conocido como deshidratación de lodos. La fosa de captación FC-02 funciona como receptor, tanto de lodos como de polielectrolito que se adiciona como agente floculante para aumentar la eficiencia en el proceso. En la fosa FC-02 se cuenta con el agitador AG-03 que lleva a cabo el mezclado de polielectrolito con lodos y de aquí se bombean mediante las BA-08 y BA-08A al filtro prensa FP-01.

Al igual que en los sistemas de dosificación de coagulante y floculante para el clarifloculador, el sistema de dosificación de polielectrolito para lodos consiste de un recipiente TD-03 y una bomba dosificadora BD-03 (el agitador como se ha mencionado se encuentra en la fosa de captación). En estos sistemas de dosificación se cuenta con interruptores por bajo nivel para protección de las bombas; así, en el TD-01 de sulfato de aluminio se tiene el interruptor LSL-04 para protección del motor de la BD-01, en el TD-02 de polielectrolito para el clarifloculador se tiene el LSL-05 para protección de la BD-02 y en el TD-03 se ha instalado el LSL-08 para protección de la bomba BD-03 por bajo nivel en el recipiente. Las bombas dosificadoras cuentan con sus respectivos manómetros (con sello químico), sus válvulas de alivio de presión y sus variadores de frecuencia para el control vía pulsos de la dosificación.

Debido a que el proceso de tratamiento de lodos es intermitente, es decir, paulatinamente se va llenando el cárcamo, se ha instalado un interruptor por alto y por bajo nivel LSL/LSH-07; cuando el nivel de la fosa de captación llega a un valor predeterminado, el interruptor acciona la bomba BA-08 o BA-08A (según la que esté

⁹ Esta puede ser agua de un cabezal tomado de la línea de agua cruda o bien de alguna otra fuente.



operando en ese momento) para que succione y dirija el flujo de agua al filtro prensa y, una vez que se alcanza el set point para nivel bajo, este mismo interruptor manda el paro de la bomba. Estas bombas son centrífugas de cavidad progresiva y son especiales para fluidos viscosos y con densidades mayores a las del agua; de hecho, cuentan con protección por calentamientos (TSH-01 y TSH-02 respectivamente) y sobre-presiones (PSH-01 y PSH-02). Así, al detectarse condiciones de temperaturas arriba de las fijadas, el interruptor TSH-01 (o TSH-02) mandará paro de la bomba y, al detectarse condiciones de alta presión, los interruptores PSH-01 o PSH-02 (según la bomba que esté operando en ese momento) también accionarán paro.

El agua es bombeada entonces al filtro prensa y en este, debido a la consistencia de la pasta, se comprime progresivamente obteniendo una "torta" que es dirigida a desecho o disposición final, y un agua contenida en el seno del lodo. La capacidad de la deshidratación depende entonces de la presión efectiva aplicada sobre la pasta de agua y polielectrolito.

Así, el agua "escurrida" es apta para redirigirse nuevamente al proceso y por gravedad se direcciona a la fosa de captación FC-01 en donde, mediante las bombas centrífugas verticales BA-02 y BA-02A (una en operación y la otra en espera) se regresa junto con agua proveniente de enjuagues y retrolavados de filtros de arena a presión y columnas de adsorción de carbón activado al clarifloculador para un desbaste en materia de sólidos suspendidos totales. En este cárcamo de recolección se ha colocado un interruptor por baja y por alta presión LSL/LSH-06 debido a que el llenado sucede gradualmente; así, cuando se llega al valor de nivel alto predeterminado, el interruptor acciona la bomba BA-02 o BA-02A (según la que esté operando en ese momento) para que succione y dirija el flujo de agua al clarifloculador y, una vez que se alcanza el set point para nivel bajo, este mismo interruptor manda el paro para evitar que la bomba cavite y que el motor se quemé.

Estas bombas, al igual que la demás, se han equipado con su manómetro a la descarga, su válvula de bloqueo y una válvula tipo check para garantizar columna de agua. Además, se han dispuesto líneas de recirculación a los cárcamos y tanques de almacenamiento para proteger tanto las bombas como las líneas por sobre-presión, es decir, en la línea de descarga se tiene una válvula de tres vías que, al momento de detectar presiones por arriba de los valores de diseño, desfoga mediante cambiar el puerto y regresar el flujo de agua al contenedor para así normalizar la condición de presión.

Ahora bien, una vez que el agua clarificada abandona el reactor, se va almacenando en el tanque TA-01 en donde las bombas centrífugas horizontales BA-03 y BA-03A son las encargadas de alimentar a los filtros de arena a presión. La bomba BA-01 succiona del TA-01 con un tubo de acero al carbón de 10" y descarga en 8" al sistema de filtración. Para protección de estas bombas se tiene un interruptor por bajo nivel en el TA-01 de manera tal que si se presentase tal condición, el LSL-02 ordenaría el paro inmediato. También se localiza en este tanque un LSH (03) para que, en caso de existir sobre-flujo y para evitar derrames y desperdicios de agua, se accione la válvula XV-100 ubicada en la línea 10"-ACR-101-AcC (justo antes del clarifloculador) y, de ese modo cortar el suministro de agua al complejo hasta que las condiciones de flujo y nivel deseado se restablezcan. La línea 8"-ACR-104-AcC se ha dispuesto como by-pass del clarifloculador al tanque de almacenamiento TA-01, previendo posibles descansos en la operación del reactor por descompostura y/o mantenimiento.



DTI-02

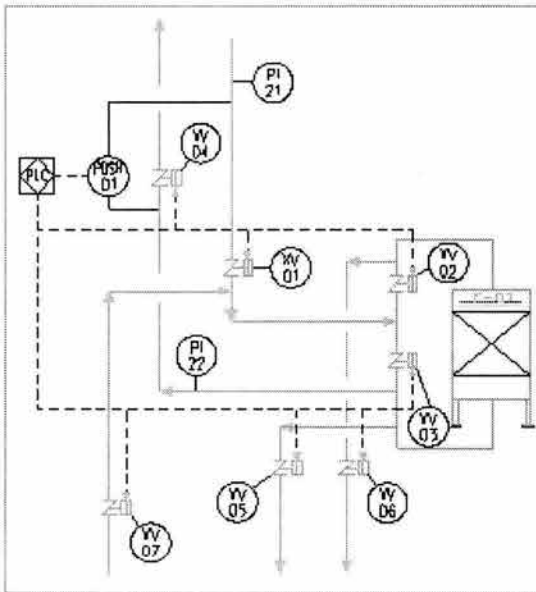
El agua clarificada proveniente de las bombas BA-03 y BA-03A alimenta al sistema de filtración constituido por 3 filtros de arena a presión ¹⁰ F-01, F-02 y F-03. El agua filtrada se almacena en el tanque TA-02 y de aquí se distribuye a los sistemas de red contra incendio, enfriamiento, desmineralización y sistema de agua para uso doméstico.

En el cabezal de distribución de agua clarificada a los filtros de arena a presión se ha colocado un sistema para control de flujo constituido por un sensor de tipo magnético para la detección del caudal FE-06, un transmisor FT-06 encargado de mandar la señal del flujo que pasa por la línea al control FIC-06 para que este, mediante un transductor de I a P (dispositivo que transforma la señal eléctrica de 4 a 20 mA en señal neumática), ejerza la acción de mantener a un tanto por ciento de abertura la válvula de flujo FV-06 y así controlar el flujo de entrada deseado a los filtros.

El control en estos equipos lo hace el PLC (Programmable Logic Control) de la siguiente manera:

En cada uno de los filtros se tienen medidores de presión en las líneas de entrada y salida de agua además de interruptores por alta presión diferencial, de modo que, una vez cumplida la condición de delta P alta (presión en la línea de salida menos presión en la línea de entrada), el interruptor de presión diferencial manda una señal eléctrica de 4 a 20 mA al PLC para que este ordene la apertura de las válvulas automáticas colocadas en las líneas correspondientes a los retrolavados y enjuagues de los filtros de arena a presión. Una vez que se han llevado a cabo tales operaciones de mantenimiento, el PLC es encargado de cerrar las válvulas y abrir a la vez las correspondientes a la operación de filtrado normal. Para los retrolavados y enjuagues de los filtros se ha dispuesto de un cabezal independiente en el cual se ha colocado un sensor de tipo magnético FE-07, un transmisor FT-07, un control FIC-07 y una válvula de flujo FV-07 para el control del flujo de entrada deseado.

Así, se tiene para el primer filtro de arena a presión F-01 lo siguiente:

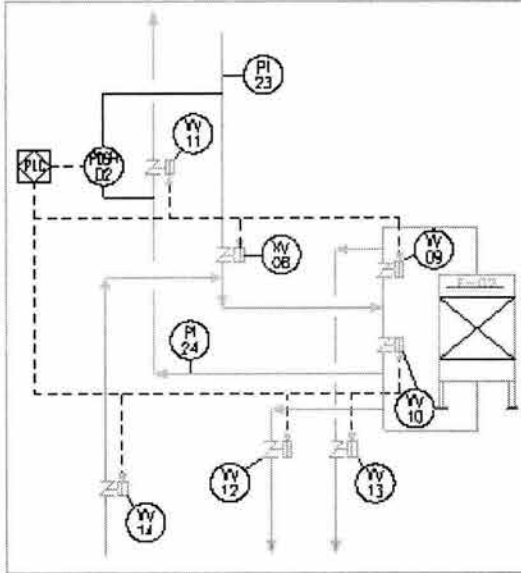


Para la operación normal del filtro, las válvulas automáticas XV-01, XV-02 y XV-04 son las que permanecen abiertas; una vez que el tiempo programado para la filtración concluye (esto es, una vez que el PDSH-01 manda una señal al PLC indicando caída de presión en el sistema debido a taponamiento en la cama de arena por sólidos suspendidos), el PLC cierra las válvulas anteriores y abre la XV-07 colocada en una línea proveniente de un cabezal independiente exclusivo para provisión de agua para enjuagues y retrolavados¹¹, la XV-03 y la XV-06 para realizar la operación de retrolavado de manera opuesta a la operación normal del filtro, esto es, con flujo a contracorriente o en dirección ascendente. El enjuague se hace cuando el PLC ordena la apertura de la XV-07, XV-02 y XV-05 con lo que se vuelve a compactar o acomodar la cama de arena para que se realice nuevamente la operación normal de filtrado de agua clarificada.

La operación del filtro de arena a presión F-02 es igual a como en el F-01:

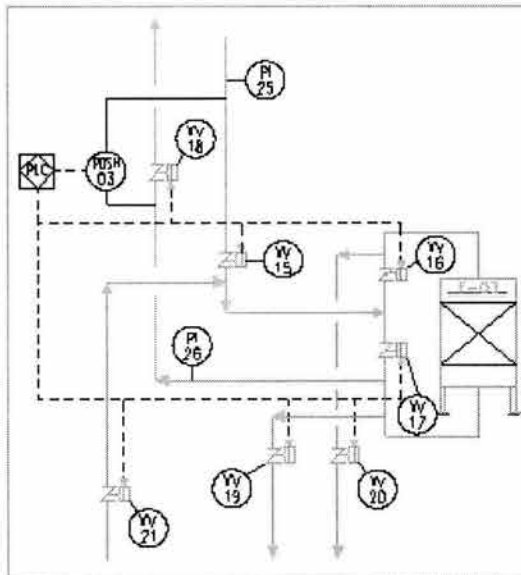
¹⁰ Valor supuesto; para una operación real, el número de filtros, capacidad y dimensiones se calculan en base a la demanda de agua al complejo entre otras cosas.

¹¹ Es importante señalar que, dependiendo de las capacidades manejadas y de las recomendaciones de literatura y proveedores, se programan los tiempos de duración para los enjuagues y retrolavados, por ejemplo utilizar 3 veces el flujo de entrada en operación normal durante 5 minutos para los enjuagues y retrolavados.



Para la operación normal del filtro, las válvulas automáticas XV-08, XV-09 y XV-11 son las que permanecen abiertas; una vez que el tiempo programado para la filtración concluye (esto es, una vez que el PDSH-02 manda una señal al PLC indicando caída de presión en el sistema debido a taponamiento en la cama de arena por sólidos suspendidos), el PLC cierra las válvulas anteriores y abre la XV-14 colocada en una línea proveniente de un cabezal independiente exclusivo para provisión de agua para enjuagues y retrolavados, la XV-10 y la XV-13 para realizar la operación de retrolavado de manera opuesta a la operación normal del filtro, esto es, con flujo a contracorriente o en dirección ascendente. El enjuague se hace cuando el PLC ordena la apertura de la XV-14, XV-09 y XV-12 con lo que se vuelve a compactar o acomodar la cama de arena para que se realice nuevamente la operación normal de filtrado de agua clarificada.

La operación del filtro de arena a presión F-03 es igual a las dos anteriores:



Para la operación normal del filtro, las válvulas automáticas XV-15, XV-16 y XV-18 son las que permanecen abiertas; una vez que el tiempo programado para la filtración concluye (esto es, una vez que el PDSH-03 manda una señal al PLC indicando caída de presión en el sistema debido a taponamiento en la cama de arena por sólidos suspendidos), el PLC cierra las válvulas anteriores y abre la XV-21 colocada en una línea proveniente de un cabezal independiente exclusivo para provisión de agua para enjuagues y retrolavados, la XV-17 y la XV-20 para realizar la operación de retrolavado de manera opuesta a la operación normal del filtro, esto es, con flujo a contracorriente o en dirección ascendente. El enjuague se hace cuando el PLC ordena la apertura de la XV-21, XV-16 y XV-19 con lo que se vuelve a compactar o acomodar la cama de arena para que se realice nuevamente la operación normal de filtrado de agua clarificada.

Así, para que el tanque de almacenamiento TA-02 reciba el agua filtrada, es conveniente la operación simultánea de los filtros de arena a presión de forma tal que mientras dos de ellos trabajan en operación normal, en el tercero se realiza el retrolavado y enjuague y, una vez que se terminan entonces entra en operación normal este tercero y uno de los dos primeros sale de operación normal y entra en retrolavado y enjuague. Con esto se establece la condición de que nunca va a haber más de un filtro de arena a presión en retrolavado-enjuague.

Del tanque TA-02 se distribuye mediante las bombas BA-04/04A agua filtrada al sistema de red contra incendio. Estas bombas succionan directamente del tanque y cuentan con manómetros en las líneas de descarga (PI-27 y PI-28), además de una línea de recirculación al tanque para proteger tanto las bombas como las líneas por sobre-presión.



También succionan del tanque las BA-05/05A para servicio al área de enfriamiento, las BA-06/06A que envían a la desmineralizadora y las BA-07/07A para el bombeo hacia el sistema para uso doméstico.

Se han colocado en el TA-02 dispositivos para evitar el derrame de líquido y para protección de todas las bombas que succionan del mismo. En el primer caso se ha dispuesto una válvula de control de nivel LCV-01. Esta válvula tiene acoplado un flotador de forma tal que cuando el nivel de líquido en el tanque alcanza un valor "alto" predeterminado y ajustado, la válvula inmediatamente cierra cortando el flujo de agua filtrada que accesa al tanque; la válvula abre cuando deja de haber contacto entre el agua y el flotador. Para protección de las bombas por bajo nivel se ha puesto un interruptor por bajo nivel identificado como LSL-11 de forma que, una vez que se alcanza el set point para nivel bajo, este interruptor manda el paro para evitar que la bomba cavite y que el motor se queme. También se ha colocado en el tanque un indicador de nivel LI-02.

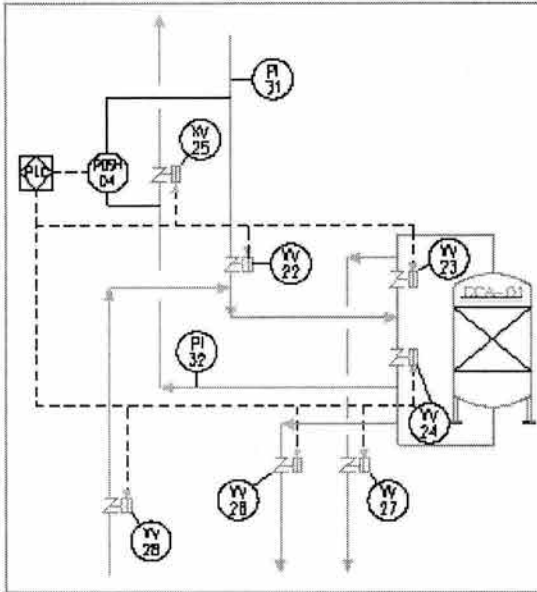
Para el bombeo de agua filtrada a uso doméstico se tienen las bombas BA-07 y BA-07A, de las cuales una es la que da el servicio regularmente y la otra permanece en espera o "stand by"; la línea de succión calculada a priori con el flujo que se maneja a uso doméstico (200 GPM) corresponde a un diámetro de 3 pulgadas y $2\frac{1}{2}$ a la descarga. Se propone la instalación de columnas de adsorción con carbón activado para eliminar materia orgánica y compuestos órgano clorados producto, como se ha mencionado, de las reacciones del cloro residual con compuestos orgánicos presentes en el agua. Se dispone de 3 columnas para este fin, la CCA-01, CCA-02 y CCA-03 ¹². En el cabezal de distribución de agua filtrada a las columnas de adsorción con carbón activado $2\frac{1}{2}$ -AF-125-AcC se ha colocado un sistema para control de flujo constituido por un sensor de tipo magnético para la detección del caudal FE-08, un transmisor FT-08 encargado de mandar la señal del flujo que pasa por la línea al control FIC-08 para que este, mediante un transductor de I a P (dispositivo que transforma la señal eléctrica de 4 a 20 mA en señal neumática), ejerza la acción de mantener a un porcentaje de abertura la válvula de flujo FV-08 y así controlar el flujo de agua de entrada deseado a las columnas de adsorción con carbón activado. Se tiene también un cabezal independiente proveniente de las bombas BA-07/07A exclusivo para los retrolavados y enjuagues identificado como $2\frac{1}{2}$ -AF-128-AcC. En este también se ha dispuesto, debido a la necesidad del control de flujo y, por consiguiente de la presión, de un sensor de tipo magnético para la detección del caudal FE-09, un transmisor FT-09 encargado de mandar la señal del flujo que pasa por la línea al control FIC-09 para que este, mediante un transductor de I a P (dispositivo que transforma la señal eléctrica de 4 a 20 mA en señal neumática), ejerza la acción de mantener a un porcentaje de abertura la válvula de flujo FV-09 y así controlar el flujo de agua necesario para el retrolavado o enjuague de las columnas de adsorción con carbón activado.

El control en estos equipos lo hace el PLC (Programable Logic Control) de la siguiente manera:

En cada una de las columnas se tienen medidores de presión en las líneas de entrada y salida de agua además de interruptores por alta presión diferencial, de modo que, una vez cumplida la condición de delta P alta (presión en la línea de salida menos presión en la línea de entrada), el interruptor de presión diferencial manda una señal eléctrica de 4 a 20 mA al PLC para que este ordene la apertura de las válvulas automáticas colocadas en las líneas correspondientes a los retrolavados y enjuagues de las columnas. Una vez que se han llevado a cabo tales operaciones de mantenimiento, el PLC es encargado de cerrar las válvulas y abrir a la vez las correspondientes a la operación de filtrado normal.

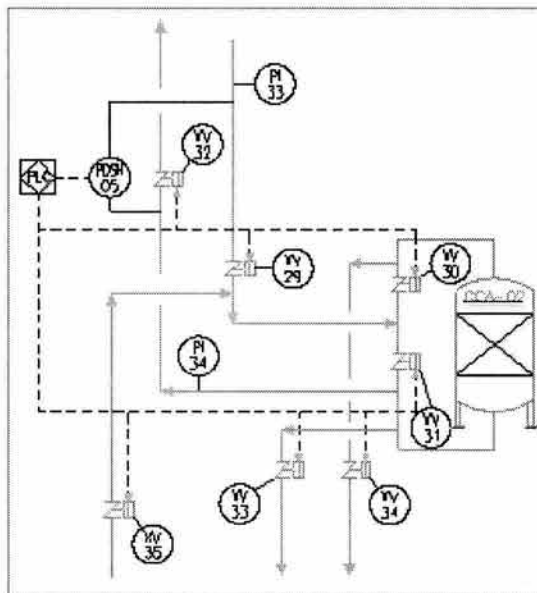
Así, se tiene para la primera columna de adsorción con carbón activado CCA-01 lo siguiente:

¹² Valor supuesto; para una operación real, el número de columnas de adsorción con carbón activado, capacidad y dimensiones se calculan entre otras cosas con la demanda de agua al complejo.

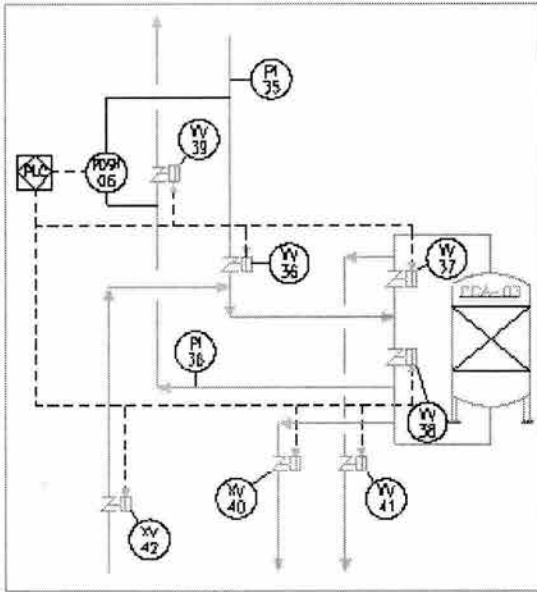


Para la operación normal de la columna, las válvulas automáticas XV-22, XV-23 y XV-25 son las que permanecen abiertas; una vez que el tiempo programado para la filtración concluye (esto es, una vez que el PDSH-04 manda una señal al PLC indicando caída de presión en el sistema debido a taponamiento en la cama de carbón), el PLC cierra las válvulas anteriores y abre la XV-28 colocada en una línea proveniente de un cabezal exclusivo para provisión de agua para enjuagues y retrolavados, la XV-24 y la XV-27 para realizar la operación de retrolavado de manera opuesta a la operación normal de filtrado, esto es, con flujo a contracorriente o en dirección ascendente. El enjuague se hace cuando el PLC ordena la apertura de la XV-28, XV-23 y XV-26, con lo que se vuelve a compactar o acomodar la cama de carbón para que se realice nuevamente la operación normal de filtrado.

La operación de las columnas de adsorción con carbón activado CCA-02 y CCA-03 es como en la anterior:



Para la operación normal de la columna, las válvulas automáticas XV-29, XV-30 y XV-32 son las que permanecen abiertas; una vez que el tiempo programado para la filtración concluye (esto es, una vez que el PDSH-05 manda una señal al PLC indicando caída de presión en el sistema debido a taponamiento en la cama de carbón), el PLC cierra las válvulas anteriores y abre la XV-35 colocada en una línea proveniente de un cabezal exclusivo para provisión de agua para enjuagues y retrolavados, la XV-31 y la XV-34 para realizar la operación de retrolavado de manera opuesta a la operación normal de filtrado, esto es, con flujo a contracorriente o en dirección ascendente. El enjuague se hace cuando el PLC ordena la apertura de la XV-35, XV-30 y XV-33 con lo que se vuelve a compactar o acomodar la cama de carbón para que se realice nuevamente la operación normal de filtrado con carbón activado.



Para la operación normal de la columna, las válvulas automáticas XV-36, XV-37 y XV-39 son las que permanecen abiertas; una vez que el tiempo programado para la filtración concluye (esto es, una vez que el PDSH-06 manda una señal al PLC indicando caída de presión en el sistema debido a taponamiento en la cama de carbón), el PLC cierra las válvulas anteriores y abre la XV-42 colocada en una línea proveniente de un cabezal exclusivo para provisión de agua de retrolavados y enjuagues, la XV-38 y la XV-41 para realizar la operación de retrolavado de manera opuesta a la operación normal de filtrado, esto es, con flujo a contracorriente o en dirección ascendente. El enjuague se hace cuando el PLC ordena la apertura de la XV-42, XV-37 y XV-40 con lo que se vuelve a compactar o acomodar la cama de carbón para que se realice nuevamente la operación normal de filtrado con carbón activado.

Una vez que el agua sale del tren de columnas de adsorción con carbón activado, se propone una desinfección con cloro para eliminación de organismos bacteriológicos y así obtener un agua con calidad de potable, es decir para uso humano (lavabos, inodoros, etc.). Esta cloración es de la siguiente manera:

El cloro gas se almacena en cilindros presurizados CCL-02 y CCL-02A con manómetros (PI-37 y PI-38 respectivamente) integrados. La dosificación de cloro como se ha comentado anteriormente, esta en función del flujo o caudal a tratar y de la cantidad de cloro residual recomendada; es por esta razón por la cual se tienen medidores de flujo y de análisis en la línea de agua filtrada con carbón activado. Ahora bien, el equipo para la dosificación de cloro consta de los cilindros antes mencionados, un gabinete de cloración identificado como CL-02 y un eyector EY-02 para el mezclado del cloro gas con agua de ayuda. El cloro gas es alimentado de los cilindros hacia el clorador CL-02 mediante líneas de 1 pulgada. En cada una de las líneas se tienen instaladas válvulas autorreguladoras de presión (PCV-03 para el CCL-02 y PCV-04 para el CCL-02A), calibradas para controlar una presión predeterminada del gas cloro antes de su entrada al gabinete de cloración. En estas líneas también se han colocado interruptores para la detección de baja presión (PSL-05 y PSL-06), de forma que al agotarse el gas en un cilindro, el PSL detecte el vacío y mande una señal a la válvula de control FV-11 (que es una válvula de tres vías) para que esta mediante cambiar su puerto, haga el cambio automáticamente a la línea del cilindro lleno. La acción de los 2 PSL's se enlaza a la válvula de control vía un interlock lógico que es el que controla o bien la señal del PSL-05 o la del PSL-06 para avocarla hacia la FV-11. El gabinete de cloración CL-02 consta de un manómetro PI-39, un rotámetro FI-12 en el cual se lee la cantidad de cloro gas que entra, una válvula controladora de presión diferencial PDCV-02 la cual ajusta el delta P (presión de entrada menos presión de salida en el clorador) a un valor predeterminado, una válvula de flujo FV-12 y un control de flujo identificado como FC-12. La inyección de cloro se hace mediante la línea 1"-CL-106-CPVC

que se interconecta a la línea de agua filtrada con carbón activado 3"-AFC-101-AcC proveniente de las columnas CCA-01, CCA-02 y CCA-03. En esta última línea se tiene un sensor de cloro AE^{Cl_2-06} que detecta las partes por millón de cloro libre residual y un transmisor (que también cuenta con indicación de la lectura) AIT^{Cl_2-06} que envía señales eléctricas al control de flujo de gas cloro FC-12 instalado en el gabinete CL-02. También se halla en esta línea un medidor de flujo del tipo turbina FE-10, además de un totalizador FQI-10 que va registrando el flujo total de agua potable y un indicador-transmisor FIT-10 que envía la señal eléctrica correspondiente al flujo de agua filtrada que pasa por la línea a cada instante dado. De esta manera es como, dependiendo del valor de agua en GPM o m^3/d que mande el FIT-10 al control FC-12 y de la concentración en ppm de cloro libre residual



que haga llegar el AIT_{Cl₂}-06 a este mismo control, la válvula FV-12 abrirá para ajustar la cantidad de cloro a la salida que le indique el control.

Al igual que el sistema instalado para la dosificación de cloro al agua cruda, este cuenta con un detector de fugas de gas cloro, de manera que siempre se esté monitoreando del ambiente posibles escapes de gas, misión encomendada al sensor AE-07. En caso de detectarse fugas, el indicador-transmisor AIT-07 mandará la señal a un interruptor ASH-07 que accionará una alarma visual-sonora AAH-07.

DTI-03

Una parte muy importante en el proceso de una planta química que utiliza agua como servicio auxiliar es el adecuado funcionamiento de los sistemas de enfriamiento. En estos se precisa de control en la calidad del agua para evitar daños en los equipos de intercambio de calor y, en general, en las unidades de proceso que conforman la planta.

El control de depósitos en el agua de enfriamiento es absolutamente esencial para el mantenimiento de las tasas de transferencia de calor. Si el agua de repuesto a las torres de enfriamiento contiene sólidos disueltos, materia orgánica y sólidos suspendidos, se contribuirá al ensuciamiento, por ello es necesaria la dosificación de agentes químicos; usualmente los que se utilizan para el control de incrustaciones también controlan el ensuciamiento, pero no todos son igualmente buenos para dispersar toda clase de depósitos. La selección del dispersante apropiado para cualquier sistema en operación se basa en el tipo y cantidad de sustancias que ocasionan la contaminación al agua, sin embargo, una vez que los depósitos se forman, cualquier acción de remoción de incrustaciones efectuada por estos dispersantes se lleva a cabo lentamente, por lo que la mejor opción es evitar la formación de incrustaciones.

Los depósitos microbianos presentan un caso especial de ensuciamiento. En el tratamiento se requiere a menudo de biocidas para matar las colonias de microbios y dispersantes. El biocida más comúnmente empleado es el cloro junto con algunos otros biocidas no oxidantes, esto debido a que el cloro no es penetrante, es decir, únicamente logra el exterminio superficial de los depósitos superficiales presentes sin penetrar la capa de lama para remover y matar los organismos que están bajo ella.

De acuerdo a lo anterior, en el DTI-03 se ha plasmado lo correspondiente a un sistema de enfriamiento típico y se tiene lo siguiente:

Se recibe agua para el repuesto de la torre de enfriamiento TE-01 proveniente de un proceso de filtrado con filtros de arena a presión F-01/02/03 y almacenada en un tanque atmosférico TA-02. Las bombas que succionan de este tanque son las BA-05/05A, mismas que descargan al bacín de la torre agua para repuesto debido a pérdidas por evaporación, arrastre y purga en la torre. La evaporación es el agua que se pierde en el proceso de transferencia de calor, mientras que el arrastre tiene que ver con el agua que se pierde por humidificación, siendo independiente de las condiciones de temperatura y solo relacionado con el flujo de agua de enfriamiento en el circuito de suministro y retorno. El control de la purga es muy importante debido a que incide en el cálculo de los ciclos de concentración en la torre. Estos se controlan por comparación de la concentración de algún parámetro del agua en la entrada (esto es, en el agua de repuesto) y la concentración de algún parámetro del agua que se purga. Así, se tiene que cuanto más bajo sea el valor de los ciclos de concentración mayor será el agua de repuesto requerida.

En la línea que abastece el agua de repuesto (6"-AF-111-AcC) se ha colocado un medidor de flujo del tipo turbina FE-16, además de un totalizador FQI-16 que va registrando el flujo total de agua potable y un indicador-transmisor FIT-16 que envía la señal eléctrica correspondiente al flujo de agua filtrada que pasa por la línea a cada instante dado. Es en esta línea en donde se propone la cloración para evitar la proliferación y crecimiento de algas y microorganismos.

El cloro gas se almacena en cilindros presurizados CCL-03 y CCL-03A con manómetros integrados (PI-60 y PI-61 respectivamente). La dosificación de cloro como se ha comentado anteriormente, esta en función del flujo o caudal a tratar y de la cantidad de cloro residual recomendada; es por esta razón por la cual se tienen medidores de flujo y de análisis en la línea de agua para el repuesto de la torre. Ahora bien, el equipo para la dosificación de cloro consta de los cilindros antes mencionados, un gabinete de cloración identificado como CL-03 y un eyector EY-03 para el mezclado del cloro gas con agua de ayuda. El cloro gas es alimentado de los cilindros



hacia el clorador CL-03 mediante líneas de 1 pulgada. En cada una de las líneas se tienen instaladas válvulas autorreguladoras de presión (PCV-05 para el CCL-03 y PCV-06 para el CCL-03A), calibradas para controlar una presión predeterminada del gas cloro antes de su entrada al gabinete de cloración. En estas líneas también se han colocado interruptores para la detección de baja presión (PSL-07 y PSL-08), de forma que al agotarse el gas en un cilindro, el PSL detecte el vacío y mande una señal a la válvula de control FV-17 (que es una válvula de tres vías) para que esta mediante cambiar su puerto haga el cambio automáticamente a la línea del cilindro lleno. La acción de los 2 PSL's se enlaza a la válvula de control vía un interlock lógico que es el que controla o bien la señal del PSL-07 o la del PSL-08 para avocarla hacia la FV-17. El gabinete de cloración CL-03 consta de un manómetro PI-62, un rotámetro FI-18 en el cual se lee la cantidad de cloro gas que entra, una válvula controladora de presión diferencial PDCV-03 la cual ajusta el delta P (presión de entrada menos presión de salida en el clorador) a un valor predeterminado, una válvula de flujo FV-18 y un control de flujo identificado como FC-18. La inyección de cloro se hace mediante la línea 1"-CL-109-CPVC que se interconecta a la línea de agua filtrada para repuesto a la torre 6"-AF-111-AcC proveniente de los filtros F-01/02/03. En esta última línea se tiene el medidor de flujo del tipo turbina FE-16, el totalizador FQI-16 y el indicador-transmisor FIT-10 mencionados anteriormente. Se ha instalado en esta área un gabinete para el control de las variables involucradas el cual cuenta, entre otras cosas con el control para la dosificación de cloro AC-11 y con un indicador-transmisor AIT_{CL₂}-11 instalado en el gabinete, que manda la señal correspondiente a las ppm de cloro libre residual al control AC-11. De esta manera es como, dependiendo del valor de agua en GPM o m³/d que mande el FIT-16 al control FC-18 y de la concentración en ppm de cloro libre residual que haga llegar el AC-11 a este mismo control, la válvula FV-18 abrirá para ajustar la cantidad de cloro a la salida que le indique el FC-18. Al igual que en los sistemas instalados para la dosificación de cloro al agua cruda y para uso doméstico, este cuenta con un detector de fugas de gas cloro, de manera que siempre se esté monitoreando del ambiente posibles escapes de gas, misión encomendada al sensor AE-12. En caso de detectarse fugas, el indicador-transmisor AIT-12 mandará la señal a un interruptor ASH-12 que accionará una alarma visual-sonora AAH-12.

Para el control de pH en el agua de repuesto a la TE-01 es práctica común la dosificación de ácido sulfúrico, para lo cual se tiene el recipiente TD-06 y la bomba dosificadora BD-06. En el tanque se ha colocado un indicador de nivel de vidrio LG-01 para vigilar directamente el nivel del químico. La bomba dosificadora cuenta con su manómetro integrado PI-55 (con sello químico), su válvula de alivio de presión PSV-06 también integrada y su variador de frecuencia FZ-06 para el control de la dosificación mediante ajuste del flujo en litros por hora o galones por minuto.

En el gabinete de control se tiene un transmisor con indicador integrado AIT^{pH}-11 cuya misión es mandar al control AC-11 los valores detectados que salen fuera del rango establecido para pH; la acción del control AC-11 es sobre el FZ-06 de la bomba, de manera que los pulsos requeridos para la cantidad de ácido sean ajustados de acuerdo a la señal del AC-11.

Como se ha comentado anteriormente, en los sistemas de enfriamiento es muy importante que la calidad del agua de repuesto no contenga sólidos disueltos, sólidos suspendidos ni proliferación biológica como puede ser lama o algas; es por esta razón por la cual se dosifican biocidas oxidantes y no oxidantes, biodispersantes, inhibidores de incrustación e inhibidores de corrosión.¹³

Para la dosificación de biocida no oxidante se cuenta con el recipiente TD-07 y la bomba dosificadora BD-07. La bomba dosificadora cuenta con su manómetro integrado PI-56 (con sello químico), su válvula de alivio de presión PSV-07 también integrada y su variador de frecuencia FZ-07 para el control de la dosificación mediante ajuste del flujo en litros por hora o galones por minuto.

Para la dosificación de biodispersante se cuenta con el recipiente TD-08 y la bomba dosificadora BD-08. La bomba dosificadora cuenta con su manómetro integrado PI-57 (con sello químico), su válvula de alivio de

¹³ La selección de cada uno de los químicos está en función de la caracterización de la corriente de agua de repuesto a la torre y de recomendaciones del proveedor.



presión PSV-08 también integrada y su variador de frecuencia FZ-08 para el control de la dosificación mediante ajuste del flujo en litros por hora o galones por minutos.

El anti-incrustante se almacena en el recipiente TD-09 y se dosifica con la bomba BD-09. La bomba dosificadora cuenta con su manómetro integrado PI-58 (con sello químico), su válvula de alivio de presión PSV-09 también integrada y su variador de frecuencia FZ-09 para el control de la dosificación mediante ajuste del flujo en litros por hora o galones por minutos.

El inhibidor de incrustación se almacena en el recipiente TD-10 y se dosifica con la bomba BD-10. La bomba dosificadora cuenta con su manómetro integrado PI-59 (con sello químico), su válvula de alivio de presión PSV-10 también integrada y su variador de frecuencia FZ-10 para el control de la dosificación mediante ajuste del flujo en litros por hora o galones por minutos.

La dosificación del biocida no oxidante, el biodispersante y el anti-incrustante se realiza en el bacín de la torre en donde se colecta el agua de repuesto, mientras que el inhibidor de corrosión se inyecta en la línea de descarga de las bombas que suministran el agua de enfriamiento a las plantas de proceso (BA-09/09A), esto de acuerdo a recomendaciones de proveedores.

En el gabinete de control se tienen transmisores para conductividad y potencial de óxido-reducción (CIT-11 y AIT^{ORP}-11 respectivamente), cuya misión es mandar al control AC-11 los valores detectados a cada instante dado. Una vez que el control AC-11 detecta valores que se salen del punto de ajuste establecido (y que obedecen a los rangos dados por el proveedor o por las prácticas operativas), acciona sobre los variadores de frecuencia de las bombas encargadas de la inyección de biodispersante, anti-incrustante e inhibidor de corrosión para que estas ajusten la cantidad de pulsos para dar un mayor o menor flujo de químico de acuerdo a los nuevos requerimientos.

El control de la purga también se ha automatizado de forma tal que, dependiendo de los ciclos de concentración programados en el AC-11 y de los valores de pH, conductividad y óxido-reducción detectados, se ejercerá la acción de cierre o apertura de la válvula automática XV-102, "sólo cuando se requiera", y el efluente será descargado a un registro cercano correspondiente a la red de drenaje pluvial.¹⁴

En el DTI-03 también se ha plasmado lo correspondiente al tratamiento de las grasas y aceites almacenadas en drenajes conocidos como aceitosos, que son rutas de tuberías subterráneas independientes de las redes de drenajes pluviales y drenajes sanitarios. Así, el efluente del drenaje aceitoso es tratado en un separador de placas corrugadas CPI-01 y, de acuerdo con las características de estos equipos, únicamente es necesario el control de flujo de entrada, ya que como se ha visto, el flux volumétrico es una variable que se debe controlar para que el separador se mantenga siempre a un nivel de llenado que permita una adecuada separación de las grasas y aceites del agua. El FE-21 es encargado de detectar la cantidad de flujo que pasa por la línea, el transmisor FT-21 manda a cada instante la señal de ese flujo al control FIC-21 para que este, mediante un transductor de I a P (dispositivo que transforma la señal eléctrica de 4 a 20 mA en señal neumática), ejerza la acción de mantener a un porcentaje de apertura a la FV-21 y con esto se controle el flujo de entrada deseado al separador CPI-01.

El aceite recuperado abandona el CPI-01 desde un compartimiento que se encuentra en la parte superior del tanque y es direccionado por gravedad hacia la fosa de captación FC-03 en donde, debido a lo intermitente que resulta el llenado, se ha instalado un interruptor por alto y por bajo nivel LSL/LSH-16; así, cuando el nivel de la fosa de captación llega a un valor predeterminado como "alto", el interruptor acciona la bomba BA-11 o BA-11A (según la que esté operando en ese momento) para que succione y dirija el aceite hacia una zona fuera del límite de batería denominada "recuperación de grasas y aceites" y, una vez que se alcanza el set point para nivel bajo, este mismo interruptor manda el paro de la bomba.

El agua recuperada se derrama en un compartimiento ubicado en la parte inferior del separador y es direccionada por gravedad hacia un tanque de almacenamiento denominado TA-03 en donde, debido a lo

¹⁴ El registro pluvial identificado en el DTI-03 como RP-20 es ficticio.



intermitente que resulta el llenado, se ha instalado un interruptor por alto y por bajo nivel LSL/LSH-17; así, cuando el nivel de la fosa de captación llega a un valor predeterminado como "alto", el interruptor acciona la bomba BA-12 o BA-12A (según la que esté operando en ese momento) para que succione y dirija el agua hacia la descarga de efluentes que puede ser un río o presa y, una vez que se alcanza el set point para nivel bajo, este mismo interruptor manda el paro de la bomba.

Finalmente, los lodos aceitosos que se generan en el separador de grasas y aceites CPI-01 son purgados por la parte inferior y dispuestos en zonas especiales, o bien recolectados por empresas exclusivas encargadas del tratamiento a estos residuos considerados como tóxicos.

DTI-04

El agua filtrada proveniente del tanque de almacenamiento TA-02 es enviada a la planta desmineralizada mediante las bombas centrífugas horizontales BA-06 y BA-06A (una en servicio y la otra en espera o "stand by"); estas cuentan con sus manómetros en las líneas de descarga (PI-81 y PI-82), además de una línea de recirculación del cabezal de descarga de ambas bombas al tanque TA-02, esto para protección tanto de las bombas como de las líneas por sobre-presión.

El agua filtrada entra directamente a las unidades catiónicas UC-01, UC-02 y UC-03, en donde se remueven todos los cationes presentes en el agua y a la salida de estas unidades se habla entonces de un agua "decatiónizada". Esta agua entra a un desgasificador con el objeto de remover CO_2 ya que, como se mencionó anteriormente (capítulo 2), al tener en operación resinas catiónicas débiles se genera ácido carbónico que debe ser removido mediante agotamiento con aire; el agua a la salida del desgasificador es identificada como agua "desgasificada" y, debido a que la presión ya no es suficiente para el proceso de eliminación de aniones en las unidades aniónicas, se tiene un sistema de bombeo del agua desgasificada constituido por las bombas BA-10 y BA-10A (una en operación y la otra en espera). En el desgasificador DG-01 se han colocado interruptores por bajo y alto nivel, LSL-18 y LSH-19 respectivamente. En el primer caso es para protección de las bombas BA-10/10A mientras que el LSH-19 es para evitar derrame en la unidad, es decir, una vez que el interruptor detecta la condición de nivel alto manda una señal de paro a las bombas BA-06/06A encargadas de abastecer agua filtrada a las unidades catiónicas y, una vez que el nivel ha descendido lo suficiente, este mismo interruptor acciona el arranque de las bombas. Las unidades aniónicas UA-01/02/03 procesan agua desmineralizada cuya calidad es apta para el área de generación de vapor.

La regeneración de las resinas de las unidades catiónicas se lleva a cabo con ácido sulfúrico y se cuenta para ello con los recipientes TD-04 y TD-04A, uno en operación y el otro en espera y las bombas dosificadoras BD-04 y BD-04A, también una en espera y la otra en operación. En los tanques se han colocado indicadores de nivel de vidrio LG-02 y LG-03 para vigilar directamente el nivel del ácido. Las bombas dosificadoras cuentan con manómetros integrados con sello químico PI-85 y PI-86, válvulas de alivio de presión PSV-16 y PSV-17 y variadores de frecuencia FZ-16 y FZ-17 para el control de la dosificación mediante ajuste del flujo en litros por hora o galones por minuto.

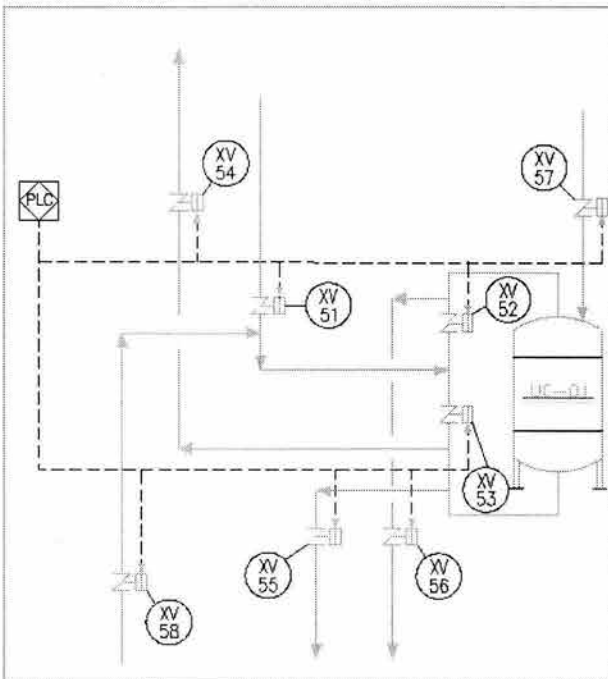
En la regeneración de las resinas de las unidades aniónicas se utiliza un álcali fuerte como es la sosa cáustica y, para ello se cuenta con los recipientes TD-05 y TD-05A, uno en operación y el otro en espera y las bombas dosificadoras BD-05 y BD-05A, también una en espera y la otra en operación. En los tanques se han colocado indicadores de nivel de vidrio LG-04 y LG-05 para vigilar directamente el nivel de la sosa. Las bombas dosificadoras cuentan con manómetros integrados con sello químico PI-87 y PI-88, válvulas de alivio de presión PSV-18 y PSV-19 y variadores de frecuencia FZ-18 y FZ-19 para el control de la dosificación mediante ajuste del flujo en litros por hora o galones por minuto.



Debido a la importancia que entraña este tren en la operación de la planta (las calderas no pueden dejar de producir vapor), es que se tienen 2 sistemas para la dosificación del mismo químico, de forma tal que si se daña la BD-04, la BD-04A entra inmediatamente a suplir el servicio para la regeneración de las resinas catiónicas, o bien si se agota la sosa del TD-05, se utiliza el tanque TD-05A con su bomba BD-05A mientras se llena o prepara más solución en el tanque vacío.

Se ha instalado en la línea de distribución de agua decationizada un medidor de dureza AE-16 junto con un indicador-transmisor AIT-16, de forma tal que al detectarse la condición de dureza por cationes fuera del rango manejado, el AIT-16 manda una señal al PLC para que este, mediante ordenar la dosificación de ácido y dirigir la secuencia de cierre y apertura de las válvulas puestas en las líneas de entradas y salidas de las unidades catiónicas, coordine los retrolavados, enjuagues y regeneraciones para el control adecuado en la operación de estas unidades. También se ha colocado un medidor de dureza AE-17 junto con un indicador-transmisor AIT-17 en la línea de agua desmineralizada, de forma tal que al detectarse la condición de dureza ocasionada por aniones, el AIT-17 manda una señal al PLC para que este, mediante ordenar la dosificación de sosa y dirigir la secuencia de cierre y apertura de las válvulas puestas en las líneas de entradas y salidas de las unidades aniónicas, coordine los retrolavados, enjuagues y regeneraciones para el control adecuado en la operación de las unidades.

| Válvulas solenoides (Unidad Catiónica UC-01) | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| | XV-51 | XV-52 | XV-53 | XV-54 | XV-55 | XV-56 | XV-57 | XV-58 |
| Operación normal | Abre | Abre | Cierra | Abre | Cierra | Cierra | - | Cierra |
| Retrolavado | Cierra | Cierra | Abre | Cierra | Cierra | Abre | - | Abre |
| Enjuague | Cierra | Abre | Cierra | Cierra | Abre | Cierra | - | Abre |
| Regeneración | Cierra | Cierra | Cierra | Cierra | Abre | Cierra | Abre | Cierra |

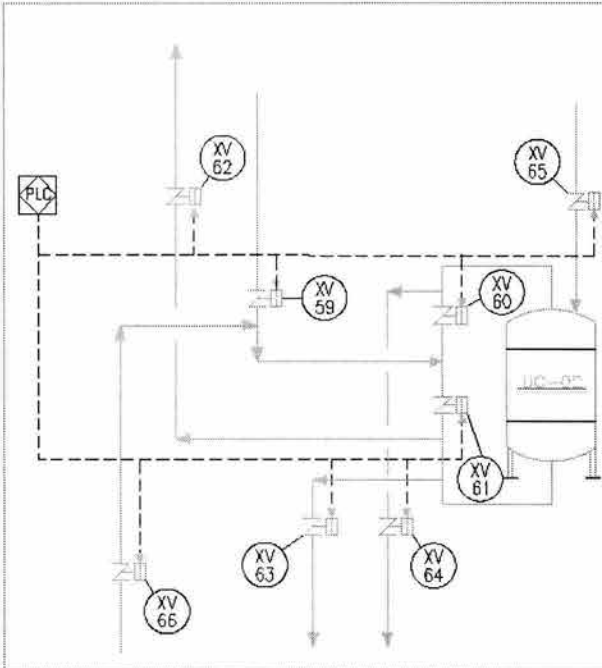


para el retrolavado, enjuague y

La operación normal de la unidad catiónica UC-01 se realiza con las válvulas automáticas XV-51, XV-52 y XV-54 abiertas; una vez que el proceso de decationización concluye (esto es, cuando el AIT-16 manda una señal al PLC indicando dureza en la línea de agua decationizada ocasionada por cationes tales como Ca^{2+} y Mg^{2+}), el PLC cierra las válvulas anteriores y abre la XV-58, la XV-53 y la XV-56 para realizar la operación de retrolavado a contracorriente. El enjuague se hace cuando el PLC ordena la apertura de la XV-58, XV-52 y XV-55. El agua para el retrolavado y enjuague de la unidad se toma de un cabezal de agua filtrada proveniente de las bombas BA-06/06A y en el cual se tiene control de flujo mediante el medidor FE-26, el transmisor FT-26, el control con indicación FIC-26 y la válvula FV-26. Para la regeneración de la resina el PLC manda el cierre de las válvulas encargadas del enjuague y al mismo tiempo abre la XV-57 por donde accesa el ácido y la XV-55 por donde se vierte al drenaje químico el regenerante sucio. En la regeneración con ácido se intercambian iones H^+ por cationes presentes en el agua tales como Ca^{2+} y Mg^{2+} , por ello es esencial la detección oportuna por el AIT-16 de la saturación de la resina, ya que esto permitirá una buena coordinación por el PLC en la apertura y cierre de las válvulas automáticas regeneración de las resinas.



| Válvulas solenoides (Unidad Catiónica UC-02) | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| | XV-59 | XV-60 | XV-61 | XV-62 | XV-63 | XV-64 | XV-65 | XV-66 |
| Operación normal | Abre | Abre | Cierra | Abre | Cierra | Cierra | - | Cierra |
| Retrolavado | Cierra | Cierra | Abre | Cierra | Cierra | Abre | - | Abre |
| Enjuague | Cierra | Abre | Cierra | Cierra | Abre | Cierra | - | Abre |
| Regeneración | Cierra | Cierra | Cierra | Cierra | Abre | Cierra | Abre | Cierra |

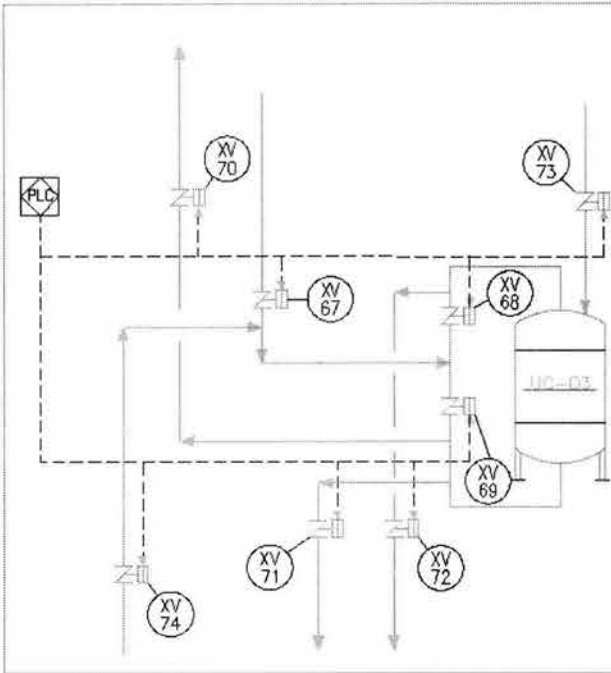


La operación normal de la unidad catiónica UC-02 se realiza con las válvulas automáticas XV-59, XV-60 y XV-62 abiertas; una vez que el proceso de decationización concluye (esto es, cuando el AIT-16 manda una señal al PLC indicando dureza en la línea de agua decationizada ocasionada por cationes tales como Ca^{2+} y Mg^{2+}), el PLC cierra las válvulas anteriores y abre la XV-66, la XV-61 y la XV-64 para realizar la operación de retrolavado a contracorriente. El enjuague se hace cuando el PLC ordena la apertura de la XV-66, XV-60 y XV-63. El agua para el retrolavado y enjuague de la unidad se toma de un cabezal de agua filtrada proveniente de las bombas BA-06/06A y en el cual se tiene control de flujo mediante el medidor FE-26, el transmisor FT-26, el control con indicación FIC-26 y la válvula FV-26. Para la regeneración de la resina el PLC manda el cierre de las válvulas encargadas del enjuague y al mismo tiempo abre la XV-65 por donde accesa el ácido y la XV-63 por donde se vierte al drenaje químico el regenerante sucio. En la regeneración con ácido se intercambian iones H^+ por cationes presentes en el agua tales como Ca^{2+} y Mg^{2+} , por ello es esencial la detección oportuna por el AIT-16 de la saturación de la resina..

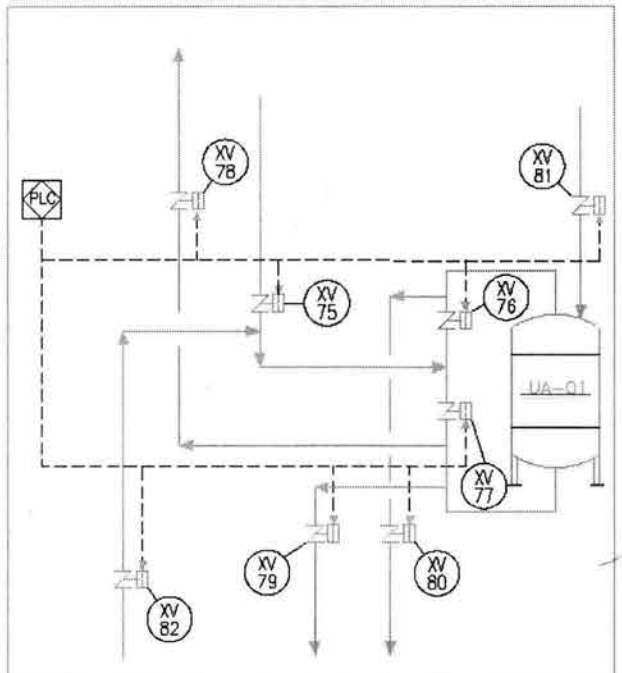
La operación normal de la unidad catiónica UC-03 se realiza con las válvulas automáticas XV-67, XV-68 y XV-70 abiertas; una vez que el proceso de decationización concluye (esto es, cuando el AIT-16 manda una señal al PLC indicando dureza en la línea de agua decationizada ocasionada por cationes tales como Ca^{2+} y Mg^{2+}), el PLC cierra las válvulas anteriores y abre la XV-74, la XV-69 y la XV-72 para realizar la operación de retrolavado a contracorriente. El enjuague se hace cuando el PLC ordena la apertura de la XV-74, XV-68 y XV-71. El agua para el retrolavado y enjuague de la unidad se toma de un cabezal de agua filtrada proveniente de las bombas BA-06/06A y en el cual se tiene control de flujo mediante el medidor FE-26, el transmisor FT-26, el control con indicación FIC-26 y la válvula FV-26. Para la regeneración de la resina el PLC manda el cierre de las válvulas encargadas del enjuague y al mismo tiempo abre la XV-73 por donde accesa el ácido y la XV-71 por donde se vierte al drenaje químico el regenerante sucio. En la regeneración con ácido se intercambian iones H^+ por cationes presentes en el agua tales como Ca^{2+} y Mg^{2+} , por ello es esencial la detección oportuna por el AIT-16 de la saturación de la resina.



| Válvulas solenoides (Unidad Catiónica UC-03) | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| | XV-67 | XV-68 | XV-69 | XV-70 | XV-71 | XV-72 | XV-73 | XV-74 |
| Operación normal | Abre | Abre | Cierra | Abre | Cierra | Cierra | - | Cierra |
| Retrolavado | Cierra | Cierra | Abre | Cierra | Cierra | Abre | - | Abre |
| Enjuague | Cierra | Abre | Cierra | Cierra | Abre | Cierra | - | Abre |
| Regeneración | Cierra | Cierra | Cierra | Cierra | Abre | Cierra | Abre | Cierra |



| Válvulas solenoides (Unidad Aniónica UA-01) | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| | XV-75 | XV-76 | XV-77 | XV-78 | XV-79 | XV-80 | XV-81 | XV-82 |
| Operación normal | Abre | Abre | Cierra | Abre | Cierra | Cierra | - | Cierra |
| Retrolavado | Cierra | Cierra | Abre | Cierra | Cierra | Abre | - | Abre |
| Enjuague | Cierra | Abre | Cierra | Cierra | Abre | Cierra | - | Abre |
| Regeneración | Cierra | Cierra | Cierra | Cierra | Abre | Cierra | Abre | Cierra |



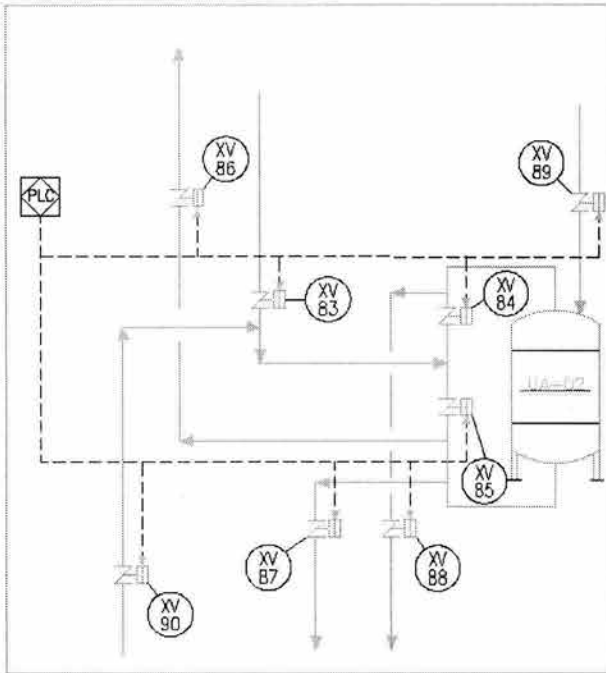
La operación normal de la unidad aniónica UA-01 se realiza con las válvulas automáticas XV-75, XV-76 y XV-78 abiertas; una vez que el proceso de desmineralización concluye (esto es, cuando el AIT-17 manda una señal al PLC indicando dureza en la línea de agua desmineralizada), el PLC cierra las válvulas anteriores y abre la XV-82, la XV-77 y la XV-80 para realizar la operación de retrolavado a contracorriente. El enjuague se hace cuando el PLC ordena la apertura de la XV-82, XV-76 y XV-79. El agua para el retrolavado y enjuague de la unidad se toma de un cabezal de agua desgasificada proveniente de las bombas BA-10/10A y en el cual se tiene control de flujo mediante el medidor FE-27, el transmisor FT-27, el control con indicación FIC-27 y la válvula FV-27. Para la regeneración de la resina el PLC manda el cierre de las válvulas encargadas del enjuague y al mismo tiempo abre la XV-81 por donde accesa el NaCl y la XV-79 por donde se vierte al drenaje químico el regenerante sucio. En la regeneración con sosa se intercambian iones OH⁻ por aniones presentes en el agua tales como sílice y alcalinidad, por ello es esencial la detección oportuna por el AIT-17 de la saturación de la resina, ya que esto permitirá un buen servicio a las unidades.

La operación normal de la unidad aniónica UA-02 se realiza con las válvulas automáticas XV-83, XV-84 y XV-86 abiertas; una vez que el proceso de desmineralización concluye (esto es, cuando el AIT-17 manda una señal al PLC indicando dureza en la línea de agua desmineralizada), el PLC cierra las válvulas anteriores y abre la XV-90, la XV-85 y la XV-88 para realizar la operación de retrolavado a contracorriente. El enjuague se hace cuando el PLC ordena la apertura de la XV-90, XV-84 y XV-87. El agua para el retrolavado y enjuague de la unidad se toma de un cabezal de agua desgasificada proveniente de las bombas BA-10/10A y en el cual se tiene control de flujo mediante el medidor FE-27, el transmisor FT-27, el control con indicación FIC-27 y la válvula FV-27. Para la regeneración de la resina el PLC manda el cierre de las válvulas encargadas del enjuague y al mismo tiempo abre la XV-89 por donde accesa el NaCl y la XV-87 por donde se vierte al drenaje químico el regenerante sucio. En la regeneración con sosa se intercambian iones OH⁻ por aniones

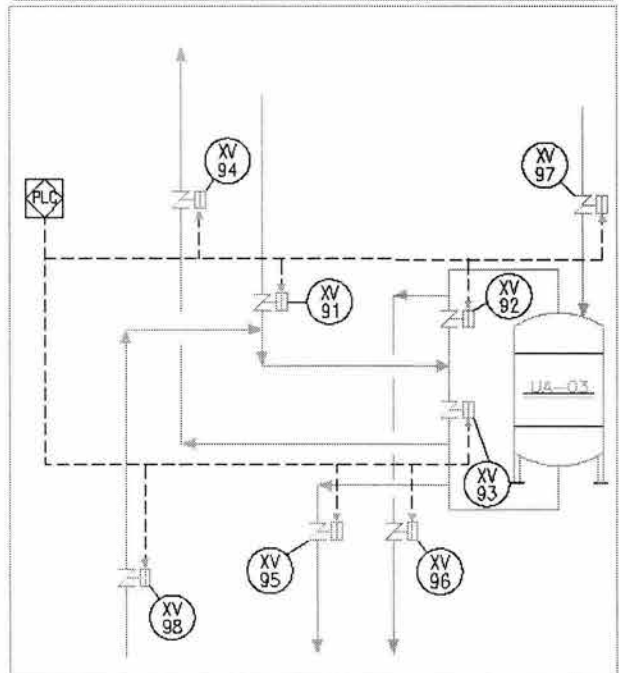


presentes en el agua tales como sílice y alcalinidad, por ello es esencial la detección oportuna por el AIT-17 de la saturación de la resina, ya que esto permitirá un buen servicio a las unidades

| Válvulas solenoides (Unidad Aniónica UA-02) | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| | XV-83 | XV-84 | XV-85 | XV-86 | XV-87 | XV-88 | XV-89 | XV-90 |
| Operación normal | Abre | Abre | Cierra | Abre | Cierra | Cierra | - | Cierra |
| Retrolavado | Cierra | Cierra | Abre | Cierra | Cierra | Abre | - | Abre |
| Enjuague | Cierra | Abre | Cierra | Cierra | Abre | Cierra | - | Abre |
| Regeneración | Cierra | Cierra | Cierra | Cierra | Abre | Cierra | Abre | Cierra |



| Válvulas solenoides (Unidad Aniónica UA-03) | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| | XV-91 | XV-92 | XV-93 | XV-94 | XV-95 | XV-96 | XV-97 | XV-98 |
| Operación normal | Abre | Abre | Cierra | Abre | Cierra | Cierra | - | Cierra |
| Retrolavado | Cierra | Cierra | Abre | Cierra | Cierra | Abre | - | Abre |
| Enjuague | Cierra | Abre | Cierra | Cierra | Abre | Cierra | - | Abre |
| Regeneración | Cierra | Cierra | Cierra | Cierra | Abre | Cierra | Abre | Cierra |



La operación normal de la unidad aniónica UA-03 se realiza con las válvulas automáticas XV-91, XV-92 y XV-94 abiertas; una vez que el proceso de desmineralización concluye (esto es, cuando el AIT-17 manda una señal al PLC indicando dureza en la línea de agua desmineralizada), el PLC cierra las válvulas anteriores y abre la XV-98, la XV-93 y la XV-96 para realizar la operación de retrolavado a contracorriente. El enjuague se hace cuando el PLC ordena la apertura de la XV-98, XV-92 y XV-95. El agua para el retrolavado y enjuague de la unidad se toma de un cabezal de agua desgasificada proveniente de las bombas BA-10/10A y en el cual se tiene control de flujo mediante el medidor FE-27, el transmisor FT-27, el control con indicación FIC-27 y la válvula FV-27. Para la regeneración de la resina el PLC manda el cierre de las válvulas encargadas del enjuague y al mismo tiempo abre la XV-97 por donde accesa el NaCl y la XV-95 por donde se vierte al drenaje químico el regenerante sucio. En la regeneración con sosa se intercambian iones OH⁻ por aniones presentes en el agua tales como sílice y alcalinidad, por ello es esencial la detección oportuna por el AIT-17 de la saturación de la resina, ya que esto permitirá un buen servicio a las unidades.

Una vez descritos los diagramas de tuberías e instrumentación correspondientes al tratamiento de agua típico en una planta química o refinería, es práctica común el anexar una lista de la instrumentación usada para la medición y el control de las variables, y un índice de las líneas plasmadas en los DTI's, con los correspondientes servicios que dan.



6.2. Índice de líneas.

De acuerdo a los estándares se tiene que la identificación de las líneas de proceso y de servicios auxiliares en un diagrama de tuberías e instrumentación, deberá contener la siguiente información:

- Diámetro
- Servicio
- Número consecutivo dado a la línea
- Especificación de material
- Aislamiento (en caso de tener)

Así, la línea 8"-ACR-101-AcC corresponde a una tubería de 8 pulgadas de acero al carbón (AcC) que transporta agua cruda (ACR) y cuyo número asignado es el 101; esta no tiene ningún tipo de aislamiento térmico.

La siguiente tabla muestra el índice de líneas correspondiente a los DTI's 01, 02, 03 y 04.



| Diámetro (in) | Servicio | Número | Material | de | a | Presión (lb/in ²) | Temp. (°C) | Plano no. |
|---------------|------------------------|--------|-----------------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------------------|------------|-----------|
| 10 | Agua clarificada (ACL) | 101 | Acero al Carbón (AcC) | CLF-01 | TA-01 | | | DTI-01 |
| 10 | Agua clarificada (ACL) | 102 | Acero al Carbón (AcC) | TA-01 | BA-03 | | | DTI-01 |
| 10 | Agua clarificada (ACL) | 103 | Acero al Carbón (AcC) | 10"-ACL-103-AcC | BA-03A | | | DTI-01 |
| 8 | Agua clarificada (ACL) | 104 | Acero al Carbón (AcC) | BA-03 | F-01/02/03 | | | DTI-01 |
| 8 | Agua clarificada (ACL) | 105 | Acero al Carbón (AcC) | BA-03A | 8"-ACL-104-AcC | | | DTI-01 |
| 8 | Agua clarificada (ACL) | 106 | Acero al Carbón (AcC) | 8"-ACL-104-AcC | Retrolavado y enjuague de F-01/02/03 | | | DTI-01 |
| 4 | Agua clarificada (ACL) | 107 | Acero al Carbón (AcC) | 8"-ACL-104-AcC | TA-01 | | | DTI-01 |
| 6 | Agua clarificada (ACL) | 108 | Acero al Carbón (AcC) | 8"-ACL-104-AcC | F-01 | | | DTI-02 |
| 6 | Agua clarificada (ACL) | 109 | Acero al Carbón (AcC) | 8"-ACL-104-AcC | F-02 | | | DTI-02 |
| 6 | Agua clarificada (ACL) | 110 | Acero al Carbón (AcC) | 8"-ACL-104-AcC | F-03 | | | DTI-02 |
| 6 | Agua clarificada (ACL) | 111 | Acero al Carbón (AcC) | 8"-ACL-106-AcC | Retrolavado y enjuague de F-01 | | | DTI-02 |
| 6 | Agua clarificada (ACL) | 112 | Acero al Carbón (AcC) | 8"-ACL-106-AcC | Retrolavado y enjuague de F-02 | | | DTI-02 |
| 6 | Agua clarificada (ACL) | 113 | Acero al Carbón (AcC) | 8"-ACL-106-AcC | Retrolavado y enjuague de F-03 | | | DTI-02 |
| 10 | Agua cruda (ACR) | 101 | Acero al Carbón (AcC) | BA-01 | CLF-01 | | | DTI-01 |
| 10 | Agua cruda (ACR) | 102 | Acero al Carbón (AcC) | BA-01A | 10"-ACR-101-AcC | | | DTI-01 |
| 8 | Agua cruda (ACR) | 103 | Acero al Carbón (AcC) | 10"-ACR-101-AcC | Canal de bocatoma | | | DTI-01 |



| Diámetro (in) | Servicio | Número | Material | de | a | Presión (lb/in ²) | Temp. (°C) | Plano no. |
|---------------|--------------------------|--------|------------------------|-----------------|---------------------------------------|-------------------------------|------------|-----------|
| 8 | Agua cruda (ACR) | 104 | Acero al Carbón (AcC) | 10"-ACR-101-AcC | TA-01 | | | DTI-01 |
| 1 | Agua cruda (ACR) | 105 | Acero al Carbón (AcC) | 10"-ACR-101-AcC | EY-01 | | | DTI-01 |
| 6 | Agua decationizada (ADC) | 101 | Acero Inoxidable (AcI) | UC-01 | DG-01 | | | DTI-04 |
| 4 | Agua decationizada (ADC) | 102 | Acero Inoxidable (AcI) | UC-02 | 6"-ADC-101-AcI | | | DTI-04 |
| 4 | Agua decationizada (ADC) | 103 | Acero Inoxidable (AcI) | UC-03 | 6"-ADC-101-AcI | | | DTI-04 |
| 8 | Agua desgasificada (ADG) | 101 | Acero Inoxidable (AcI) | DG-01 | BA-10 | | | DTI-04 |
| 8 | Agua desgasificada (ADG) | 102 | Acero Inoxidable (AcI) | 8"-ADG-101-AcI | BA-10A | | | DTI-04 |
| 6 | Agua desgasificada (ADG) | 103 | Acero Inoxidable (AcI) | BA-10 | UA-01 | | | DTI-04 |
| 6 | Agua desgasificada (ADG) | 104 | Acero Inoxidable (AcI) | BA-10A | 6"-ADG-103-AcI | | | DTI-04 |
| 3 | Agua desgasificada (ADG) | 105 | Acero Inoxidable (AcI) | 6"-ADG-103-AcI | DG-01 | | | DTI-04 |
| 6 | Agua desgasificada (ADG) | 106 | Acero Inoxidable (AcI) | 6"-ADG-103-AcI | Retrolavado y enjuague de UA-01/02/03 | | | DTI-04 |
| 4 | Agua desgasificada (ADG) | 107 | Acero Inoxidable (AcI) | 6"-ADG-103-AcI | UA-01 | | | DTI-04 |
| 4 | Agua desgasificada (ADG) | 108 | Acero Inoxidable (AcI) | 6"-ADG-103-AcI | UA-02 | | | DTI-04 |
| 4 | Agua desgasificada (ADG) | 109 | Acero Inoxidable (AcI) | 6"-ADG-103-AcI | UA-03 | | | DTI-04 |
| | | | | | | | | |



| Diámetro (in) | Servicio | Número | Material | de | a | Presión (lb/in ²) | Temp. (°C) | Plano no. |
|---------------|----------------------------|--------|------------------------|----------------|---------------------------------|-------------------------------|------------|-----------|
| 4 | Agua desgasificada (ADG) | 110 | Acero Inoxidable (AcI) | 6"-ADG-106-AcI | Retrolavado y enjuague de UA-01 | | | DTI-04 |
| 4 | Agua desgasificada (ADG) | 111 | Acero Inoxidable (AcI) | 6"-ADG-106-AcI | Retrolavado y enjuague de UA-02 | | | DTI-04 |
| 4 | Agua desgasificada (ADG) | 112 | Acero Inoxidable (AcI) | 6"-ADG-106-AcI | Retrolavado y enjuague de UA-03 | | | DTI-04 |
| 6 | Agua desmineralizada (ADM) | 101 | Acero Inoxidable (AcI) | UA-01 | Generación de vapor | | | DTI-04 |
| 4 | Agua desmineralizada (ADM) | 102 | Acero Inoxidable (AcI) | UA-02 | 6"-ADM-101-AcI | | | DTI-04 |
| 4 | Agua desmineralizada (ADM) | 103 | Acero Inoxidable (AcI) | UA-03 | 6"-ADM-101-AcI | | | DTI-04 |
| 8 | Agua filtrada (AF) | 101 | Acero al Carbón (AcC) | F-01 | TA-02 | | | DTI-02 |
| 6 | Agua filtrada (AF) | 102 | Acero al Carbón (AcC) | F-02 | 8"-AF-101-AcC | | | DTI-02 |
| 6 | Agua filtrada (AF) | 103 | Acero al Carbón (AcC) | F-03 | 8"-AF-101-AcC | | | DTI-02 |
| 4 | Agua filtrada (AF) | 104 | Acero al Carbón (AcC) | TA-02 | BA-04 | | | DTI-02 |
| 4 | Agua filtrada (AF) | 105 | Acero al Carbón (AcC) | 4"-AF-104-AcC | BA-04A | | | DTI-02 |
| 3 | Agua filtrada (AF) | 106 | Acero al Carbón (AcC) | BA-04 | Red contra incendio | | | DTI-02 |
| 3 | Agua filtrada (AF) | 107 | Acero al Carbón (AcC) | BA-04A | 3"-AF-106-AcC | | | DTI-02 |
| 2 | Agua filtrada (AF) | 108 | Acero al Carbón (AcC) | 3"-AF-106-AcC | 3"-AF-135-AcC | | | DTI-02 |
| 8 | Agua filtrada (AF) | 109 | Acero al Carbón (AcC) | TA-02 | BA-05 | | | DTI-03 |



| Diámetro (in) | Servicio | Número | Material | de | a | Presión (lb/in²) | Temp. (°C) | Plano no. |
|----------------------|--------------------|---------------|-----------------------|---------------|---------------|------------------------------------|-------------------|------------------|
| 8 | Agua filtrada (AF) | 110 | Acero al Carbón (AcC) | 8"-AF-109-AcC | BA-05A | | | DTI-03 |
| 6 | Agua filtrada (AF) | 111 | Acero al Carbón (AcC) | BA-05 | TE-01 | | | DTI-03 |
| 6 | Agua filtrada (AF) | 112 | Acero al Carbón (AcC) | BA-05A | 6"-AF-111-AcC | | | DTI-03 |
| 3 | Agua filtrada (AF) | 113 | Acero al Carbón (AcC) | 6"-AF-111-AcC | 3"-AF-135-AcC | | | DTI-03 |
| 1 | Agua filtrada (AF) | 114 | Acero al Carbón (AcC) | 6"-AF-111-AcC | EY-03 | | | DTI-03 |
| 8 | Agua filtrada (AF) | 115 | Acero al Carbón (AcC) | TA-02 | BA-06 | | | DTI-04 |
| 8 | Agua filtrada (AF) | 116 | Acero al Carbón (AcC) | 8"-AF-115-AcC | BA-06A | | | DTI-04 |
| 6 | Agua filtrada (AF) | 117 | Acero al Carbón (AcC) | BA-06 | UC-01 | | | DTI-04 |
| 6 | Agua filtrada (AF) | 118 | Acero al Carbón (AcC) | BA-06A | 6"-AF-117-AcC | | | DTI-04 |
| 3 | Agua filtrada (AF) | 119 | Acero al Carbón (AcC) | 6"-AF-117-AcC | 3"-AF-135-AcC | | | DTI-04 |
| 4 | Agua filtrada (AF) | 120 | Acero al Carbón (AcC) | 6"-AF-117-AcC | UC-01 | | | DTI-04 |
| 4 | Agua filtrada (AF) | 121 | Acero al Carbón (AcC) | 6"-AF-117-AcC | UC-02 | | | DTI-04 |
| 4 | Agua filtrada (AF) | 122 | Acero al Carbón (AcC) | 6"-AF-117-AcC | UC-03 | | | DTI-04 |
| 3 | Agua filtrada (AF) | 123 | Acero al Carbón (AcC) | TA-02 | BA-07 | | | DTI-02 |
| 3 | Agua filtrada (AF) | 124 | Acero al Carbón (AcC) | 3"-AF-123-AcC | BA-07A | | | DTI-02 |
| 2½ | Agua filtrada (AF) | 125 | Acero al Carbón (AcC) | BA-07 | CCA-01/02/03 | | | DTI-02 |



| Diámetro (in) | Servicio | Número | Material | de | a | Presión (lb/in ²) | Temp. (°C) | Plano no. |
|-------------------------------|---------------------------------|--------|-----------------------|--|--|-------------------------------|------------|-----------|
| 2 ¹ / ₂ | Agua filtrada (AF) | 126 | Acero al Carbón (AcC) | BA-07A | 2 ¹ / ₂ "-AF-125-AcC | | | DTI-02 |
| 1 ¹ / ₂ | Agua filtrada (AF) | 127 | Acero al Carbón (AcC) | 2 ¹ / ₂ "-AF-125-AcC | 3"-AF-135-AcC | | | DTI-02 |
| 2 ¹ / ₂ | Agua filtrada (AF) | 128 | Acero al Carbón (AcC) | 2 ¹ / ₂ "-AF-125-AcC | Retrolavado y enjuague de CCA-01/02/03 | | | DTI-02 |
| 2 | Agua filtrada (AF) | 129 | Acero al Carbón (AcC) | 2 ¹ / ₂ "-AF-125-AcC | CCA-01 | | | DTI-02 |
| 2 | Agua filtrada (AF) | 130 | Acero al Carbón (AcC) | 2 ¹ / ₂ "-AF-125-AcC | CCA-02 | | | DTI-02 |
| 2 | Agua filtrada (AF) | 131 | Acero al Carbón (AcC) | 2 ¹ / ₂ "-AF-125-AcC | CCA-03 | | | DTI-02 |
| 2 | Agua filtrada (AF) | 132 | Acero al Carbón (AcC) | 2 ¹ / ₂ "-AF-128-AcC | Retrolavado y enjuague de CCA-01 | | | DTI-02 |
| 2 | Agua filtrada (AF) | 133 | Acero al Carbón (AcC) | 2 ¹ / ₂ "-AF-128-AcC | Retrolavado y enjuague de CCA-02 | | | DTI-02 |
| 2 | Agua filtrada (AF) | 134 | Acero al Carbón (AcC) | 2 ¹ / ₂ "-AF-128-AcC | Retrolavado y enjuague de CCA-03 | | | DTI-02 |
| 3 | Agua filtrada (AF) | 135 | Acero al Carbón (AcC) | cabezal | TA-02 | | | DTI-02 |
| 6 | Agua filtrada (AF) | 136 | Acero al Carbón (AcC) | 6"-AF-117-AcC | Retrolavado y enjuague de UC-01/02/03 | | | DTI-04 |
| 4 | Agua filtrada (AF) | 137 | Acero al Carbón (AcC) | 6"-AF-136-AcC | Retrolavado y enjuague de UC-01 | | | DTI-04 |
| 4 | Agua filtrada (AF) | 138 | Acero al Carbón (AcC) | 6"-AF-136-AcC | Retrolavado y enjuague de UC-02 | | | DTI-04 |
| 4 | Agua filtrada (AF) | 139 | Acero al Carbón (AcC) | 6"-AF-136-AcC | Retrolavado y enjuague de UC-03 | | | DTI-04 |
| 3 | Agua filtrada de columnas (AFC) | 101 | Acero al Carbón (AcC) | CCA-01 | Uso doméstico | | | DTI-02 |
| 2 | Agua filtrada de columnas (AFC) | 102 | Acero al Carbón (AcC) | CCA-02 | 3"-AFC-101-AcC | | | DTI-02 |



| Diámetro (in) | Servicio | Número | Material | de | a | Presión (lb/in ²) | Temp. (°C) | Plano no. |
|---------------|--|--------|------------------------|---------------------|--|-------------------------------|------------|--------------------------------|
| 2 | Agua filtrada de columnas (AFC) | 103 | Acero al Carbón (AcC) | CCA-03 | 3"-AFC-101-AcC | | | DTI-02 |
| 1 | Aire de instrumentos (AI) | 101 | Acero inoxidable (AcI) | Área de compresores | Válvulas solenoides de las válvulas ON/OFF | | | DTI-01, DTI-02, DTI-03, DTI-04 |
| 1 | Aire de planta (AP) | 101 | Acero inoxidable (AcI) | Área de compresores | Filtro prensa FP-01 | | | DTI-01 |
| 2 | Aceite recuperado (AR) | 101 | | CPI-01 | FC-03 | | | DTI-03 |
| 2 | Aceite recuperado (AR) | 102 | | BA-11 | Recuperación de grasas y aceites | | | DTI-03 |
| 2 | Aceite recuperado (AR) | 103 | | BA-11A | 2"-AR-102-AcC | | | DTI-03 |
| 1 | Aceite recuperado (AR) | 104 | | 2"-AR-102-AcC | FC-03 | | | DTI-03 |
| 8 | Agua de retrolavados y enjuagues (ART) | 101 | Acero al Carbón (AcC) | F-01 | FC-01 | | | DTI-02 |
| 8 | Agua de retrolavados y enjuagues (ART) | 101 | Acero al Carbón (AcC) | F-01 | FC-01 | | | DTI-02 |
| 6 | Agua de retrolavados y enjuagues (ART) | 102 | Acero al Carbón (AcC) | F-01 | 8"-ART-101-AcC | | | DTI-02 |
| 6 | Agua de retrolavados y enjuagues (ART) | 103 | Acero al Carbón (AcC) | F-02 | 8"-ART-101-AcC | | | DTI-02 |
| 6 | Agua de retrolavados y enjuagues (ART) | 104 | Acero al Carbón (AcC) | F-02 | 8"-ART-101-AcC | | | DTI-02 |
| 6 | Agua de retrolavados y enjuagues (ART) | 105 | Acero al Carbón (AcC) | F-03 | 8"-ART-101-AcC | | | DTI-02 |
| 6 | Agua de retrolavados y enjuagues (ART) | 106 | Acero al Carbón (AcC) | F-03 | 8"-ART-101-AcC | | | DTI-02 |

| Diámetro (in) | Servicio | Número | Material | de | a | Presión (lb/in²) | Temp. (°C) | Plano no. |
|----------------------|--|---------------|------------------------|----------------|------------------------|------------------------------------|-------------------|------------------|
| 2 | Agua de retrolavados y enjuagues (ART) | 107 | Acero al Carbón (AcC) | CCA-01 | 8"-ART-101-AcC | | | DTI-02 |
| 2 | Agua de retrolavados y enjuagues (ART) | 108 | Acero al Carbón (AcC) | CCA-01 | 8"-ART-101-AcC | | | DTI-02 |
| 2 | Agua de retrolavados y enjuagues (ART) | 109 | Acero al Carbón (AcC) | CCA-02 | 8"-ART-101-AcC | | | DTI-02 |
| 2 | Agua de retrolavados y enjuagues (ART) | 110 | Acero al Carbón (AcC) | CCA-02 | 8"-ART-101-AcC | | | DTI-02 |
| 2 | Agua de retrolavados y enjuagues (ART) | 111 | Acero al Carbón (AcC) | CCA-03 | 8"-ART-101-AcC | | | DTI-02 |
| 2 | Agua de retrolavados y enjuagues (ART) | 112 | Acero al Carbón (AcC) | CCA-03 | 8"-ART-101-AcC | | | DTI-02 |
| 4 | Agua de retrolav. y enjuagues (ART) | 113 | Acero al Carbón (AcC) | BA-02 | 10"-ACR-101-AcC | | | DTI-01 |
| 4 | Agua de retrolavados y enjuagues (ART) | 114 | Acero al Carbón (AcC) | BA-02A | 4"-ART-113-AcC | | | DTI-01 |
| 2 | Agua de retrolavados y enjuagues (ART) | 115 | Acero al Carbón (AcC) | 4"-ART-113-AcC | FC-01 | | | DTI-01 |
| 6 | Agua de retrolav., enjuague y regeneración (ART) | 116 | Acero Inoxidable (AcI) | UC-01 | Fosa de neutralización | | | DTI-04 |
| 4 | Agua de retrolav., enjuague y regeneración (ART) | 117 | Acero Inoxidable (AcI) | UC-01 | 6"-ART-116-AcI | | | DTI-04 |



| Diámetro (in) | Servicio | Número | Material | de | a | Presión (lb/in ²) | Temp. (°C) | Plano no. |
|---------------|--|--------|------------------------|-------|----------------|-------------------------------|------------|-----------|
| 4 | Agua de retrolav., enjuague y regeneración (ART) | 118 | Acero Inoxidable (AcI) | UC-02 | 6"-ART-116-AcI | | | DTI-04 |
| 4 | Agua de retrolav., enjuague y regeneración (ART) | 119 | Acero Inoxidable (AcI) | UC-02 | 6"-ART-116-AcI | | | DTI-04 |
| 4 | Agua de retrolav., enjuague y regeneración (ART) | 120 | Acero Inoxidable (AcI) | UC-03 | 6"-ART-116-AcI | | | DTI-04 |
| 4 | Agua de retrolav., enjuague y regeneración (ART) | 121 | Acero Inoxidable (AcI) | UC-03 | 6"-ART-116-AcI | | | DTI-04 |
| 4 | Agua de retrolav., enjuague y regeneración (ART) | 122 | Acero Inoxidable (AcI) | UA-01 | 6"-ART-116-AcI | | | DTI-04 |
| 4 | Agua de retrolav., enjuague y regeneración (ART) | 123 | Acero Inoxidable (AcI) | UA-01 | 6"-ART-116-AcI | | | DTI-04 |
| 4 | Agua de retrolav., enjuague y regeneración (ART) | 124 | Acero Inoxidable (AcI) | UA-02 | 6"-ART-116-AcI | | | DTI-04 |
| 4 | Agua de retrolav., enjuague y regeneración (ART) | 125 | Acero Inoxidable (AcI) | UA-02 | 6"-ART-116-AcI | | | DTI-04 |
| 4 | Agua de retrolav., enjuague y regeneración (ART) | 126 | Acero Inoxidable (AcI) | UA-03 | 6"-ART-116-AcI | | | DTI-04 |
| 4 | Agua de retr., enjuague y regeneración (ART) | 127 | Acero Inoxidable (AcI) | UA-03 | 6"-ART-116-AcI | | | DTI-04 |
| 2 | Ácido sulfúrico (ASU) | 101 | Acero Inoxidable (AcI) | TD-06 | BD-06 | | | DTI-03 |
| 2 | Ácido sulfúrico (ASU) | 102 | Acero Inoxidable (AcI) | BD-06 | TE-01 | | | DTI-03 |



| Diámetro (in) | Servicio | Número | Material | de | a | Presión (lb/in ²) | Temp. (°C) | Plano no. |
|-------------------------------|-----------------------|--------|------------------------|--|-----------------------|-------------------------------|------------|-----------|
| 2 | Ácido sulfúrico (ASU) | 103 | Acero Inoxidable (AcI) | TD-04 | BD-04 | | | DTI-04 |
| 2 | Ácido sulfúrico (ASU) | 104 | Acero Inoxidable (AcI) | BD-04 | UC-01/02/03 | | | DTI-04 |
| 2 | Ácido sulfúrico (ASU) | 105 | Acero Inoxidable (AcI) | TD-04A | BD-04A | | | DTI-04 |
| 2 | Ácido sulfúrico (ASU) | 106 | Acero Inoxidable (AcI) | BD-04A | 2"-ASU-104-AcI | | | DTI-04 |
| 1 ¹ / ₂ | Ácido sulfúrico (ASU) | 107 | Acero Inoxidable (AcI) | 2"-ASU-104-AcI | UC-01 | | | DTI-04 |
| 1 ¹ / ₂ | Ácido sulfúrico (ASU) | 108 | Acero Inoxidable (AcI) | 2"-ASU-104-AcI | UC-02 | | | DTI-04 |
| 1 ¹ / ₂ | Ácido sulfúrico (ASU) | 109 | Acero Inoxidable (AcI) | 2"-ASU-104-AcI | UC-03 | | | DTI-04 |
| 2 | Agua tratada (ATR) | 101 | Acero al Carbón (AcC) | FC-02 | BA-08 | | | DTI-01 |
| 2 | Agua tratada (ATR) | 102 | Acero al Carbón (AcC) | 2"-ATR-101-AcC | BA-08A | | | DTI-01 |
| 1 ¹ / ₂ | Agua tratada (ATR) | 103 | Acero al Carbón (AcC) | BA-08 | FP-01 | | | DTI-01 |
| 11/2 | Agua tratada (ATR) | 104 | Acero al Carbón (AcC) | BA-08A | 11/2-ATR-103-AcC | | | DTI-01 |
| 1 | Agua tratada (ATR) | 105 | Acero al Carbón (AcC) | 1 ¹ / ₂ -ATR-103-AcC | FC-02 | | | DTI-01 |
| 1 ¹ / ₂ | Agua tratada (ATR) | 106 | Acero al Carbón (AcC) | FP-01 | FC-01 | | | DTI-01 |
| 3 | Agua tratada (ATR) | 107 | Acero al Carbón (AcC) | CPI-01 | TA-03 | | | DTI-03 |
| 3 | Agua tratada (ATR) | 108 | Acero al Carbón (AcC) | TA-03 | BA-12 | | | DTI-03 |
| 3 | Agua tratada (ATR) | 109 | Acero al Carbón (AcC) | 3-ATR-108-AcC | BA-12A | | | DTI-03 |
| 2 ¹ / ₂ | Agua tratada (ATR) | 110 | Acero al Carbón (AcC) | BA-12 | Descarga de efluentes | | | DTI-03 |



| Diámetro (in) | Servicio | Número | Material | de | a | Presión (lb/in ²) | Temp. (°C) | Plano no. |
|-------------------------------|-----------------------|--------|-----------------------|--|--|-------------------------------|------------|-----------|
| 2 ¹ / ₂ | Agua tratada (ATR) | 111 | Acero al Carbón (AcC) | BA-12A | 2 ¹ / ₂ -ATR-110-AcC | | | DTI-03 |
| 2 ¹ / ₂ | Agua tratada (ATR) | 112 | Acero al Carbón (AcC) | 2 ¹ / ₂ -ATR-110-AcC | TA-03 | | | DTI-03 |
| 1 | Cloro (CL) | 101 | CPVC | CCL-01/01A | CL-01 | | | DTI-01 |
| 1 | Cloro (CL) | 102 | CPVC | CL-01 | EY-01 | | | DTI-01 |
| 1 | Cloro (CL) | 103 | CPVC | EY-01 | 10"-ACR-101-AcC | | | DTI-01 |
| 1 | Cloro (CL) | 104 | CPVC | CCL-02/02A | CL-02 | | | DTI-02 |
| 1 | Cloro (CL) | 105 | CPVC | CL-02 | EY-02 | | | DTI-02 |
| 1 | Cloro (CL) | 106 | CPVC | EY-02 | 3"-AFC-101-AcC | | | DTI-02 |
| 1 | Cloro (CL) | 107 | CPVC | CCL-03/03A | CL-03 | | | DTI-03 |
| 1 | Cloro (CL) | 108 | CPVC | CL-03 | EY-03 | | | DTI-03 |
| 1 | Cloro (CL) | 109 | CPVC | EY-03 | 6"-AF-111-AcC | | | DTI-03 |
| 3 | Agua aceitosa (DAA) | 101 | | Drenaje aceitoso | CPI-01 | | | DTI-03 |
| 1 | Lodos aceitosos (LAA) | 101 | | CPI-01 | Disposición final | | | DTI-03 |
| 1 | Producto químico (PQ) | 101 | | BD-01 | CLF-01 | | | DTI-01 |
| 1 | Producto químico (PQ) | 102 | | BD-02 | CLF-01 | | | DTI-01 |
| 1 | Producto químico (PQ) | 103 | | BD-03 | FC-02 | | | DTI-01 |
| 1 | Producto químico (PQ) | 104 | | BD-07 | TE-01 | | | DTI-03 |
| 1 | Producto químico (PQ) | 105 | | BD-08 | TE-01 | | | DTI-03 |
| 1 | Producto químico (PQ) | 106 | | BD-09 | TE-01 | | | DTI-03 |
| 1 | Producto químico (PQ) | 107 | | BD-10 | TE-01 | | | DTI-03 |



| Diámetro (in) | Servicio | Número | Material | de | a | Presión (lb/in ²) | Temp. (°C) | Plano no. |
|-------------------------------|---------------------------------------|--------|----------|--------------------|--------------------|-------------------------------|------------|-----------|
| 2 | Purga de lodos (PRL) | 101 | | CLF-01 | FC-02 | | | DTI-01 |
| 4 | Purga de torre (PRT) | 101 | | TE-01 | Drenaje pluvial | | | DTI-03 |
| 16 | Suministro agua de enfriamiento (SAE) | 101 | | BA-09 | Plantas de proceso | | | DTI-03 |
| 2 | Sosa cáustica (SC) | 101 | | TD-05 | BD-05 | | | DTI-04 |
| 2 | Sosa cáustica (SC) | 102 | | BD-05 | UA-01/02/03 | | | DTI-04 |
| 2 | Sosa cáustica (SC) | 103 | | TD-05A | BD-05A | | | DTI-04 |
| 2 | Sosa cáustica (SC) | 104 | | BD-05A | 2"-SC-102 | | | DTI-04 |
| 1 ¹ / ₂ | Sosa cáustica (SC) | 105 | | 2"-SC-102 | UA-01 | | | DTI-04 |
| 1 ¹ / ₂ | Sosa cáustica (SC) | 106 | | 2"-SC-102 | UA-02 | | | DTI-04 |
| 1 ¹ / ₂ | Sosa cáustica (SC) | 107 | | 2"-SC-102 | UA-03 | | | DTI-04 |
| 16 | Retorno agua de enfriamiento (RAE) | 101 | | Plantas de proceso | TE-01 | | | DTI-03 |

6.3. Índice de instrumentos.

El siguiente formato para el índice de instrumentos corresponde a uno típico con las características requeridas en la etapa conocida como ingeniería básica. Se ha numerado la instrumentación en grupos: análisis, flujo, nivel, presión y temperatura (ver nomenclatura en tabla 6.5). En el campo de localización, la "C" corresponde a instrumentos montados en campo, mientras que la "P" se refiere a instrumentación localizada en tableros o paneles de control. Entre cada plano se han dejado algunos números vacíos con el objeto de tener números cercanos para instrumentos que pudieran surgir en las etapas de revisión; así, para el caso del DTI-01 se tienen los siguientes rangos en la numeración:

- Instrumentos para la detección de variables de análisis 01 a 05
- Instrumentos para la medición de flujo 01 a 05
- Instrumentos para la medición de nivel 01 a 10
- Instrumentos para la medición de presión (manómetros) 01 a 20
- Instrumentos para la medición de temperatura 01 a 02



Para el DTI-02:

- Instrumentos para la detección de variables de análisis 06 a 10
- Instrumentos para la medición de flujo 06 a 15
- Instrumentos para la medición de nivel 11 a 15
- Instrumentos para la medición de presión (manómetros) 21 a 50
- Válvulas automáticas ON/OFF 01 a 50

En el DTI-03 se tienen los siguientes rangos en la numeración:

- Instrumentos para la detección de variables de análisis 11 a 15
- Instrumentos para la medición de flujo 16 a 25
- Instrumentos para la medición de nivel 16 a 20
- Instrumentos para la medición de presión (manómetros) 51 a 80
- Instrumentos para la medición de temperatura 03 a 04

Para el DTI-04:

- Instrumentos para la detección de variables de análisis 16 a 20
- Instrumentos para la medición de flujo 26 a 30
- Instrumentos para la medición de nivel 21 a 15
- Instrumentos para la medición de presión (manómetros) 81 a 90
- Válvulas automáticas ON/OFF 51 a 100



| No. TAG | Servicio línea/equipo | Plano no. | Localización | Hoja de datos | No. lazo | Ruta eléctrica | Ruta neumática | Observaciones |
|--|-----------------------|-----------|--------------|---------------|----------|----------------|----------------|---------------|
| AE ^{CL} ₂ -01 | 10"-ACR-101-AcC | DTI-01 | C | | | | | |
| AIT ^{CL} ₂ -01 | 10"-ACR-101-AcC | DTI-01 | P | | | | | |
| AE ^{TURBIDEZ} ₂ -02 | CLF-01 | DTI-01 | C | | | | | |
| AIT ^{TURBIDEZ} ₂ -02 | CLF-01 | DTI-01 | P | | | | | |
| AC-02 | CLF-01 | DTI-01 | P | | | | | |
| AAH ^{CL} ₂ -03 | CL-01 | DTI-01 | P | | | | | |
| AE ^{CL} ₂ -03 | CL-01 | DTI-01 | C | | | | | |
| AIT ^{CL} ₂ -03 | CL-01 | DTI-01 | P | | | | | |
| ASH ^{CL} ₂ -03 | CL-01 | DTI-01 | P | | | | | |
| AE ^{CL} ₂ -06 | 3"-AFC-101-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| AIT ^{CL} ₂ -06 | 3"-AFC-101-AcC | DTI-02 | P | | | | | |
| AAH ^{CL} ₂ -07 | CL-02 | DTI-02 | P | | | | | |
| AE ^{CL} ₂ -07 | CL-02 | DTI-02 | C | | | | | |
| AIT ^{CL} ₂ -07 | CL-02 | DTI-02 | P | | | | | |
| ASH ^{CL} ₂ -07 | CL-02 | DTI-02 | P | | | | | |
| AC-11 | TE-01 | DTI-03 | P | | | | | |
| AIT ^{CL} ₂ -11 | TE-01 | DTI-03 | P | | | | | |
| AIT ^{PH} ₂ -11 | TE-01 | DTI-03 | P | | | | | |
| AIT ^{ORP} ₂ -11 | TE-01 | DTI-03 | P | | | | | |
| CIT-11 | TE-01 | DTI-03 | P | | | | | |
| AAH ^{CL} ₂ -12 | CL-03 | DTI-03 | P | | | | | |
| AE ^{CL} ₂ -12 | CL-03 | DTI-03 | C | | | | | |
| AIT ^{CL} ₂ -12 | CL-03 | DTI-03 | P | | | | | |
| ASH ^{CL} ₂ -12 | CL-03 | DTI-03 | P | | | | | |
| AE ^{DUREZA} ₂ -16 | 6"-ADC-101-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| AIT ^{DUREZA} ₂ -16 | 6"-ADC-101-AcI | DTI-04 | P | | | | | |
| AE ^{DUREZA} ₂ -17 | 6"-ADM-101-AcI | DTI-04 | C | | | | | |



| No. TAG | Servicio línea/equipo | Plano no. | Localización | Hoja de datos | No. lazo | Ruta eléctrica | Ruta neumática | Observaciones |
|---------------------------|--|-----------|--------------|---------------|----------|----------------|----------------|---------------|
| AIT ^{DUREZA} -17 | 6"-ADM-101-AcI | DTI-04 | P | | | | | |
| FE-01 | 10"-ACR-101-AcC | DTI-01 | C | | | | | |
| FIC-01 | 10"-ACR-101-AcC | DTI-01 | P | | | | | |
| FQI-01 | 10"-ACR-101-AcC | DTI-01 | P | | | | | |
| FT-01 | 10"-ACR-101-AcC | DTI-01 | C | | | | | |
| FV-01 | 10"-ACR-101-AcC | DTI-01 | C | | | | | |
| FV-02 | 1"-CL-101-CPVC | DTI-01 | C | | | | | |
| FC-03 | CL-01 | DTI-01 | P | | | | | |
| FI-03 | CL-01 | DTI-01 | P | | | | | |
| FV-03 | CL-01 | DTI-01 | C | | | | | |
| FE-06 | 8"-ACL-104-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| FIC-06 | 8"-ACL-104-AcC | DTI-02 | P | | | | | |
| FT-06 | 8"-ACL-104-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| FV-06 | 8"-ACL-104-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| FE-07 | 8"-ACL-106-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| FIC-07 | 8"-ACL-106-AcC | DTI-02 | P | | | | | |
| FT-07 | 8"-ACL-106-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| FV-07 | 8"-ACL-106-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| FE-08 | 2 ¹ / ₂ "-AF-125-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| FIC-08 | 2 ¹ / ₂ "-AF-125-AcC | DTI-02 | P | | | | | |
| FT-08 | 2 ¹ / ₂ "-AF-125-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| FV-08 | 2 ¹ / ₂ "-AF-125-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| FE-09 | 2 ¹ / ₂ "-AF-128-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| FIC-09 | 2 ¹ / ₂ "-AF-128-AcC | DTI-02 | P | | | | | |
| FT-09 | 2 ¹ / ₂ "-AF-128-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| FV-09 | 2 ¹ / ₂ "-AF-128-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| FE-10 | 3"-AFC-101-AcC | DTI-02 | C | | | | | |



| No. TAG | Servicio línea/equipo | Plano no. | Localización | Hoja de datos | No. lazo | Ruta eléctrica | Ruta neumática | Observaciones |
|---------|-----------------------|-----------|--------------|---------------|----------|----------------|----------------|---------------|
| FIT-10 | 3"-AFC-101-AcC | DTI-02 | P | | | | | |
| FQI-10 | 3"-AFC-101-AcC | DTI-02 | P | | | | | |
| FV-11 | 1"-CL-104-CPVC | DTI-02 | C | | | | | |
| FC-12 | CL-02 | DTI-02 | P | | | | | |
| FI-12 | CL-02 | DTI-02 | P | | | | | |
| FV-12 | CL-02 | DTI-02 | C | | | | | |
| FE-16 | 6"-AF-111-AcC | DTI-03 | C | | | | | |
| FIT-16 | 6"-AF-111-AcC | DTI-03 | P | | | | | |
| FQI-16 | 6"-AF-111-AcC | DTI-03 | P | | | | | |
| FV-17 | 1"-CL-107-CPVC | DTI-03 | C | | | | | |
| FC-18 | CL-03 | DTI-03 | P | | | | | |
| FI-18 | CL-03 | DTI-03 | P | | | | | |
| FV-18 | CL-03 | DTI-03 | C | | | | | |
| FE-21 | 3"-DAA-101 | DTI-03 | C | | | | | |
| FIC-21 | 3"-DAA-101 | DTI-03 | P | | | | | |
| FT-21 | 3"-DAA-101 | DTI-03 | C | | | | | |
| FV-21 | 3"-DAA-101 | DTI-03 | C | | | | | |
| FE-26 | 6"-AF-136-AcC | DTI-04 | C | | | | | |
| FIC-26 | 6"-AF-136-AcC | DTI-04 | P | | | | | |
| FT-26 | 6"-AF-136-AcC | DTI-04 | C | | | | | |
| FV-26 | 6"-AF-136-AcC | DTI-04 | C | | | | | |
| FE-27 | 6"-ADG-106-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| FIC-27 | 6"-ADG-106-AcI | DTI-04 | P | | | | | |
| FT-27 | 6"-ADG-106-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| FV-27 | 6"-ADG-106-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| | | | | | | | | |
| FZ-01 | BD-01 | DTI-01 | C | | | | | |
| FZ-02 | BD-02 | DTI-01 | C | | | | | |



| No. TAG | Servicio línea/equipo | Plano no. | Localización | Hoja de datos no. | No. lazo | Ruta eléctrica | Ruta neumática | Observaciones |
|------------|-----------------------|-----------|--------------|-------------------|----------|----------------|----------------|---------------|
| FZ-03 | BD-03 | DTI-01 | C | | | | | |
| FZ-06 | BD-06 | DTI-03 | C | | | | | |
| FZ-07 | BD-07 | DTI-03 | C | | | | | |
| FZ-08 | BD-08 | DTI-03 | C | | | | | |
| FZ-09 | BD-09 | DTI-03 | C | | | | | |
| FZ-10 | BD-10 | DTI-03 | C | | | | | |
| FZ-16 | BD-04 | DTI-04 | C | | | | | |
| FZ-17 | BD-04A | DTI-04 | C | | | | | |
| FZ-18 | BD-05 | DTI-04 | C | | | | | |
| FZ-19 | BD-05A | DTI-04 | C | | | | | |
| | | | | | | | | |
| LI-01 | TA-01 | DTI-01 | C | | | | | |
| LSH-01 | CLF-01 | DTI-01 | C | | | | | |
| LSL-02 | TA-01 | DTI-01 | C | | | | | |
| LSH-03 | TA-01 | DTI-01 | C | | | | | |
| LSL-04 | TD-01 | DTI-01 | C | | | | | |
| LSL-05 | TD-02 | DTI-01 | C | | | | | |
| LSL/LSH-06 | FC-01 | DTI-01 | C | | | | | |
| LSL/LSH-07 | FC-02 | DTI-01 | C | | | | | |
| LSL-08 | TD-03 | DTI-01 | C | | | | | |
| LI-02 | TA-02 | DTI-02 | C | | | | | |
| LSL-11 | TA-02 | DTI-02 | C | | | | | |
| LCV-01 | 8"-AF-101-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| LG-01 | TD-06 | DTI-03 | C | | | | | |
| LSL/LSH-16 | FC-03 | DTI-03 | C | | | | | |
| LSL/LSH-17 | TA-03 | DTI-03 | C | | | | | |
| LG-02 | TD-04 | DTI-04 | C | | | | | |



| No. TAG | Servicio línea/equipo | Plano no. | Localización | Hoja de datos no. | No. lazo | Ruta eléctrica | Ruta neumática | Observaciones |
|---------|-----------------------|-----------|--------------|-------------------|----------|----------------|----------------|---------------|
| LG-03 | TD-04A | DTI-04 | C | | | | | |
| LG-04 | TD-05 | DTI-04 | C | | | | | |
| LG-05 | TD-05A | DTI-04 | C | | | | | |
| LSL-21 | DG-01 | DTI-04 | C | | | | | |
| LSH-22 | DG-01 | DTI-04 | C | | | | | |
| | | | | | | | | |
| PCV-01 | 1"-CL-101-CPVC | DTI-01 | C | | | | | |
| PCV-02 | 1"-CL-101A-CPVC | DTI-01 | C | | | | | |
| PCV-03 | 1"-CL-104-CPVC | DTI-02 | C | | | | | |
| PCV-04 | 1"-CL-104A-CPVC | DTI-02 | C | | | | | |
| PCV-05 | 1"-CL-107-CPVC | DTI-03 | C | | | | | |
| PCV-06 | 1"-CL-107A-CPVC | DTI-03 | C | | | | | |
| PDCV-01 | CL-01 | DTI-01 | P | | | | | |
| PDCV-02 | CL-02 | DTI-02 | P | | | | | |
| PDCV-03 | CL-03 | DTI-03 | P | | | | | |
| PDSH-01 | F-01 | DTI-02 | C | | | | | |
| PDSH-02 | F-02 | DTI-02 | C | | | | | |
| PDSH-03 | F-03 | DTI-02 | C | | | | | |
| PDSH-04 | CCA-01 | DTI-02 | C | | | | | |
| PDSH-05 | CCA-02 | DTI-02 | C | | | | | |
| PDSH-06 | CCA-03 | DTI-02 | C | | | | | |
| PI-01 | 10"-ACR-101-AcC | DTI-01 | C | | | | | |
| PI-02 | 10"-ACR-102-AcC | DTI-01 | C | | | | | |
| PI-03 | 4"-ART-113-AcC | DTI-01 | C | | | | | |
| PI-04 | 4"-ART-114-AcC | DTI-01 | C | | | | | |
| PI-05 | 8"-ACL-104-AcC | DTI-01 | C | | | | | |
| PI-06 | 8"-ACL-105-AcC | DTI-01 | C | | | | | |



| No. TAG | Servicio línea/equipo | Plano no. | Localización | Hoja de datos no. | No. lazo | Ruta eléctrica | Ruta neumática | Observaciones |
|---------|-----------------------|-----------|--------------|-------------------|----------|----------------|----------------|---------------|
| PI-07 | 1"-PQ-101 | DTI-01 | C | | | | | |
| PI-08 | 1"-PQ-102 | DTI-01 | C | | | | | |
| PI-09 | 1"-PQ-103 | DTI-01 | C | | | | | |
| PI-10 | 1½"-ATR-103-AcC | DTI-01 | C | | | | | |
| PI-11 | 1½"-ATR-104-AcC | DTI-01 | C | | | | | |
| PI-12 | CCL-01 | DTI-01 | C | | | | | |
| PI-13 | CCL-01A | DTI-01 | C | | | | | |
| PI-14 | CL-01 | DTI-01 | P | | | | | |
| PI-15 | 1½"-ATR-106-AcC | DTI-01 | C | | | | | |
| PI-21 | 6"-ACL-108-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| PI-22 | 8"-AF-101-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| PI-23 | 6"-ACL-109-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| PI-24 | 6"-AF-102-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| PI-25 | 6"-ACL-110-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| PI-26 | 6"-AF-103-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| PI-27 | 3"-AF-106-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| PI-28 | 3"-AF-107-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| PI-29 | 2½"-AF-125-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| PI-30 | 2½"-AF-126-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| PI-31 | 2"-AF-129-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| PI-32 | 3"-AFC-101-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| PI-33 | 2"-AF-130-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| PI-34 | 2"-AFC-102-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| PI-35 | 2"-AF-131-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| PI-36 | 2"-AFC-103-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| PI-37 | CCL-02 | DTI-02 | C | | | | | |
| PI-38 | CCL-02A | DTI-02 | C | | | | | |



| No. TAG | Servicio línea/equipo | Plano no. | Localización | Hoja de datos no. | No. lazo | Ruta eléctrica | Ruta neumática | Observaciones |
|---------|---|-----------|--------------|-------------------|----------|----------------|----------------|---------------|
| PI-39 | CL-02 | DTI-02 | P | | | | | |
| PI-51 | 6"-AF-111-AcC | DTI-03 | C | | | | | |
| PI-52 | 6"-AF-112-AcC | DTI-03 | C | | | | | |
| PI-53 | 16"-SAE-101-AcC | DTI-03 | C | | | | | |
| PI-54 | 16"-SAE-102-AcC | DTI-03 | C | | | | | |
| PI-55 | BD-06 | DTI-03 | C | | | | | |
| PI-56 | BD-07 | DTI-03 | C | | | | | |
| PI-57 | BD-08 | DTI-03 | C | | | | | |
| PI-58 | BD-09 | DTI-03 | C | | | | | |
| PI-59 | BD-10 | DTI-03 | C | | | | | |
| PI-60 | CCL-03 | DTI-03 | C | | | | | |
| PI-61 | CCL-03A | DTI-03 | C | | | | | |
| PI-62 | CL-03 | DTI-03 | P | | | | | |
| PI-71 | 2"-AR-102 | DTI-03 | C | | | | | |
| PI-72 | 2"-AR-103 | DTI-03 | C | | | | | |
| PI-73 | 2 ¹ / ₂ "-ATR-110-AcC | DTI-03 | C | | | | | |
| PI-74 | 2 ¹ / ₂ "-ATR-111-AcC | DTI-03 | C | | | | | |
| PI-81 | 6"-AF-117-AcC | DTI-04 | C | | | | | |
| PI-82 | 6"-AF-118-AcC | DTI-04 | C | | | | | |
| PI-83 | 6"-ADG-103-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| PI-84 | 6"-ADG-104-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| PI-85 | 2"-ASU-104-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| PI-86 | 2"-ASU-106-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| PI-87 | 2"-SC-102 | DTI-04 | C | | | | | |
| PI-88 | 2"-SC-104 | DTI-04 | C | | | | | |
| PSH-01 | 1 ¹ / ₂ "-ATR-103-AcC | DTI-01 | C | | | | | |
| PSH-02 | 1 ¹ / ₂ "-ATR-104-AcC | DTI-01 | C | | | | | |



| No. TAG | Servicio línea/equipo | Plano no. | Localización | Hoja de datos no. | No. lazo | Ruta eléctrica | Ruta neumática | Observaciones |
|---------|-----------------------|-----------|--------------|-------------------|----------|----------------|----------------|---------------|
| PSL-03 | 1"-CL-101-CPVC | DTI-01 | C | | | | | |
| PSL-04 | 1"-CL-101A-CPVC | DTI-01 | C | | | | | |
| PSL-05 | 1"-CL-104-CPVC | DTI-02 | C | | | | | |
| PSL-06 | 1"-CL-104A-CPVC | DTI-02 | C | | | | | |
| PSL-07 | 1"-CL-107-CPVC | DTI-03 | C | | | | | |
| PSL-08 | 1"-CL-107A-CPVC | DTI-03 | C | | | | | |
| PSV-01 | BD-01 | DTI-01 | C | | | | | |
| PSV-02 | BD-02 | DTI-01 | C | | | | | |
| PSV-03 | BD-03 | DTI-01 | C | | | | | |
| PSV-06 | BD-06 | DTI-03 | C | | | | | |
| PSV-07 | BD-07 | DTI-03 | C | | | | | |
| PSV-08 | BD-08 | DTI-03 | C | | | | | |
| PSV-09 | BD-09 | DTI-03 | C | | | | | |
| PSV-10 | BD-10 | DTI-03 | C | | | | | |
| PSV-16 | BD-04 | DTI-04 | C | | | | | |
| PSV-17 | BD-04A | DTI-04 | C | | | | | |
| PSV-18 | BD-05 | DTI-04 | C | | | | | |
| PSV-19 | BD-05A | DTI-04 | C | | | | | |
| | | | | | | | | |
| TE-01 | BA-08 | DTI-01 | C | | | | | |
| TE-02 | BA-08A | DTI-01 | C | | | | | |
| TI-03 | 16"-SAE-101-AcC | DTI-03 | C | | | | | |
| TI-04 | 16"-RAE-101-AcC | DTI-03 | C | | | | | |
| TSH-01 | BA-08 | DTI-01 | C | | | | | |
| TSH-02 | BA-08A | DTI-01 | C | | | | | |
| | | | | | | | | |
| XV-01 | 6"-ACL-108-AcC | DTI-02 | C | | | | | |



| No. TAG | Servicio línea/equipo | Plano no. | Localización | Hoja de datos no. | No. lazo | Ruta eléctrica | Ruta neumática | Observaciones |
|---------|-----------------------|-----------|--------------|-------------------|----------|----------------|----------------|---------------|
| XV-02 | F-01 | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-03 | F-01 | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-04 | 8"-AF-101-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-05 | 8"-ART-101-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-06 | 6"-ART-102-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-07 | 6"-ACL-111-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-08 | 6"-ACL-109-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-09 | F-02 | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-10 | F-02 | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-11 | 6"-AF-102-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-12 | 6"-ART-103-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-13 | 6"-ART-104-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-14 | 6"-ACL-112-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-15 | 6"-ACL-110-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-16 | F-03 | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-17 | F-03 | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-18 | 6"-AF-103-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-19 | 6"-ART-105-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-20 | 6"-ART-106-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-21 | 6"-ACL-113-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-22 | 2"-AF-129-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-23 | CCA-01 | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-24 | CCA-01 | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-25 | 3"-AFC-101-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-26 | 2"-ART-107-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-27 | 2"-ART-108-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-28 | 2"-AF-132-AcC | DTI-02 | C | | | | | |



| No. TAG | Servicio línea/equipo | Plano no. | Localización | Hoja de datos no. | No. lazo | Ruta eléctrica | Ruta neumática | Observaciones |
|---------|---|-----------|--------------|-------------------|----------|----------------|----------------|---------------|
| XV-29 | 2"-AF-130-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-30 | CCA-02 | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-31 | CCA-02 | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-32 | 2"-AFC-102-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-33 | 2"-ART-109-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-34 | 2"-ART-110-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-35 | 2"-AF-133-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-36 | 2"-AF-131-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-37 | CCA-03 | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-38 | CCA-03 | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-39 | 2"-AFC-103-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-40 | 2"-ART-111-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-41 | 2"-ART-112-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-42 | 2"-AF-134-AcC | DTI-02 | C | | | | | |
| XV-51 | 4"-AF-120-AcC | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-52 | UC-01 | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-53 | UC-01 | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-54 | 6"-ADC-101-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-55 | 6"-ART-116-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-56 | 4"-ART-117-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-57 | 1 ¹ / ₂ "-ASU-107-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-58 | 4"-AF-137-AcC | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-59 | 4"-AF-121-AcC | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-60 | UC-02 | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-61 | UC-02 | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-62 | 4"-ADC-102-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-63 | 4"-ART-118-AcI | DTI-04 | C | | | | | |



| No. TAG | Servicio línea/equipo | Plano no. | Localización | Hoja de datos no. | No. lazo | Ruta eléctrica | Ruta neumática | Observaciones |
|---------|-----------------------|-----------|--------------|-------------------|----------|----------------|----------------|---------------|
| XV-64 | 4"-ART-119-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-65 | 1 1/2"-ASU-108-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-66 | 4"-AF-138-AcC | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-67 | 4"-AF-122-AcC | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-68 | UC-03 | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-69 | UC-03 | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-70 | 4"-ADC-103-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-71 | 4"-ART-120-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-72 | 4"-ART-121-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-73 | 1 1/2"-ASU-109-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-74 | 4"-AF-139-AcC | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-75 | 4"-ADG-107-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-76 | UA-01 | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-77 | UA-01 | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-78 | 6"-ADM-101-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-79 | 4"-ART-122-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-80 | 4"-ART-123-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-81 | 1 1/2"-SC-105 | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-82 | 4"-ADG-110-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-83 | 4"-ADG-108-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-84 | UA-02 | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-85 | UA-02 | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-86 | 4"-ADM-102-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-87 | 4"-ART-124-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-88 | 4"-ART-125-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-89 | 1 1/2"-SC-106 | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-90 | 4"-ADG-111-AcI | DTI-04 | C | | | | | |



| No. TAG | Servicio línea/equipo | Plano no. | Localización | Hoja de datos no. | No. lazo | Ruta eléctrica | Ruta neumática | Observaciones |
|---------|--|-----------|--------------|-------------------|----------|----------------|----------------|---------------|
| XV-91 | 4"-ADG-109-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-92 | UA-03 | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-93 | UA-03 | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-94 | 4"-ADM-103-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-95 | 4"-ART-126-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-96 | 4"-ART-127-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-97 | 1 ¹ / ₂ "-SC-107 | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-98 | 4"-ADG-112-AcI | DTI-04 | C | | | | | |
| XV-101 | 2"-PRL-101-AcC | DTI-01 | C | | | | | |
| XV-102 | 4"-PRT-101-AcC | DTI-03 | C | | | | | |
| | | | | | | | | |
| WSH-01 | CLF-01 | DTI-01 | C | | | | | |



7. CONCLUSIONES.

Durante el desarrollo del presente trabajo se ha generado una estructura para incorporar, bajo un esquema normalizado y con una serie de premisas operacionales asociadas a las buenas prácticas de ingeniería, un tratamiento de agua; resulta inevitable pensar, -y con razón-, que el conjunto de condiciones que atañen a un proceso en particular es diferente de las condiciones y características de otro proceso; pero es eso precisamente lo que constituye el reto para la elaboración de un proyecto de ingeniería, y es eso lo que hace necesaria la incorporación y desarrollo diario de nuevas tecnologías.

Consciente de lo anterior, la pretensión del presente trabajo fue proporcionar algunas de las herramientas e ideas asociadas al análisis y recopilación bibliográfica hecha. Los fundamentos teóricos vertidos y las prácticas de ingeniería aceptadas, dan un matiz peculiar a cada uno de los capítulos.

Partiendo del proceso en su forma más pura, he pretendido ligar dos de las cuestiones de mayor importancia en la operación de cualquier planta química: la medición y el control de las variables que intervienen en el sistema; la descripción si bien no ha sido del todo amplia, pues muchos de los argumentos matemáticos que sustentan a ambos conceptos no se han incluido, pero huelga decir que se ha ganado en simplicidad para la comprensión de conceptos; el esfuerzo del capítulo 4 estriba básicamente en la compilación de los equipos utilizados para la medición de las variables, y como se pueden aplicar a cierto proceso o condición en la operación. Hay muchas formas de combinar los elementos primarios de medición; sin embargo, las tablas y razonamientos vertidos en el capítulo 4 son de utilidad para hacer la mejor selección; a esto habría que agregar el factor costo, el cual pudiera ser en determinado momento un elemento de peso y preponderante en la elección del elemento de medición, pero es importante señalar que las buenas prácticas de ingeniería inducen a que lo óptimo técnicamente, es lo que conviene al sistema.

El capítulo 5 resulta apasionante por el significado que representa para un proceso. Las consideraciones teóricas que plasmé en el citado artículo, considero que representan un resumen excelente de los modos de control y el modo en que actúan en las variables. Mucho se ha dicho con respecto a los algoritmos de control PID, y mucho se ha manejado en relación a las estrategias para inducir controles más precisos; sin embargo, -y como quizá lo aprecie el lector-, visto desde el enfoque mostrado en el apartado 5, resulta sumamente fácil la comprensión de cada uno de los conceptos.

Un aspecto fundamental en la estructura de una ingeniería básica, lo constituyen los documentos entregables por las disciplinas participantes; estos dependen de las responsabilidades y acotaciones que cada una de las áreas tenga dentro de un proyecto específico. Históricamente, el área de proceso ha sido la encargada de generar documentos tales como diagramas de flujo de proceso, diagramas de tuberías e instrumentación, especificaciones y cálculo de equipos, dimensionamiento de líneas y selección de materiales de construcción.

El capítulo 6 ha presentado, una vez definidas cada una de las partes integrantes del proceso y sus problemáticas, una metodología para elaborar los diagramas de tuberías e instrumentación concernientes. Las conclusiones al respecto resultarían superficiales, debido a que el procedimiento utilizado no es único ni mucho menos limitativo. Baste decir que es uno de tantos caminos con los cuales se puede bosquejar gráficamente la descripción de un proceso.

Anexo a los diagramas de tuberías e instrumentación, la filosofía de control plasmada permite cotejar y reforzar cada uno de los conceptos, además de justificar mediante los argumentos desarrollados en los capítulos anteriores, las consideraciones y toma de decisiones expresadas en los DTI's.

Hablando de la selección realizada, se ha podido percibir que, aún cuando la caracterización y las condiciones de operación no constituyen un esquema real, resulta apropiado el tratamiento.

En primer lugar, se comentó la necesidad de realizar una desinfección en línea con cloro gas a la entrada del complejo, y se sustentó este argumento al mencionar lo dañino que resulta para el proceso la presencia de coliformes y proliferación de organismos biológicos en líneas y equipos. La instrumentación propuesta para este sistema resulta óptima en función de que la dosificación del gas depende de la cantidad de flujo y de la cantidad de cloro residual presente en la línea.



Los sistemas de cloración propuestos para la alimentación de agua a uso doméstico y circuitos de enfriamiento siguen el mismo principio, considerando los gastos requeridos y las partes por millón presentes en las correspondientes líneas.

La desinfección con luz ultravioleta no se aplicó debido a que la calidad requerida para estos usuarios no es muy exigida, ni aún para uso doméstico. Además, evaluando los distintos inconvenientes (entre ellos el de sombreado y costo-beneficio comparado con la cloración), se decidió no incorporar esta tecnología.

La remoción de sólidos suspendidos contempló una primera fase de desbaste, mediante un proceso de decantación acompañado de adición de químicos, para inducir mayor eficiencia en la separación. En el clarifloculador se instaló un medidor de turbidez enlazado a un control que, en base a los NTU's detectados, definirá la cantidad de coagulante y floculante para una buena remoción.

Se propuso la instalación de instrumentos para la medición y control de flujo, dada la importancia de esta variable para la operación óptima del equipo. También se consideró la medición de nivel de lodos para la purga del equipo, una vez alcanzado el set point determinado.

El proceso de filtración a presión se concluyó como el más apropiado, dadas las características de la corriente hasta este punto, y tanto en la filosofía como en el diagrama de tuberías e instrumentación se explicó la manera como el PLC controlaría las secuencias de cierre y apertura de las válvulas, para las operaciones de enjuague, retrolavado y trabajo normal de filtrado.

El proceso de filtrado por columnas de adsorción de carbón activado se justificó dada la calidad requerida en el agua a uso doméstico. La secuencia de cierre y apertura de válvulas también fue controlada de manera automática por el PLC.

Una propuesta aventurada la constituyó la unidad desmineralizadora, la cual fue escogida dadas las condiciones de contaminación más críticas; el arreglo elegido fue para corrientes con altas concentraciones de bicarbonatos (alcalinidad), dureza (calcio y magnesio), sulfatos y cloruros, además de sílice. Como en los filtros a presión y las columnas de adsorción, el proceso de control de válvulas para la operación de enjuague, retrolavado y regeneración de las resinas, fue controlado por el PLC.

Finalmente, se destinó un espacio a la descripción de un sistema para el tratamiento de grasas y aceites generadas en el complejo, seleccionándose un separador de placas corrugadas, dada la eficiencia y calidad requeridas.

Para concluir esta obra, le resultará enriquecedor al lector si así lo desea, verificar -remitiéndose a la descripción hecha en el capítulo 4 -, que todos los elementos primarios de medición propuestos, sean de flujo, nivel, presión, temperatura o análisis, son los apropiados y más recomendables para que el funcionamiento de la planta, -que comienza con la medición de las variables del proceso- tome un cauce agradable y propio de un excelente diseño.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.



Capítulo 2

- Control Magazine.
"100 Years of Automatization"
December, 1999, pág. 1-70.

Capítulo 3

- Degrémont
"Water treatment handbook"
Jhon Wiley and Sons, 1979, cap. 5, 6, 7.
- Ingeniería de aguas residuales
"Tratamiento, vertido y reutilización"
Metcalf and Eddy
Mc Graw Hill, tomo 1
- Metcalf and Eddy, Inc.
"Wastewater Engineering"
Mc Graw Hill, pag. 470-496.
- Nalco Chemical Company
"Manual del agua, su naturaleza, tratamiento y aplicación"
Kemmer N., Frank., McCallion, John
Mc Graw Hill, tomo 1, cap. 8, 9, 10.
- Ondeo Degrémont
"Aquarey 40 VLS"
December, 2001
- Procedimiento departamental de proceso, Bufete Industrial.
"Tratamiento de agua en plantas industriales"
Lucio, M.A.
Abril, 1999
- Tebbutt, T. H. Y.
"Fundamentos de control de la calidad del agua"
Limusa, tomo 1, 1994, cap. 11, 12.
- acsmedioambiente.com
- aguabonart.com
- agualatinoamerica.com
- aguamarket.com
- econext.com



Capítulo 4

- Crane
"Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías", pag. 1-1 a 1-13
- Fisicoquímica
Castellan W. Gilbert
Addison-Wesley Iberoamericana 2da edición, 1987, pag. 98-135.
- Instrumentación, análisis dinámico y control de procesos.
Delgadillo V., Miguel A.
Universidad Nacional Autónoma de México, Febrero 2001 cap. 2.
- Química. Curso universitario.
Mahan M., Bruce, Myers J., Rollie.
Addison-Wesley Iberoamericana 4ta edición, 1990, pag. 327-342.

Capítulo 5

- Basic process control
"Technical Data"
Grader E., Jerome
Taylor Instrument Companies.
- Flow data
"Selection and application"
Grader E., Jerome
Taylor Instrument Companies.
- Ingeniería de control automático
Nacif Narchi, José
Industria Gráfica Editorial Mexicana, tomos 1 y 2, 1981.
- Instrumentation for process measurement and control
Anderson A., Norman
Chilton Book Company 2nd edition 1972, pag. 17-60.
- Section 2 "Feedforward Control"
Training Center, ABB Taylor Instrument.

Capítulo 6

- Standard ISA S-5.1
"Instrumentation symbols and identification".
Instrument Society of America, 1984.
- Engineering design for process facilities
Mansfield, Scott
Mc Graw-Hil, Inc 1993, chapter 11.



DEFINICIÓN DE TÉRMINOS.



Ácidos débiles. No se disocian por completo en solución, es decir no desprenden la totalidad de iones H^+ .

Ácidos fuertes. Aquellos que se disocian por completo en solución, produciendo un mol de H^+ por mol de ácido.

Actuador. Dispositivo de una válvula de control cuya finalidad es la de impartir fuerza al vástago para que la válvula abra o cierre.

Adsorción. Es un proceso por el cual moléculas con impurezas se adhieren a la superficie de sustancias porosas mediante atracciones electroquímicas.

Agua cruda. Aquella proveniente de lagos, ríos y manantiales, la cual se caracteriza por ser turbia, tener color, olor y mal sabor, además de presentar gran cantidad de bacterias, por lo cual no es apta para el consumo humano ni para ser utilizada en la industria.

Alcalinidad. Es la habilidad para absorber ácidos y se determina por titulación en dos etapas; la cantidad de ácido necesaria para disminuir el valor de pH hasta el punto final de la fenolftaleína (8.2 aproximadamente) es llamada alcalinidad P, y la cantidad de ácido necesaria para disminuir el valor de pH hasta el punto final del anaranjado de metilo (4 aproximadamente) es llamada alcalinidad M o alcalinidad total. Cuando ambas son conocidas es posible calcular las concentraciones de iones hidrógeno, carbonato y bicarbonato.

Banda proporcional. Ajuste que presentan los controladores que utilizan modo de control proporcional y que se refiere al por ciento en la escala del instrumento necesario para que el elemento final de control pase de la posición "cerrado" a la posición "abierto".

Base débil. No se disocia completamente en solución, es decir, desprende pocos iones OH^- .

Base fuerte. Se disocia completamente en solución, es decir, desprende gran cantidad de iones OH^- .

Calor. El medio por el cual se cambia la energía de un sistema debido a una diferencia de temperatura entre dos sustancias.

Capacidad calorífica. Cantidad de calor requerida para elevar $1^{\circ}C$ o $1^{\circ}K$ la temperatura de un mol de materia.

Circuito de control. Es un conjunto de instrumentos en unión con un proceso, arreglados de manera que el proceso pueda ser controlado asegurando la estabilidad de un sistema.

Coagulación. Tiene por objeto agrupar a las partículas coloidales dispersas en el agua y formar conglomerados más voluminosos y pesados que puedan ser separados más fácilmente del agua, por simple precipitación o bien por procesos de filtrado convencional.

Mediante el proceso de coagulación se neutraliza la carga eléctrica superficial del coloide anulando las fuerzas electrostáticas repulsivas. Esta neutralización suele efectuarse añadiendo al agua coagulantes químicos y llevando a cabo el mezclado mediante agitación vigorosa para asegurar un contacto rápido de las partículas coloidales con el agente coagulante

Conductividad. La habilidad para conducir electricidad de cierto material por unidad de longitud y área. Las unidades más comúnmente usadas son $\mu mhos/cm$.



Controlador. Parte inteligente de un circuito de control donde se detecta la desviación de la variable controlada recibida desde el transmisor, con respecto al punto de ajuste; después esta desviación es tratada matemáticamente para enviar una señal al elemento final de control con el propósito de eliminar la desviación que tenga la variable controlada del punto de ajuste

Declaración. Consiste en la eliminación de la totalidad del cloro combinado y cloro residual presente en el agua después del proceso de desinfección con cloro.

Densidad. Propiedad que presentan los fluidos expresada como peso o masa por unidad de volumen. Es función de la presión y temperatura.

Demanda de cloro. Variación entre el nivel de cloro teórico alcanzado luego de la dosificación y el nivel de cloro residual y es importante que esta se encuentre en valores adecuados para una desinfección eficaz.

Desinfección de agua. Reducción de la concentración de patógenos a niveles no infecciosos.

Diagrama de bloques. Bosquejo en el cual se plasma en cajas o bloques la secuencia de un proceso junto con los requerimientos básicos.

Diagrama de flujo de proceso. Bosquejo en el cual se muestra la secuencia y el equipo pertinente a usar en un proceso, además de la información de cada una de las corrientes que lo constituyen.

Diagrama de tuberías e instrumentación. Bosquejo en el cual se plasman las secuencias detalladas de los procesos, equipos y tuberías, además de los instrumentos para la medición y control de las variables del proceso.

Dureza. Se refiere a las sales de calcio y magnesio disueltas en el agua y se expresa en ppm (mg/l) de CaCO_3 . Existe dureza bicarbonatada o temporal la cual es equivalente a la alcalinidad M y dureza no bicarbonatada o permanente.

Electrolitos. Sustancias que en solución conducen la electricidad.

Elemento final de control. Es el componente de un circuito de control que recibe la señal del equipo de control con la cual altera la relación de materia y/o energía que entra modificando así el valor de la variable controlada para corregir las desviaciones de esta variable con respecto al punto de ajuste.

Elemento primario de medición. Es el dispositivo de un circuito de control que detecta el valor de las variables del proceso.

Error o variación en una medición. Diferencia existente entre el valor del punto de ajuste y el valor de la variable de proceso medida.

Filtración. Es una separación sólido-líquido en la cual se hace pasar el líquido a través de un medio poroso con el objeto de remover la mayor cantidad de sólidos suspendidos como sea posible.

Floculación. Aglomeración de partículas neutralizadas eléctricamente con la finalidad de inducir el crecimiento y fortalecer mecánicamente los floculos de forma que puedan resistir cierto nivel de turbulencia

Fluido. Sustancias que tienen la capacidad de fluir y conformarse a la forma del recipiente que las contiene.



Fluido Newtoniano. Aquel que presenta una viscosidad constante a una temperatura dada, prescindiendo de la velocidad de corte.

Flujo de transición. El flujo que presenta las características de flujo laminar y turbulento y está comprendido entre los valores del número de Reynolds de 2000 y 4000.

Flujo laminar. Aquel en donde la velocidad del fluido es máxima en el eje de la tubería y disminuye rápidamente hasta anularse en la pared. Los valores del número de Reynolds debajo de 2000 caracterizan este tipo de régimen.

Flujo turbulento. Aquel en donde existen movimientos irregulares e indeterminados de las partículas del fluido en direcciones transversales a la dirección principal del flujo; la distribución de velocidades en el régimen turbulento es más uniforme a través del diámetro de la tubería que en régimen laminar. Los valores del número de Reynolds mayor a 4000 caracterizan este tipo de régimen.

Ganancia de un controlador. El recíproco del valor de la banda proporcional.

Medición local. Consiste en conocer el valor de una variable de proceso mediante la ayuda de instrumentos ya sea indicadores o registradores colocados en campo junto al proceso en donde el operador lee directamente.

Medición remota. Consiste en conocer el valor de una variable de proceso mediante la ayuda de instrumentos ya sea indicadores o registradores colocados en el cuarto de medición y control en donde el operario lee el valor de las variables de proceso de manera lejana, ya que los sensores de medición de estos instrumentos están colocados en campo junto a los equipos de proceso.

Microorganismo. Gérmenes patógenos que difieren en forma y ciclo de vida, pero son semejantes por su pequeño tamaño y simple estructura relativa. Los cinco grupos principales son virus, bacterias, hongos, algas y protozoarios.

Número de Reynolds. El comportamiento dinámico de los fluidos depende de las magnitudes relativas de las fuerzas de fricción e inerciales. Las fuerzas de fricción son dominantes en corrientes que fluyen a bajas velocidades y tienden a producir flujos laminares; las fuerzas inerciales son mayores cuando las velocidades son altas y producen comportamientos turbulentos. El número de Reynolds es un parámetro adimensional que resulta de relacionar estas fuerzas.

Oxidación. En electroquímica se entiende por oxidación la pérdida de electrones de un reactivo en una reacción química.

Peso específico. Es una medida relativa de la densidad y se obtiene de la relación de la densidad a cierta temperatura de un líquido con la densidad del agua a 15°C.

Polarización. Efecto electroquímico ocasionado por el paso de corriente eléctrica a través de una solución y que de no minimizarse puede ocasionar errores en las mediciones.

Posicionador. Es un accesorio que llevan la mayoría de las válvulas y cuya finalidad es la de cerciorarse de que la válvula se coloque donde lo manda el controlador.

Presión. La fuerza creada por los fluidos sobre una superficie. La unidad de medición es fuerza por unidad de área.



Presión atmosférica. El peso de una columna de aire contenida en una pulgada cuadrada arriba de la superficie de la tierra. La presión atmosférica normalizada es 1.01325 bar (14.696 libras/pulg².) o 760 mm de mercurio.

Presión manométrica. Es la presión medida por encima de la presión atmosférica.

Punto de ajuste. Es un valor deseado que se fija con anticipación y que sirve de referencia en una medición para que el controlador haga los ajustes necesarios mediante comparar este con el valor de la variable de proceso que está siendo medida.

Reajuste automático (r). Se refiere al número de veces que la acción de reajuste automático reproduce lo que la acción proporcional haría por si sola. Se expresa en repeticiones por minuto (rep/min)

Reducción. En electroquímica se entiende por reducción la ganancia de electrones de un reactivo en una reacción química.

Resinas de intercambio iónico. Son utilizadas para modificar la química del agua mediante remover iones indeseables presentes en esta, sustituyéndolos con un número equivalente de iones amigables.

Sólidos disueltos totales. Son una medida de la cantidad total de materia disuelta determinada por evaporación.

Sólidos suspendidos totales. Son una medida de la cantidad total de materia no disuelta determinada gravimétricamente.

Sólidos totales. La suma de los sólidos disueltos totales y los sólidos suspendidos totales.

Temperatura. Concepto relacionado con la habilidad de un sistema para intercambiar energía calorífica, así, un cuerpo con temperatura mayor o más caliente será capaz de transmitir calor a otro cuerpo con menor temperatura o menos caliente.

Tiempo muerto. Es el tiempo que tarda el elemento primario de medición en responder, esto es, el tiempo en que se detectan los cambios en la variable de proceso.

Tiempo de respuesta. Es el tiempo que tarda el elemento primario de medición en detectar el 63.2% de la variable de proceso.

Transductor. Dispositivo dentro de un circuito de control cuyo propósito es el de convertir la señal eléctrica de 4 a 20 mili amperes proveniente del controlador en una señal neumática de 3 a 15 psig.

Transmisor. Es el dispositivo que convierte la señal detectada por el elemento primario en unidades del proceso (nivel, presión, presión diferencial, etc.), en una señal estándar en unidades de presión (3 a 15 lb/in²) o eléctrica (4-20 mA CD) con el propósito de enviarse al controlador a una distancia más o menos considerable (generalmente mayor de 30 m), sin que la señal se degenere o deforme.

Trabajo. El medio por el cual se cambia la energía de un sistema mecánico.

Turbidez. La turbidez en el agua es el resultado de la dispersión y absorción de la luz por los sólidos suspendidos. La unidad de medición son las unidades de turbidez (NTU's).



Vacio. Es la depresión por debajo del nivel atmosférico. La referencia a las condiciones de vacío se hace a menudo expresando la presión absoluta en términos de altura de columna de agua o de mercurio.

Variadores de frecuencia. Dispositivos colocados en los motores de bombas con el propósito de sustituir o apoyar la operación de los elementos finales de control, ya que el uso de estos variadores de frecuencia ahorra el gasto de energía eléctrica que requieren las bombas de velocidad constante.

Viscosidad absoluta o dinámica. La medida de la resistencia de un fluido al desplazamiento o a cambiar de forma. La unidad de medición comúnmente usada es el centipoise (cP).

Viscosidad cinemática. Es el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad de un fluido. La unidad de medición comúnmente usada es el centistoke (cS).



ANEXO A. DIAGRAMAS DE TUBERÍAS E INSTRUMENTACIÓN.

AG-01
 AGITADOR
 SERVICIO: MEZCLADO DE SOLUCIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO
 POT: HP
 MOTOR ELÉCTRICO
 MAT: ACERO AL CARBÓN

AG-02
 AGITADOR
 SERVICIO: MEZCLADO DE SOLUCIÓN DE POLIELECTROLITO
 POT: HP
 MOTOR ELÉCTRICO
 MAT: ACERO AL CARBÓN

AG-03
 AGITADOR
 SERVICIO: MEZCLADO DE SOLUCIÓN DE LODOS CON POLIELECTROLITO
 POT: HP
 MOTOR ELÉCTRICO
 MAT: ACERO AL CARBÓN

BA-01/01A
 BOMBAS CENTRIFUGAS VERTICALES
 SERVICIO: SUMINISTRO AGUA CRUDA
 Q: GPM (m³/h) c/u
 P.DESC: lb/in² (kg/cm²)
 POT: HP
 MOTOR ELÉCTRICO
 MAT: ACERO AL CARBÓN

BA-02/02A
 BOMBAS CENTRIFUGAS VERTICALES
 SERVICIO: SUMINISTRO AGUA RECUPERADA
 Q: GPM (m³/h) c/u
 P.DESC: lb/in² (kg/cm²)
 POT: HP
 MOTOR ELÉCTRICO
 MAT: ACERO AL CARBÓN

BA-03/03A
 BOMBAS CENTRIFUGAS HORIZONTALES
 SERVICIO: SUMINISTRO AGUA CLARIFICADA
 Q: GPM (m³/h) c/u
 P.DESC: lb/in² (kg/cm²)
 POT: HP
 MOTOR ELÉCTRICO
 MAT: ACERO AL CARBÓN

BA-08/08A
 BOMBAS DE CAVIDAD PROGRESIVA
 SERVICIO: BOMBEO DE LODOS A FILTRO PRENSA
 Q: GPM (m³/h) c/u
 P.DESC: lb/in² (kg/cm²)
 POT: HP
 MOTOR ELÉCTRICO
 MAT: ACERO AL CARBÓN

BD-01
 BOMBA DOSIFICADORA DE SULFATO DE ALUMINIO
 Q: GPM (l/h)
 POT: HP
 MOTOR ELÉCTRICO
 MAT DIAFRAGMA:

BD-02
 BOMBA DOSIFICADORA DE SULFATO DE ALUMINIO
 Q: GPM (l/h)
 POT: HP
 MOTOR ELÉCTRICO
 MAT DIAFRAGMA:

BD-03
 BOMBA DOSIFICADORA DE POLIELECTROLITO
 Q: GPM (l/h)
 POT: HP
 MOTOR ELÉCTRICO
 MAT DIAFRAGMA:

CCL-01/01A
 CILINDROS DE GAS
 SERVICIO: ALMACENAMIENTO DE GAS CLORO PARA AGUA CRUDA
 CAP: lb (kg) c/u
 MAT: ACERO AL CARBÓN

CL-01
 EQUIPO DE CLORACIÓN
 SERVICIO: DOSIFICACIÓN DE CLORO PARA AGUA CRUDA
 CAP: lb/hr (kg/hr)

CLF-01
 CLARIFICADOR
 SERVICIO: CLARIFICACIÓN DE AGUA CRUDA
 CAP: GPM (m³/h)
 D: ft (m)
 H: ft (m)
 MAT: ACERO AL CARBÓN

EY-01
 EYECTOR
 SERVICIO: MEZCLADO DE CLORO Y AGUA DE AYUDA

FC-01
 FOSA DE CAPTACIÓN
 SERVICIO: ALMACENAMIENTO DE AGUA RECUPERADA
 CAP: Gal (m³)
 D: ft (m)
 H: ft (m)
 T. RESIDENCIA: min
 MAT: CONCRETO

FC-02
 FOSA DE CAPTACIÓN
 SERVICIO: ALMACENAMIENTO DE LODOS Y POLIELECTROLITO
 CAP: Gal (m³)
 D: ft (m)
 H: ft (m)
 T. RESIDENCIA: min
 MAT: CONCRETO

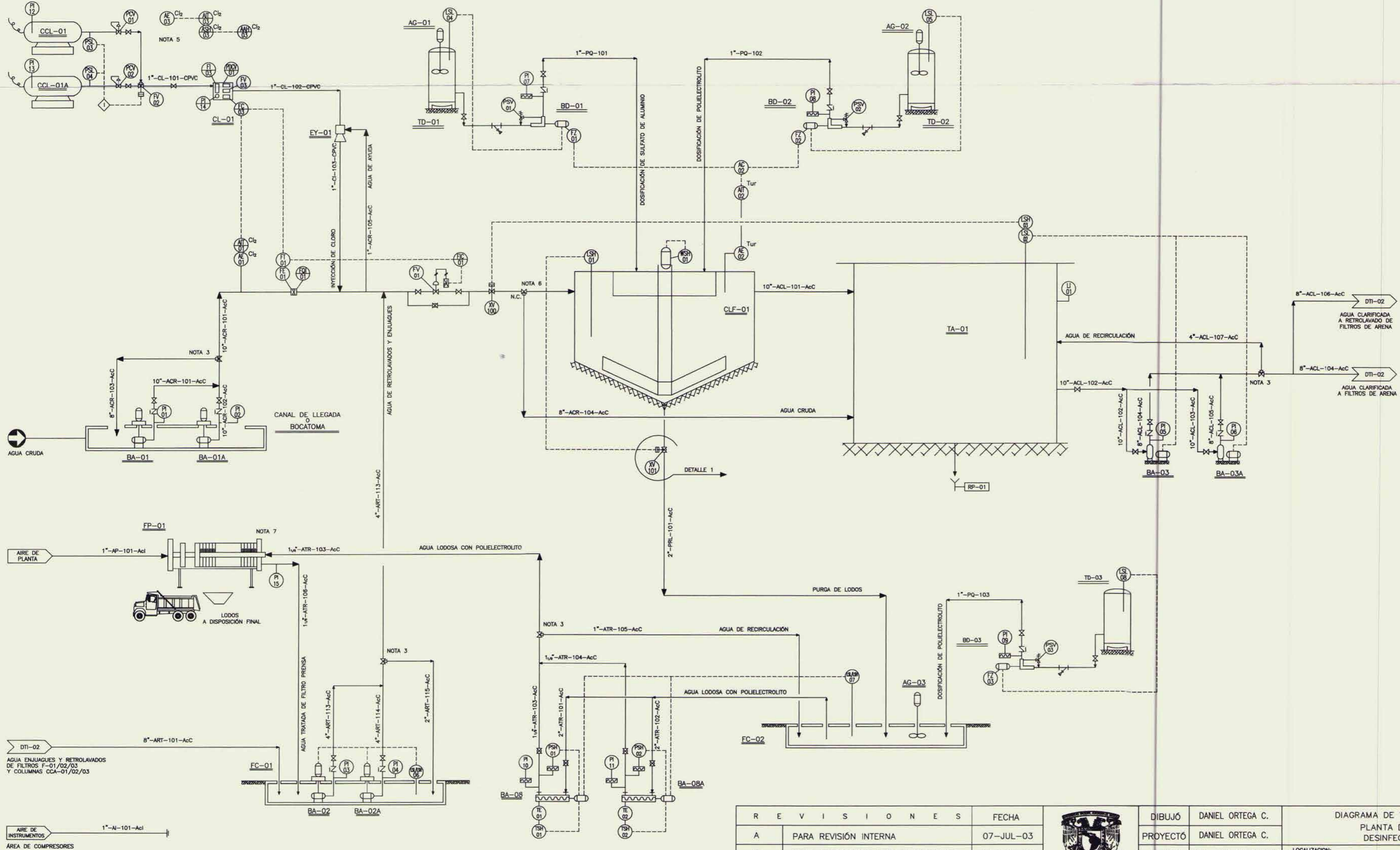
FP-01
 FILTRO PRENSA
 SERVICIO: DESHIDRATACIÓN DE LODOS
 CAP: GPM (m³/h)
 D: ft (m)
 H: ft (m)
 T. RESIDENCIA: min
 MAT: ACERO AL CARBÓN

TA-01
 TANQUE
 SERVICIO: ALMACENAMIENTO DE AGUA CLARIFICADA
 CAP: Gal (m³)
 D: ft (m)
 H: ft (m)
 T. RESIDENCIA: min
 MAT: ACERO AL CARBÓN

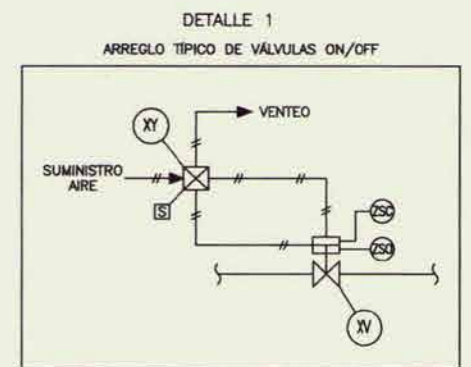
TD-01
 RECIPIENTE ATMOSFÉRICO
 SERVICIO: ALMACENAMIENTO DE SULFATO DE ALUMINIO
 CAP: Gal (m³)
 D: ft (m)
 H: ft (m)
 T. RESIDENCIA: min
 MAT: PLÁSTICO

TD-02
 RECIPIENTE ATMOSFÉRICO
 SERVICIO: ALMACENAMIENTO DE POLIELECTROLITO
 CAP: Gal (m³)
 D: ft (m)
 H: ft (m)
 T. RESIDENCIA: min
 MAT: PLÁSTICO

TD-03
 RECIPIENTE ATMOSFÉRICO
 SERVICIO: ALMACENAMIENTO DE POLIELECTROLITO
 CAP: Gal (m³)
 D: ft (m)
 H: ft (m)
 T. RESIDENCIA: min
 MAT: PLÁSTICO



- NOTAS.**
- Para simbología de equipo e instrumentos ver plano de simbología número:
 - Para referencia de ruta de tuberías y arreglos de equipo ver plano número:
 - Válvula de recirculación calibrada para un exceso en el % de la presión de diseño.
 - Todas las bombas cuentan con su botonera de arranque /paro local al pie de la bomba.
 - Detector de fugas de gas cloro.
 - Se cambia el puerto de válvula en caso de contingencia o por mantenimiento en el clarificador.
 - La operación del filtro prensa es semiautomática.
 - Abreviaturas utilizadas:
 - AcC: Acero al carbón
 - AcI: Acero inoxidable
 - ACL: Agua clarificada
 - ACR: Agua cruda
 - AI: Aire de instrumentos
 - AP: Aire de planta
 - ART: Agua de retrolavados y enjuagues
 - ATR: Agua tratada
 - CAP: Capacidad
 - CL: Cloro
 - D: Diámetro
 - H: Altura
 - MAT: Material
 - N.C.: Normalmente cerrada
 - P.DESC.: Presión de descarga
 - POT: Potencia
 - PQ: Producto químico
 - PRL: Purga de lodos
 - Q: Gasto o caudal
 - RP: Registro de drenaje pluvial
 - Tresidencia: Tiempo de residencia
 - Tur: Turbidez
 - Identificación de líneas:
 - Servicio de la línea
 - Material o especificación de la tubería
 - Número consecutivo de línea
 - Diámetro de la tubería



| REVISIONES | | FECHA | DIBUJÓ | DANIEL ORTEGA C. | DIAGRAMA DE TUBERÍAS E INSTRUMENTACIÓN | |
|------------|---------------------------------|-----------|----------|---------------------|---|--------------|
| A | PARA REVISIÓN INTERNA | 07-JUL-03 | PROYECTÓ | DANIEL ORTEGA C. | PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA DESINFECCIÓN Y PRETRATAMIENTO | |
| B | PARA APROBACIÓN Y/O COMENTARIOS | 23-ENE-04 | REVISÓ | ING. JUAN JOSÉ RUIZ | LOCALIZACIÓN: | DIAGRAMA No. |
| O | APROBADO PARA DISEÑO FINAL | 07-JUL-04 | APROBÓ | - | PROYECTO: | DTI-01 |
| | | | | | | REV. |
| | | | | | | 0 |



| | | | | | | | |
|--|---|--|---|---|--|--|--|
| BA-04/04A BOMBAS CENTRIFUGAS HORIZONTALES SERVICIO: SUMINISTRO DE AGUA A RED C.I. D: GPM (m3/h) c/u P.DESC: lb/in2 (kg/cm2) POT: HP MOTOR ELÉCTRICO MAT: ACERO AL CARBÓN | BA-07/07A BOMBAS CENTRIFUGAS HORIZONTALES SERVICIO: SUMINISTRO DE AGUA A COLUMNAS DE MAT. ORGÁNICA D: GPM (m3/h) c/u P.DESC: lb/in2 (kg/cm2) POT: HP MOTOR ELÉCTRICO MAT: ACERO AL CARBÓN | CCA-01/02/03 COLUMNAS DE ADSORCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO SERVICIO: ELIMINACIÓN DE MAT. ORGÁNICA CAP: GPM (m3/h) c/u D: ft (m) H: ft (m) Vol. CARBÓN: ft3 (m3) c/u P.OP: lb/in2 (kg/cm2) MAT: ACERO AL CARBÓN | CCL-02/02A CILINDROS DE GAS SERVICIO: ALMACENAMIENTO DE GAS CLORO PARA USO DOMÉSTICO CAP: lb (kg) c/u MAT: ACERO AL CARBÓN | CL-02 EQUIPO DE CLORACIÓN SERVICIO: DOSIFICACIÓN DE CLORO PARA AGUA DE USO DOMÉSTICO CAP: lb/hr (kg/hr) | EY-02 EYECTOR SERVICIO: MEZCLADO DE CLORO Y AGUA DE AYUDA | F-01/02/03 FILTROS DE ARENA A PRESIÓN SERVICIO: FILTRACIÓN DE AGUA CAP: GPM (m3/h) c/u D: ft (m) H: ft (m) Vol. ARENA: ft3 (m3) c/u P.OP: lb/in2 (kg/cm2) MAT: ACERO AL CARBÓN | TA-02 TANQUE SERVICIO: ALMACENAMIENTO DE AGUA FILTRADA CAP: Gal (m3) D: ft (m) H: ft (m) T. RESIDENCIA: min MAT: ACERO AL CARBÓN |
|--|---|--|---|---|--|--|--|

NOTAS.

- Para simbología de equipo e instrumentos ver plano de simbología número:
- Para referencia de ruta de tuberías y arreglos de equipo ver plano número:
- Válvula de recirculación calibrada para un exceso en el % de la presión de diseño.
- Todas las bombas cuentan con su botonera de arranque /para local al pie de la bomba.
- Detector de fugas de gas cloro.
- Las válvulas solenoides para las válvulas ON/OFF de filtros de arena a presión y columnas de adsorción con carbón activado se deberán instalar en gabinetes como sigue:

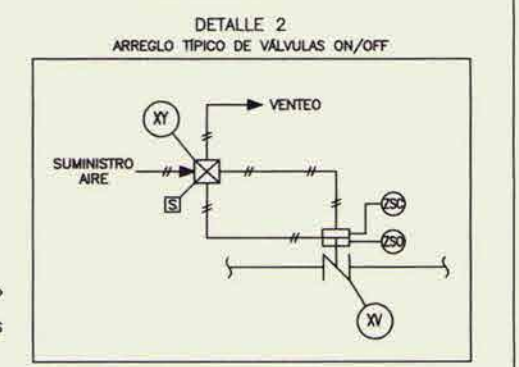
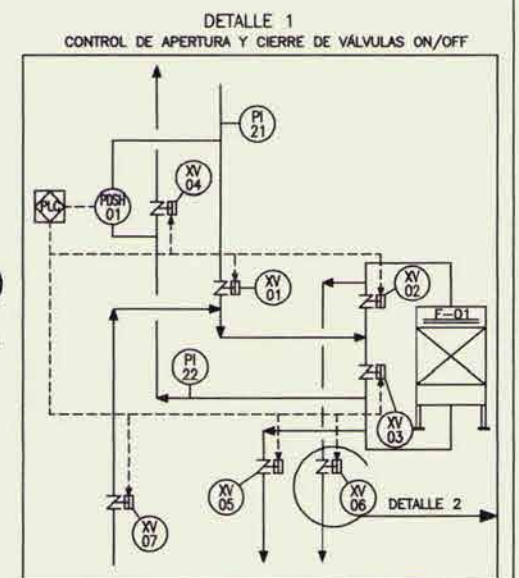
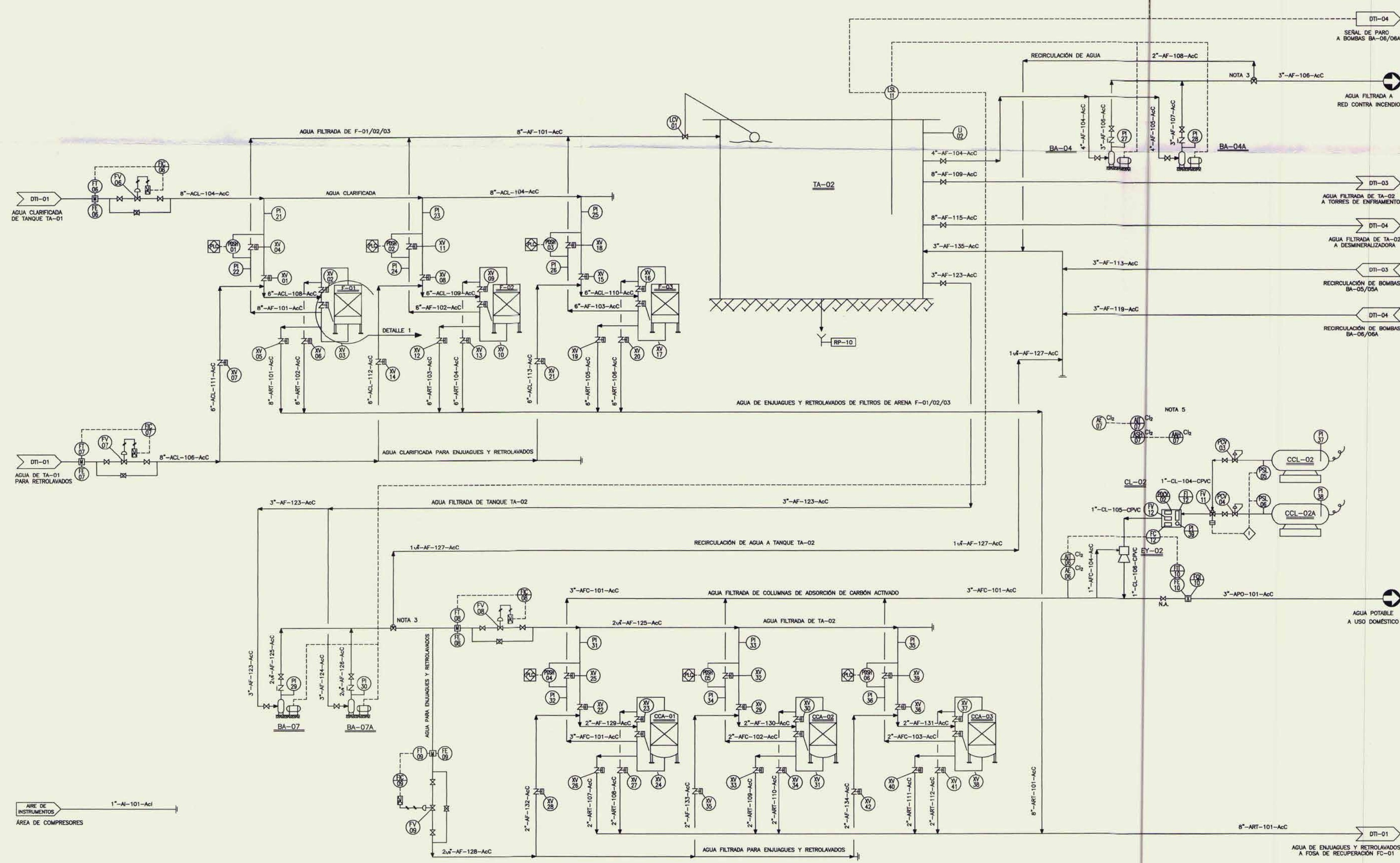
| Gabinete | Válvulas solenoides | Filtro/columna |
|----------|----------------------------|----------------|
| GBT-01 | XY-01, XY-02, XY-03 | F-01 |
| | XY-04, XY-05, XY-06, XY-07 | F-02 |
| | XY-11, XY-12, XY-13, XY-14 | F-03 |
| GBT-02 | XY-15, XY-16, XY-17 | CCA-01 |
| | XY-18, XY-19, XY-20, XY-21 | CCA-02 |
| | XY-22, XY-23, XY-24 | CCA-03 |
| | XY-25, XY-26, XY-27, XY-28 | |
| | XY-29, XY-30, XY-31 | |
| | XY-32, XY-33, XY-34, XY-35 | |
| | XY-36, XY-37, XY-38 | |
| | XY-39, XY-40, XY-41, XY-42 | |

- La secuencia de cierre y apertura de las válvulas ON/OFF de filtros de arena a presión y columnas de adsorción con carbón activado se controlará con un PLC de la siguiente manera:

| | Válvulas solenoides (Filtro F-01) | | | | | |
|------------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | XY-01 | XY-02 | XY-03 | XY-04 | XY-05 | XY-06 |
| Operación normal | Abre | Abre | Cierra | Abre | Cierra | Cierra |
| Retrolavado | Cierra | Cierra | Abre | Cierra | Cierra | Abre |
| Enjuague | Cierra | Abre | Cierra | Cierra | Abre | Abre |

- Abreviaturas utilizadas:
- AcC: Acero al carbón
 - AcI: Acero inoxidable
 - ACL: Agua clarificada
 - AF: Agua filtrada
 - AFC: Agua filtrada con carbón activado
 - AI: Aire de instrumentos
 - APO: Agua potable
 - ART: Agua de retrolavados y enjuagues
 - CAP: Capacidad
 - CL: Cloro
 - D: Diámetro
 - H: Altura
 - MAT: Material
 - P.DESC: Presión de descarga
 - P.OP: Presión de operación
 - POT: Potencia
 - Q: Gasto o caudal
 - RP: Registro de drenaje pluvial
 - Tresidencia: Tiempo de residencia

- Identificación de líneas:
- Servicio de la línea
 - Material o especificación de la tubería
 - Número consecutivo de línea
 - Diámetro de la tubería



| REVISIONES | | FECHA |
|------------|---------------------------------|-----------|
| A | PARA REVISIÓN INTERNA | 07-JUL-03 |
| B | PARA APROBACIÓN Y/O COMENTARIOS | 23-ENE-04 |
| O | APROBADO PARA DISEÑO FINAL | 07-JUL-04 |



| | | | |
|----------|---------------------|--|--------------|
| DIBUJÓ | DANIEL ORTEGA C. | DIAGRAMA DE TUBERÍAS E INSTRUMENTACIÓN | |
| PROYECTÓ | DANIEL ORTEGA C. | PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA FILTRACIÓN | |
| REVISÓ | ING. JUAN JOSÉ RUIZ | LOCALIZACIÓN: | DIAGRAMA No. |
| APROBÓ | - | PROYECTO: | DTI-02 |
| | | | REV. 0 |

BA-05/05A
 BOMBAS CENTRIFUGAS HORIZONTALES
 SERVICIO: SUMINISTRO AGUA A TORRE DE ENFRIMIENTO
 Q: GPM (m³/h) c/u
 P.DESC: lb/in² (kg/cm²)
 POT: HP
 MOTOR ELÉCTRICO
 MAT: ACERO AL CARBÓN

BA-09/09A
 BOMBAS CENTRIFUGAS VERTICALES
 SERVICIO: SUMINISTRO AGUA A PLANTAS DE PROCESO
 Q: GPM (m³/h) c/u
 P.DESC: lb/in² (kg/cm²)
 POT: HP
 MOTOR ELÉCTRICO
 MAT: ACERO AL CARBÓN

BA-11/11A
 BOMBAS CENTRIFUGAS VERTICALES
 SERVICIO: BOMBEO ACEITE RECUPERADO
 Q: GPM (m³/h) c/u
 P.DESC: lb/in² (kg/cm²)
 POT: HP
 MOTOR ELÉCTRICO
 MAT: ACERO AL CARBÓN

BA-12/12A
 BOMBAS CENTRIFUGAS HORIZONTALES
 SERVICIO: BOMBEO AGUA A DESCARGA DE EFLUENTES
 Q: GPM (m³/h) c/u
 P.DESC: lb/in² (kg/cm²)
 POT: HP
 MOTOR ELÉCTRICO
 MAT: ACERO AL CARBÓN

BD-06
 BOMBA DOSIFICADORA HORIZONTAL
 SERVICIO: SUMINISTRO DE ACIDO SULFÚRICO
 Q: GPM (l/h)
 POT: HP
 MOTOR ELÉCTRICO
 MAT DIAFRAGMA:

BD-07
 BOMBA DOSIFICADORA HORIZONTAL
 SERVICIO: SUMINISTRO DE BIOCIDA
 Q: GPM (l/h)
 POT: HP
 MOTOR ELÉCTRICO
 MAT DIAFRAGMA:

BD-08
 BOMBA DOSIFICADORA HORIZONTAL
 SERVICIO: SUMINISTRO DE BIODISPERSANTE
 Q: GPM (l/h)
 POT: HP
 MOTOR ELÉCTRICO
 MAT DIAFRAGMA:

BD-09
 BOMBA DOSIFICADORA HORIZONTAL
 SERVICIO: SUMINISTRO DE ANTI-INCRUSTANTE
 Q: GPM (l/h)
 POT: HP
 MOTOR ELÉCTRICO
 MAT DIAFRAGMA:

BD-10
 BOMBA DOSIFICADORA HORIZONTAL
 SERVICIO: SUMINISTRO DE INHIBIDOR DE CORROSIÓN
 Q: GPM (l/h)
 POT: HP
 MOTOR ELÉCTRICO
 MAT DIAFRAGMA:

CCL-03/03A
 CILINDROS DE GAS
 SERVICIO: ALMACENAMIENTO DE GAS CLORO PARA AGUA DE REPUESTO
 CAP: lb (kg) c/u
 MAT: ACERO AL CARBÓN

CL-03
 EQUIPO DE CLORACIÓN
 SERVICIO: DOSIFICACIÓN DE CLORO PARA AGUA DE REPUESTO
 CAP: lb/hr (kg/hr)

CPI-01
 SEPARADOR PLATOS CORRUGADOS
 SERVICIO: TRATAMIENTO DE GRASAS Y ACEITES
 CAP: GPM (m³/hr)

EY-03
 EYECTOR
 SERVICIO: MEZCLADO DE CLORO Y AGUA DE AYUDA

FC-03
 FOSA DE CAPTACIÓN
 SERVICIO: ALMACENAMIENTO DE ACEITE RECUPERADO
 CAP: Gal (m³)
 D: ft (m)
 H: ft (m)
 T. RESIDENCIA: min
 MAT: CONCRETO

TA-03
 TANQUE
 SERVICIO: ALMACENAMIENTO DE AGUA RECUPERADA
 CAP: Gal (m³)
 D: ft (m)
 H: ft (m)
 T. RESIDENCIA: min
 MAT: ACERO AL CARBÓN

TD-06
 TANQUE
 SERVICIO: ALMACENAMIENTO DE ACIDO SULFÚRICO
 CAP: Gal (m³)
 D: ft (m)
 H: ft (m)
 T. RESIDENCIA: min
 MAT:

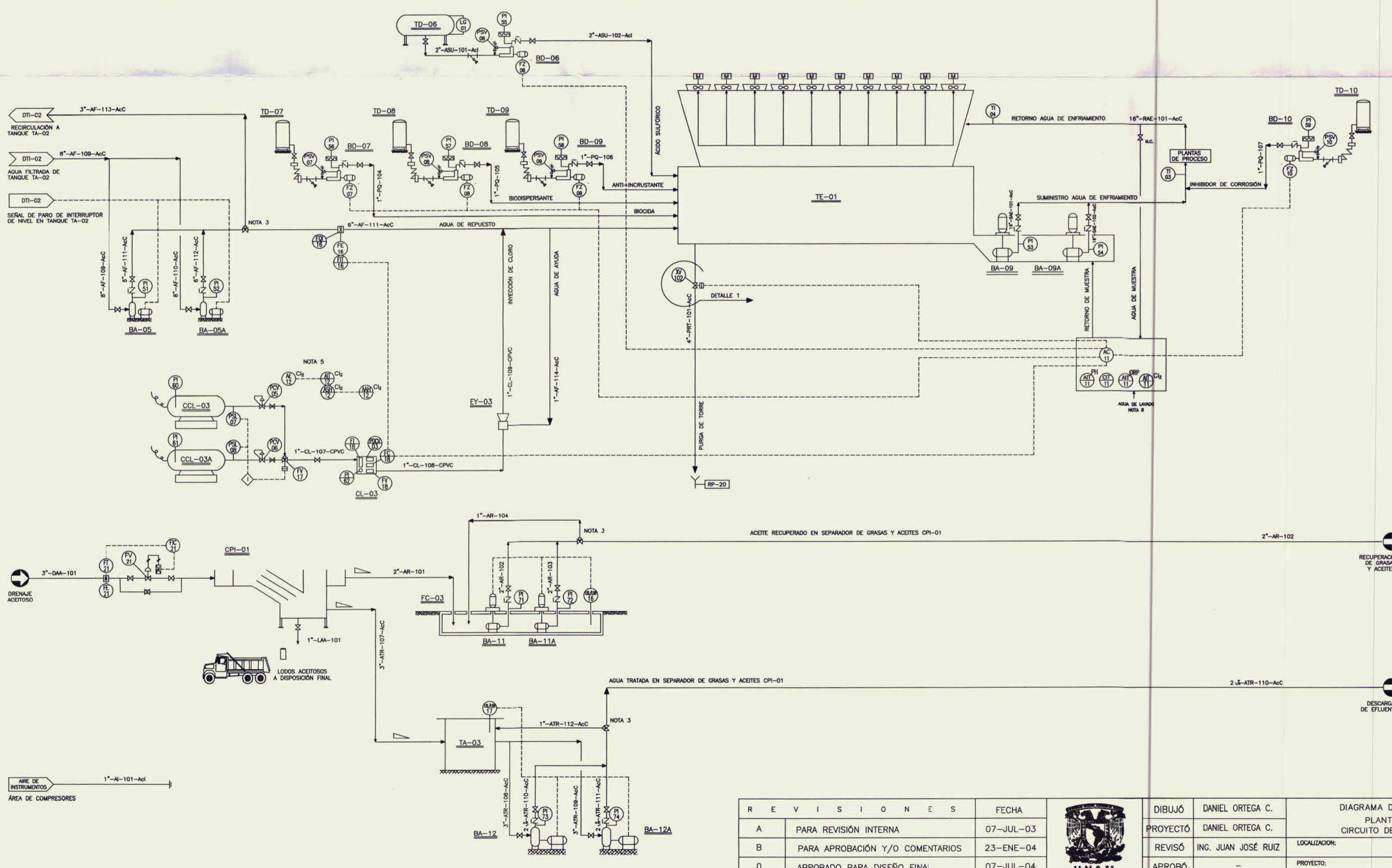
TD-07
 RECIPIENTE ATMOSFÉRICO
 SERVICIO: ALMACENAMIENTO DE BIOCIDA
 CAP: Gal (m³)
 D: ft (m)
 H: ft (m)
 T. RESIDENCIA: min
 MAT: PLÁSTICO

TD-08
 RECIPIENTE ATMOSFÉRICO
 SERVICIO: ALMACENAMIENTO DE BIODISPERSANTE
 CAP: Gal (m³)
 D: ft (m)
 H: ft (m)
 T. RESIDENCIA: min
 MAT: PLÁSTICO

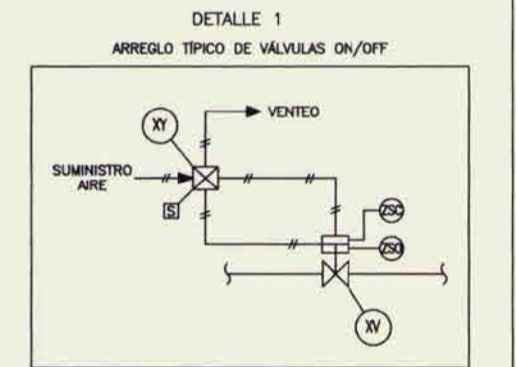
TD-09
 RECIPIENTE ATMOSFÉRICO
 SERVICIO: ALMACENAMIENTO DE ANTI-INCRUSTANTE
 CAP: Gal (m³)
 D: ft (m)
 H: ft (m)
 T. RESIDENCIA: min
 MAT: PLÁSTICO

TD-10
 RECIPIENTE ATMOSFÉRICO
 SERVICIO: ALMACENAMIENTO DE INHIBIDOR DE CORROSIÓN
 CAP: Gal (m³)
 D: ft (m)
 H: ft (m)
 T. RESIDENCIA: min
 MAT: PLÁSTICO

TE-01
 TORRE DE ENFRIMIENTO
 SERVICIO: ENFRIMIENTO DE CORRIENTES DE PROCESO
 CAP: GPM (m³/h)
 No. ventiladores:
 No. celdas:



- NOTAS.**
- Para simbología de equipo e instrumentos ver plano de simbología número:
 - Para referencia de ruta de tuberías y arreglos de equipo ver plano número:
 - Válvula de recirculación calibrada para un exceso en el % de la presión de diseño.
 - Todos las bombas cuentan con su botonera de arranque /para local al pie de la bomba.
 - Detector de fugas de gas cloro.
 - La conexión de los recipientes de químicos a las bombas dosificadoras es con manguera.
 - Los recipientes contenedores de biocida, biodispersante, anti-incrustante e inhibidor de corrosión se intercambian, de forma tal que al agotarse el químico se reemplaza el recipiente vacío por uno lleno.
 - Para el lavado de los sensores se toma agua de la torre.
 - Abreviaturas utilizadas:
- AcC: Acero al carbón
 - AcI: Acero inoxidable
 - AF: Agua filtrada
 - AL: Aire de instrumentos
 - AR: Aceite recuperado
 - ASU: Acido sulfúrico
 - ATR: Agua tratada
 - CAP: Capacidad
 - CL: Cloro
 - D: Diámetro
 - DAA: Drenaje de agua aceitosa
 - H: Altura
 - LAA: Lodos de agua aceitosa
 - MAT: Material
 - N.C: Válvula normalmente cerrada
 - ORP: Potencial de óxido-reducción
 - P.DESC: Presión de descarga
 - POT: Potencia
 - PQT: Producto químico
 - PRT: Purga de torre de enfriamiento
 - Q: Gasto o caudal
 - RAE: Retorno de agua de enfriamiento
 - RP: Registro de drenaje pluvial
 - SAE: Suministro de agua de enfriamiento
- 10.- Identificación de líneas:
- Servicio de la línea
 - Material o especificación de la tubería
 - 8"-ACR-101-AcC
 - Número consecutivo de línea
 - Diámetro de la tubería



| R E V I S I O N E S | | FECHA | DIBUJÓ DANIEL ORTEGA C. | | DIAGRAMA DE TUBERÍAS E INSTRUMENTACIÓN | |
|---------------------|---------------------------------|-----------|----------------------------|--|--|--------------|
| A | PARA REVISIÓN INTERNA | 07-JUL-03 | PROYECTÓ DANIEL ORTEGA C. | | PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA | |
| B | PARA APROBACIÓN Y/O COMENTARIOS | 23-ENE-04 | REVISÓ ING. JUAN JOSÉ RUIZ | | LOCALIZACIÓN: | DIAGRAMA No. |
| 0 | APROBADO PARA DISEÑO FINAL | 07-JUL-04 | APROBÓ | | PROYECTO: | DTI-03 |
| | | | | | REV. 0 | |

BA-06/06A

BOMBAS CENTRIFUGAS HORIZONTALES
SERVICIO: SUMINISTRO AGUA A UNIDADES CATIÓNICAS
Q: GPM (m3/h) c/u
P.DESC: lb/in2 (kg/cm2)
POT: HP
MOTOR ELÉCTRICO
MAT: ACERO AL CARBÓN

BA-10/10A

BOMBAS CENTRIFUGAS HORIZONTALES
SERVICIO: SUMINISTRO AGUA A UNIDADES ANIÓNICAS
Q: GPM (m3/h) c/u
P.DESC: lb/in2 (kg/cm2)
POT: HP
MOTOR ELÉCTRICO
MAT: ACERO AL CARBÓN

BD-04/04A

BOMBA DOSIFICADORA
SERVICIO: SUMINISTRO DE ÁCIDO SULFÚRICO
Q: GPM (l/h)
POT: HP
MOTOR ELÉCTRICO
MAT DIAFRAGMA:

BD-05/05A

BOMBA DOSIFICADORA
SERVICIO: SUMINISTRO DE SODA CAÚSTICA
Q: GPM (l/h)
POT: HP
MOTOR ELÉCTRICO
MAT DIAFRAGMA:

DG-01

DES GASIFICADOR
ELIMINACIÓN DE CO2
CAP: GPM (m3/h)
D: ft (m)
H: ft (m)
T. RESIDENCIA: min
MAT:

TD-04/04A

TANQUE
SERVICIO: ALMACENAMIENTO DE ÁCIDO SULFÚRICO
CAP: Gal (m3)
D: ft (m)
H: ft (m)
T. RESIDENCIA: min
MAT:

TD-05/05A

TANQUE
SERVICIO: ALMACENAMIENTO DE SODA CAÚSTICA
CAP: Gal (m3)
D: ft (m)
H: ft (m)
T. RESIDENCIA: min
MAT:

UA-01/02/03

UNIDADES ANIÓNICAS
SERVICIO: REMOCIÓN DE ANIONES
CAP: GPM (m3/h) c/u
D: ft (m)
H: ft (m)
Vol. RESINA: ft3 (m3) c/u
P.OP: lb/in2 (kg/cm2)
MAT: ACERO AL CARBÓN

UC-01/02/03

UNIDADES CATIÓNICAS
SERVICIO: REMOCIÓN DE CATIONES
CAP: GPM (m3/h) c/u
D: ft (m)
H: ft (m)
Vol. RESINA: ft3 (m3) c/u
P.OP: lb/in2 (kg/cm2)
MAT: ACERO AL CARBÓN

NOTAS.

- Para simbología de equipo e instrumentos ver plano de simbología número:
- Para referencia de ruta de tuberías y arreglos de equipo ver plano número:
- Válvula de recirculación calibrada para un exceso en el % de la presión de diseño.
- Todas las bombas cuentan con su botonera de arranque /para local al pie de la bomba.
- Las válvulas solenoides para las válvulas ON/OFF de las unidades catiónicas y aniónicas se deberán instalar en gabinetes como sigue:

| Cabinete | Válvulas solenoides | Unidad |
|----------|----------------------------|--------|
| GBT-03 | XY-51, XY-52, XY-53, XY-54 | UC-01 |
| | XY-55, XY-56, XY-57, XY-58 | UC-02 |
| | XY-59, XY-60, XY-61, XY-62 | UC-03 |
| | XY-63, XY-64, XY-65, XY-66 | UC-03 |
| GBT-04 | XY-67, XY-68, XY-69, XY-70 | UA-01 |
| | XY-71, XY-72, XY-73, XY-74 | UA-02 |
| | XY-75, XY-76, XY-77, XY-78 | UA-02 |
| | XY-79, XY-80, XY-81, XY-82 | UA-03 |

- La secuencia de cierre y apertura de las válvulas ON/OFF de las unidades catiónicas y aniónicas se controlarán con un PLC de la siguiente manera:

| Operación | Válvulas solenoides (Unidad Catiónica UC-01) | | | | | |
|------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| | XY-51 | XY-52 | XY-53 | XY-54 | XY-55 | XY-56 |
| Operación normal | Abre | Abre | Cierra | Abre | Cierra | Cierra |
| Retrolavado | Cierra | Cierra | Abre | Cierra | Cierra | Abre |
| Enjuague | Cierra | Abre | Cierra | Cierra | Abre | Cierra |
| Regeneración | Cierra | Cierra | Cierra | Abre | Cierra | Abre |

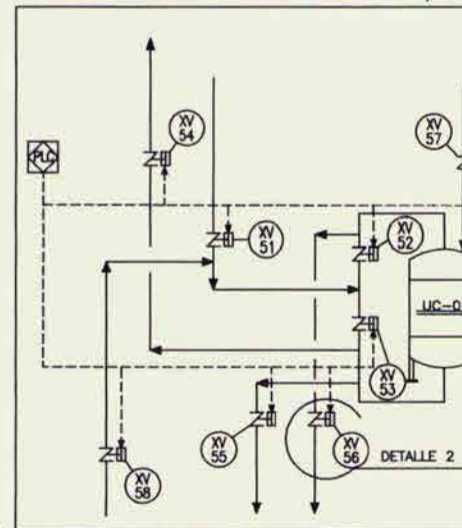
- Abreviaturas utilizadas:

| | |
|-------------|----------------------------------|
| Ac: | Acero al carbón |
| Ac: | Acero inoxidable |
| ADC: | Agua decantada |
| ADG: | Agua desgasificada |
| ADM: | Agua desmineralizada |
| AF: | Agua filtrada |
| AI: | Aire de instrumentos |
| ART: | Agua de retrolavados y enjuagues |
| ASU: | Ácido sulfúrico |
| CAP: | Capacidad |
| CL: | Cloro |
| D: | Dímetro |
| H: | Altura |
| MAT: | Materia |
| P.DESC: | Presión de descarga |
| P.OP: | Presión de operación |
| POT: | Potencia |
| Q: | Gasto o caudal |
| RP: | Registro de drenaje pluvial |
| SC: | Sosa caústica |
| Residencia: | Tiempo de residencia |

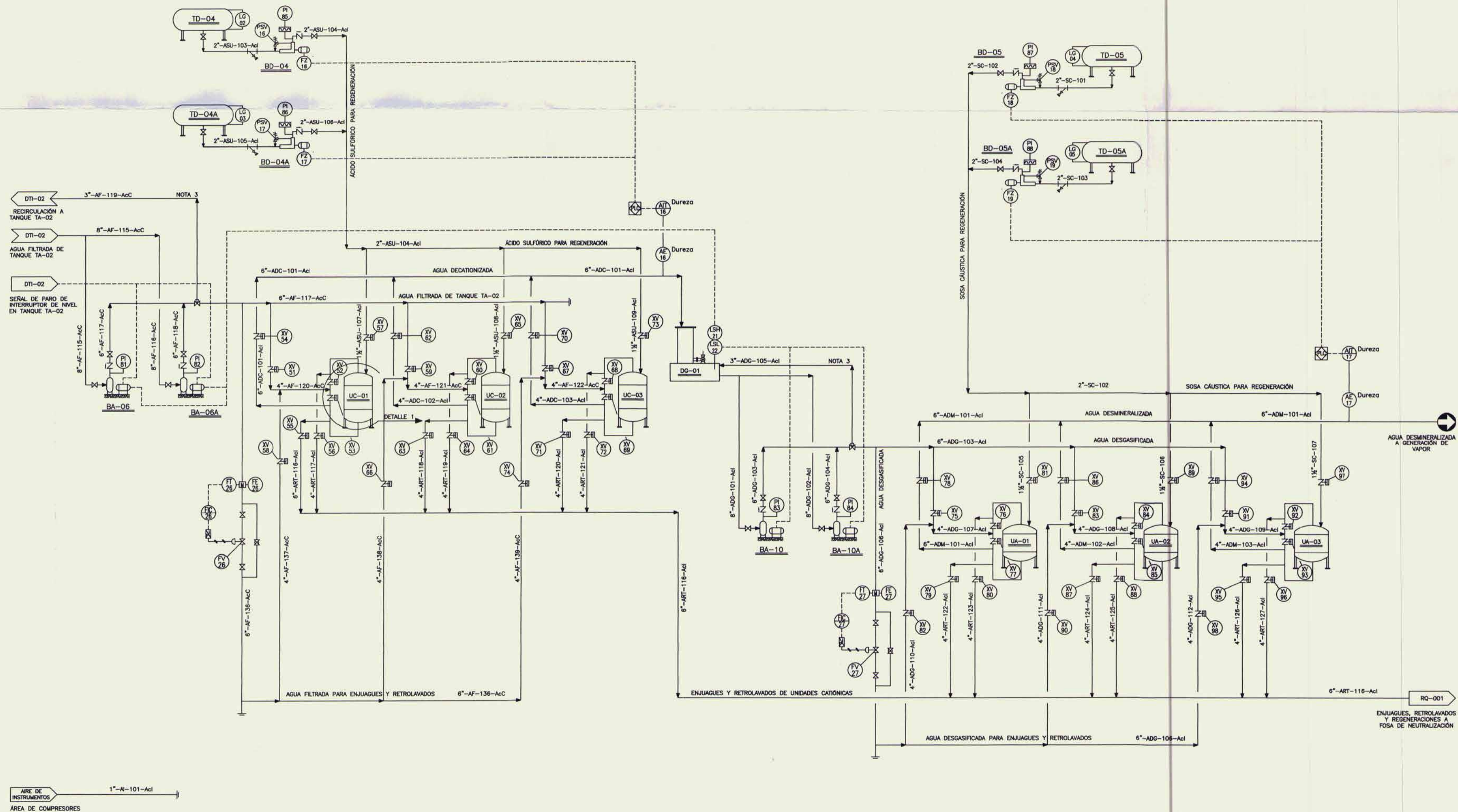
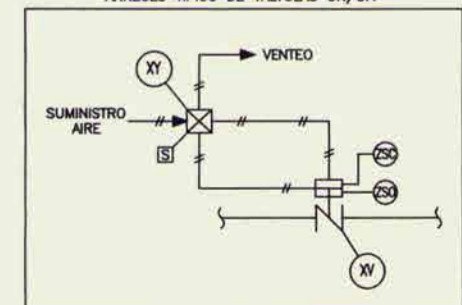
- Identificación de líneas:

| | |
|---------------|--|
| — | Servicio de la línea |
| — | Materia o especificación de la tubería |
| 8"-ACR-101-Ac | Número consecutivo de línea |
| — | Dímetro de la tubería |

DETALLE 1
CONTROL DE APERTURA Y CIERRE DE VÁLVULAS ON/OFF



DETALLE 2
ARREGLO TÍPICO DE VÁLVULAS ON/OFF



ÁREA DE INSTRUMENTOS
1"-AI-101-Ac
ÁREA DE COMPRESORES

| REVISIONES | | FECHA |
|------------|---------------------------------|-----------|
| A | PARA REVISIÓN INTERNA | 07-JUL-03 |
| B | PARA APROBACIÓN Y/O COMENTARIOS | 23-ENE-04 |
| O | APROBADO PARA DISEÑO FINAL | 07-JUL-04 |



| | |
|----------|---------------------|
| DIBUJÓ | DANIEL ORTEGA C. |
| PROYECTÓ | DANIEL ORTEGA C. |
| REVISÓ | ING. JUAN JOSÉ RUIZ |
| APROBÓ | - |

| | |
|--|--------------|
| DIAGRAMA DE TUBERÍAS E INSTRUMENTACIÓN PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA DESMINERALIZACIÓN | |
| LOCALIZACIÓN: | DIAGRAMA No. |
| PROYECTO: | DTI-04 |
| REV. | 0 |