



Interreg

España - Portugal



UNIÓN EUROPEA

AQUALITRANS

Fondo Europeo de Desarrollo Regional

ESTUDIO DE SISTEMAS DE MEDIDA, ACTUACIÓN Y COMUNICACIÓN EN EDAR



AQUALITRANS.ES AQUALITRANS.PT



PROYECTO AQUALITRANS:

**Sistema de Gestión y Control para la mejora de la eficiencia en la depuración y la calidad medioambiental de aguas a nivel transfronterizo
EP-INTERREG V A España Portugal (POCTEP)**

Actividad 3	Herramienta de gestión avanzada de EDARs en la Eurorregión
Acción	Dispositivos de medida, actuación y comunicación
Tarea	Estudio de sistemas de medida, actuación y comunicación
Código	A.3.1.3.

Noviembre 2017

Versión 2

FUNDACIÓN INSTITUTO TECNOLÓGICO DE GALICIA

Diciembre de 2017

Versión 1

INDICE

1	OBJETIVO	4
2	CONTEXTO	4
3	PARÁMETROS A MEDIR E INSTRUMENTACIÓN	5
3.1	Temperatura	6
3.2	Presión	8
3.3	Nivel de líquido	10
3.4	Caudal de líquidos y gases	16
3.5	pH	21
3.6	Conductividad	23
3.7	Sólidos en suspensión	25
3.8	Dureza	26
3.9	Oxígeno disuelto	27
3.10	Demanda biológica de oxígeno (DBO)	29
3.11	Demanda química de oxígeno (DQO)	30
3.12	Eliminación de nutrientes	32
3.13	Potencial Redox	33
3.14	Nivel de la interfase de fango	33
3.15	Turbidez	34
3.16	Cloro	36
4	DISPOSITIVOS DE ACTUACIÓN Y COMUNICACIÓN	38
4.1	Sistemas de Control	38
4.2	Redes de control	39
4.3	SCADA, PLC y DCS	40
5	BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES	45

1 OBJETIVO

El objetivo del presente documento es identificar los equipos de medida y control más adecuados para monitorizar y actuar sobre los procesos en estaciones depuradoras de aguas residuales, así como el de dar a conocer las arquitecturas de comunicación que posibilitan la interacción entre actuadores, sensores y herramientas de gestión.

Se realiza una revisión de las tecnologías actuales con un especial enfoque a los problemas y soluciones en el ámbito de las plantas depuradoras, el análisis se focaliza en dispositivos relacionados con la medición de la calidad del agua, parámetros de proceso y variables de consumo energético.

2 CONTEXTO

El control de una EDAR es un reto lleno de dificultades ya que se trata de sistemas complejos no lineales con procesos biológicos y bioquímicos que tienen lugar a lo largo de todo el proceso. Durante los últimos años la importancia de tener un sistema integrado de control en las EDAR ha tomado fuerza y ha sido enfatizado por los técnicos y la comunidad científica, actualmente el sector está demandando este tipo de soluciones y está siendo consciente de los beneficios que estos sistemas aportan.

Los sistemas de control necesitan sensores con diferentes funciones en cada proceso de la planta, podemos clasificar los numerosos sistemas de sensores disponibles en tres tipologías:

- Aquellos que participan activamente en el control de los parámetros fundamentales del proceso mediante actuadores (como bombas, soplantes, etc.) comandados en función de las señales recibidas por estos sensores.
- Aquellos que únicamente se utilizan para la supervisión por parte de los operadores del estado de un proceso.
- Aquellos utilizados para la supervisión de la planta por parte de auditores.

Como se indica a lo largo de este documento, las depuradoras cuentan con tipologías muy diferentes de sensores que miden desde parámetros físicos y químicos hasta biológicos o bioquímicos. Estos sensores están ubicados allí donde se necesite medir una variable. Esta variable medida es transformada en una señal y enviada a través del sistema de comunicaciones a los registradores o a los controladores.

Las señales enviadas desde los sensores son casi siempre eléctricas (4-20mA) aunque también puede darse el caso de señales neumáticas. Cuando las distancias son demasiado grandes suele utilizarse comunicación digital.

3 PARÁMETROS A MEDIR E INSTRUMENTACIÓN

“Lo que no se define no se puede medir, lo que no se mide no se puede mejorar, lo que no se mejora, se degrada siempre” esta frase de Lord Kelvin es una máxima que rige la instrumentación y automatización industrial y simplifica los retos que tiene por delante la industria. La medición de parámetros propios de una planta es el punto de partida, saber dónde estamos y con esa base podemos definir dónde queremos llegar, cualquier estrategia de optimización de la eficiencia en el proceso pasa por la medición y la automatización de los parámetros implicados.

En el tratamiento de aguas se miden tanto parámetros físico-químicos como biológicos, es decir, se necesita variedad instrumental para el control de una planta. Toda esa instrumentación no tiene sentido si no lo podemos comunicar, si no podemos actuar con la información que nos dan los sensores y si no se integra, por tanto, hay que implementar estructuras de comunicación para que el sistema cumpla su función.

En los siguientes apartados se analizan los sensores vinculados con las siguientes variables:

- Caudal
- Nivel
- Presión
- Temperatura
- Cloro
- PH
- Potencial Redox
- OD
- Turbidez
- Conductividad
- Dureza
- Sílice
- DQO
- Sulfatos
- Medidor interfase del manto de fango
- Medidor de interfase de nivel

3.1 Temperatura

Conocer la temperatura de una corriente es importante, pues de ella dependen diferentes fenómenos que ocurren en el agua, como por ejemplo, tasa de fotosíntesis por plantas acuáticas o la tasa metabólica de organismos acuáticos. Los orígenes del cambio de temperatura son muy diversos, y van desde el tiempo meteorológico hasta los vertidos industriales o domésticos de temperaturas variadas.

La temperatura de una corriente no es homogénea, sobre todo cuando discurre por canales abiertos, las zonas soleadas pueden estar a temperaturas significativamente más altas que las zonas de sombra. Por tanto, debido a ese perfil de temperaturas es lógico tomar temperaturas en diferentes puntos (diferente profundidad y anchura) de la corriente para obtener una imagen real de la temperatura en la corriente. Spellman, F. R. (2013).

El control de la temperatura es necesario, porque supervisa procesos del tratamiento de aguas residuales tan importantes como la digestión de fangos. Además la temperatura tiene relación con otros parámetros de gran importancia en la operación de la EDAR, como el oxígeno disuelto, el potencial redox o el pH.

Los medidores más comunes dentro de una estación depuradora son los siguientes:

Detector de temperatura resistivo

Es un sensor de temperatura que tiene su principio de medición en la variación de la resistencia frente a la temperatura, esta relación es directa, pues conforme aumenta la temperatura aumenta la resistencia del conductor. El detector de temperatura resistivo tiene un rango de medida habitual de 0 a 300°C.



Figura 1. Detector de temperatura resistivo. Ultra-nsi. ^I

Termopar

Es un dispositivo formado por dos conductores de diferente capacidad. El termopar produce un voltaje dependiente de la temperatura como resultado del efecto termoeléctrico, y con ese voltaje se puede medir la temperatura. Los termopares tienen un rango de medida muy amplio.



Figura 2. Termopar. Omega. ^{II}

Termistor

Es un tipo de resistor cuya resistividad depende de la temperatura. El termistor tiene un rango de medida de 0 a 300°C.



Figura 3. Termistor. Globalsources.^{III}

Bulbo térmico

Es un dispositivo en el cual un líquido en un bulbo se expande a la vez que se aumenta la temperatura, presionando un tubo tipo Bourdon y causando una deformación dependiente de la temperatura. El bulbo térmico tiene un rango de medida de 0 a 500°C.



Figura 4. Bulbo térmico. Vulcanelectric.^{IV}

Los termopares, los detectores de temperatura resistivos y los termistores al ser utilizados en medios agresivos es habitual que estén protegidos con una vaina para aumentar su vida útil.

La temperatura comúnmente puede ser medida en:

- Afluyente.
- Salida decantador primario.
- Digestor aerobio.
- Salida decantador secundario.
- Digestor anaerobio.
- Influyente.

3.2 Presión

Las medidas de presión son habituales en el tratamiento de aguas residuales, especialmente como alarmas en los digestores aerobio y anaerobio. También se utilizan estas medidas en los filtros midiéndose la diferencia de presión antes y después del filtro para saber el grado de obstrucción o colmatación, y así realizar las medidas preventivas pertinentes. Otros ejemplos de puntos de medida de presión son las salidas de las bombas o también el circuito de aireación, la presión de este circuito dependerá del caudal de aire impulsado y de las pérdidas de carga en el propio sistema, por lo tanto, un seguimiento de la presión en este circuito proporciona información sobre las pérdidas de carga. Cabe mencionar que la aireación del reactor biológico puede suponer hasta el 70% del consumo energético de la planta por lo que controlar y reducir las pérdidas de carga en este circuito es fundamental.

La presión como el caudal no es un parámetro propio de la eficiencia de la planta, pero una buena monitorización de la presión nos ayuda a mejorar la operación de la estación depuradora.

Los medidores de presión más comunes en las estaciones depuradoras son:

Tubo de Bourdon

Es un dispositivo medidor de la presión basado en la presurización de un tubo, el cual se endereza a mayor presión y se curva conforme disminuye, mecánicamente es conectado a una aguja que nos da una lectura de presión.

El rango de medición de este tipo de medidor es entre 0 y 35.000 kPa.

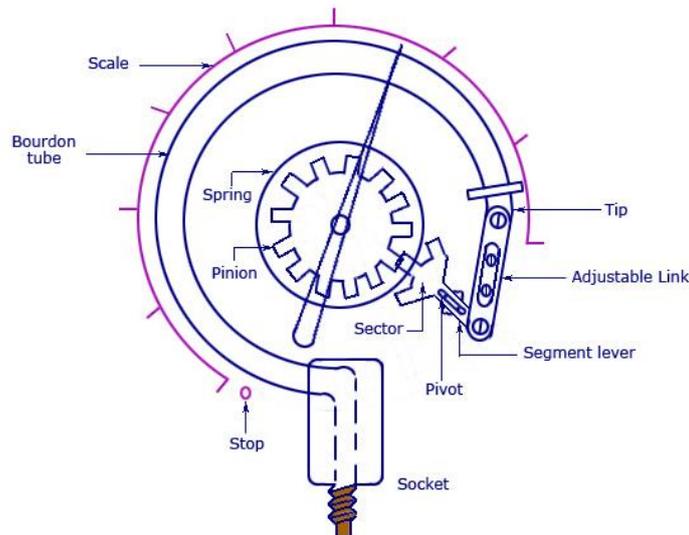


Figura 5. Tubo de Bourdon.^V

Diafragma

Es un transductor utilizado para la medición de presión. Cuando una fuerza actúa sobre un diafragma delgado y estirado, provoca una deflexión en el mismo, siendo en el centro más acusada. Dado que el límite elástico no debe sobrepasarse, la deflexión del diafragma debe mantenerse de manera restringida, esto se hace poniendo muchas cápsulas en cascada, una cápsula se forma uniendo dos diafragmas por los extremos. Cuando la fuerza entra en el medidor, la presión total será igual a la presión provocada en cada una de las cápsulas.

La instalación debería incluir válvulas de bloqueo y de descarga y evitar temperaturas extremas y el rango de medición de este tipo de medidor es entre 0 y 3.500 kPa.

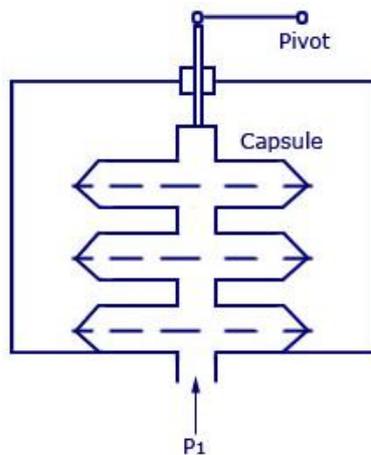


Figura 6. Diafragma.^{VI}

Fuelles

Los fuelles son muy similares a los medidores de diafragma, salvo que, en vez de ser una unión de cápsulas, es una unión de diafragmas individuales. El elemento de fuelle, básicamente, es un elemento expansible, plegable y axialmente flexible de una sola pieza con muchos pliegues.

El rango de medición de este tipo de medidor es entre 0 y 2.000 kPa.

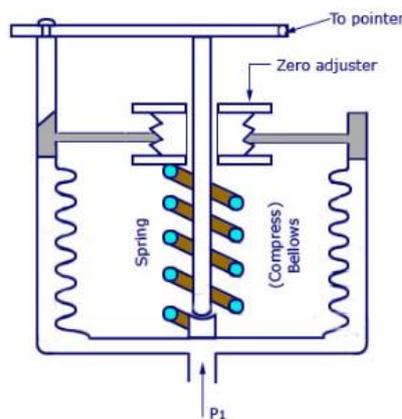


Figura 7. Fuelle.^{VII}

La medición de presión se realiza en numerosos puntos de la planta, como se comentaba anteriormente es habitual encontrar estos equipos en la impulsión de bombas, compresores o soplantes.

3.3 Nivel de líquido

El nivel de líquido es un parámetro esencial dentro de la operación de una estación depuradora, pues tiene relación con el caudal. Los medidores de nivel de líquido pueden trabajar midiendo el nivel directamente o bien midiendo una variable relacionada con este, como por ejemplo, la presión hidrostática.

Hay diversos puntos donde se mide el nivel de líquido, por ejemplo a la entrada de la planta, pues un mal control del mismo puede llegar a desbordar los decantadores primarios, lo cual tendría unas consecuencias desastrosas para la estación depuradora y el medioambiente. Otro ejemplo sería en los digestores aerobios, pues un nivel demasiado alto, puede no ser controlado por la aireación del digestor y colapsar el sistema. En general los bombeos de la planta, ya sean los bombeos de cabecera en el pretratamiento, los bombeos para la recirculación de fangos, los bombeos del exceso de fangos son comandados mediante una señal vinculada a un nivel. La medición del nivel de líquido puede ser tanto continua como puntual. A continuación, se describen los tipos de medidores de nivel:

Medidor ultrasónico:

Su principio de operación es simple, mide el tiempo que tarda un pulso sonoro en llegar a la superficie a medir y su eco de vuelta, como la velocidad del sonido es conocida, se obtiene la distancia a la que está la superficie. Tiene su gran ventaja en que es un medidor sin contacto, lo que significa que apenas se ve afectado por el fouling, por tanto, el mantenimiento es reducido. Además ofrecen una precisión elevada a bajo coste.

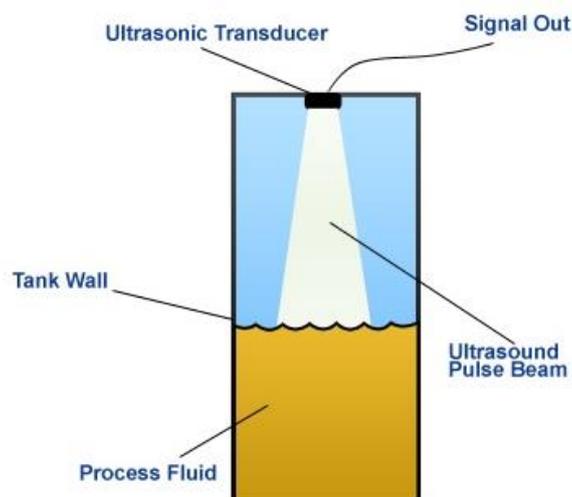


Figura 8. Sensor de nivel ultrasónico. ^{VIII}

Diferencia de presión

Si se dispone de acceso al fondo del tanque, podrá utilizarse este tipo de medidores. Se basan en la presión que ejerce la masa de líquido al diafragma del sensor. El peso específico del líquido es una variable que se debe saber para poder calcular la altura del mismo. El efecto de la temperatura en los líquidos, pudiendo contraer o expandir estos, no pueden ser detectados por estos sensores pues la presión no varía.

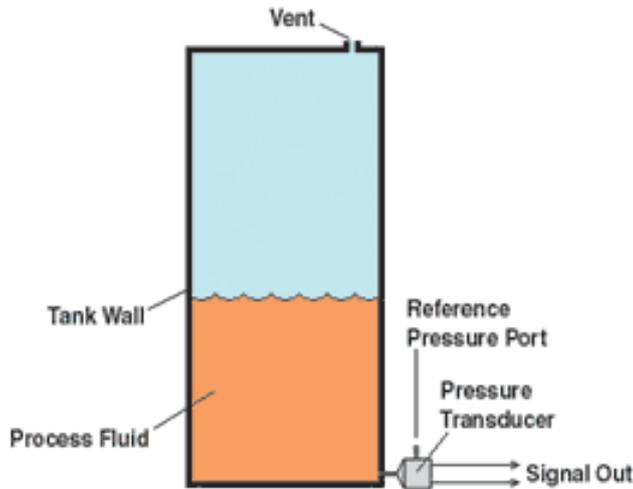


Figura 9. Sensor de nivel por presión diferencial. IX

Flotadores

Es el sistema de medida de nivel más habitual. Existen bastantes configuraciones, pero todas se basan en la fuerza de empuje de un elemento flotante unido a un aparato medidor por medio de un cable, la altura del flotador es leída por la posición del cable. Los flotadores se pueden utilizar para medir en continuo si se añade un cable y una polea, conforme el líquido sube o baja la polea rota proporcionalmente.

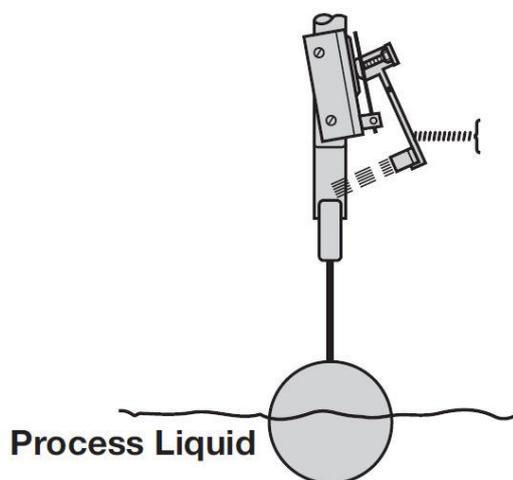


Figura 10. Flotador. X

Dentro de este tipo de equipos, es muy habitual encontrar los llamados interruptores de flotador, que no son más que dispositivos que al alcanzar cierto nivel activan un interruptor que conectado a un relé, arranca o para una bomba. Su única misión es evitar el llenado o vaciado completo de un tanque, y no proporcionan registros parciales.



Figura 11. Interruptor flotador. ^{XI}

Burbujas

Estos dispositivos miden la profundidad de un líquido haciendo pasar una corriente de aire tubo abajo en un tanque, la presión requerida para forzar el paso de aire es proporcional al nivel de líquido.

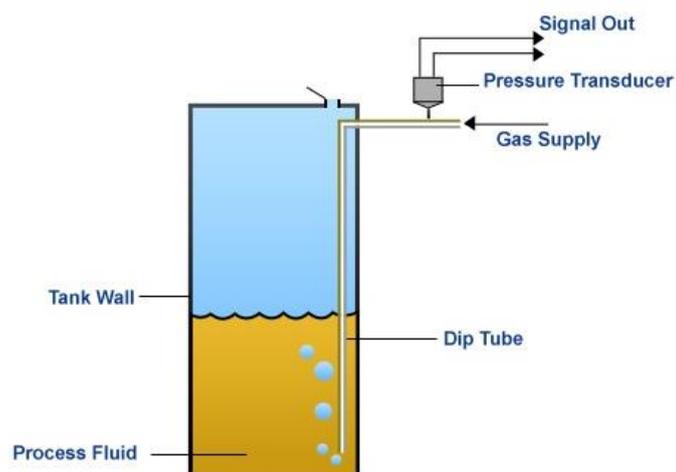


Figura 12. Sensor de nivel por burbujas. ^{XII}

Capacitancia

Consisten en conductores eléctricos aislados y una señal de radio frecuencia en el sensor, para calcular el nivel mide el cambio en la capacitancia eléctrica entre el sensor y la tierra, normalmente la pared del tanque, el cambio es dependiente del nivel o de la profundidad del sensor.

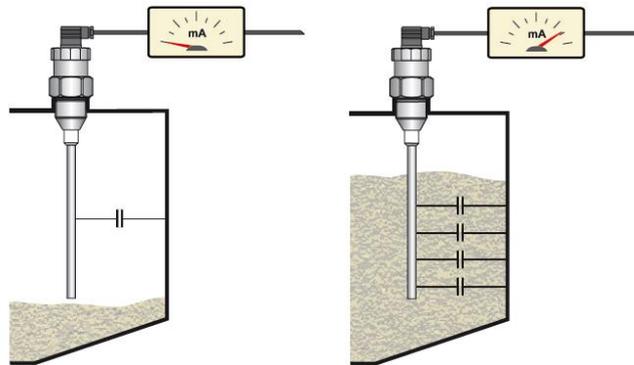


Figura 13. Sensor nivel por capacitancia. ^{XIII}

Indicadores visuales

En tanques que no están automatizados, se puede medir el nivel con un indicador visual. Comúnmente son tuberías de plástico transparente o vidrio que se montan fuera del tanque y que se conectan al mismo por arriba y por abajo. Hay tanque que son de plástico traslúcido pueden tener un indicador de nivel en la pared.



Figura 14. Sensor de nivel visual. ^{XIV}

Radar

Consisten en una antena dentro del tanque y electrónica remota. Se basan en la transmisión de una microonda de alta frecuencia que se refleja en la superficie del líquido y vuelve al receptor, es un funcionamiento similar al medidor ultrasónico, pero en vez de la velocidad el sonido, las microondas viajan a la velocidad de la luz.



Figura 15. Sensor de nivel por radar en EDAR. ^{XV}

Conductancia

Usan el fluido conductor para transmitir una corriente de pequeño voltaje de una sonda a otra o a la pared del tanque, cuando el líquido haga contacto con la sonda de transmisión, se completa el circuito, llegando la corriente eléctrica a través del agua a la sonda receptora.

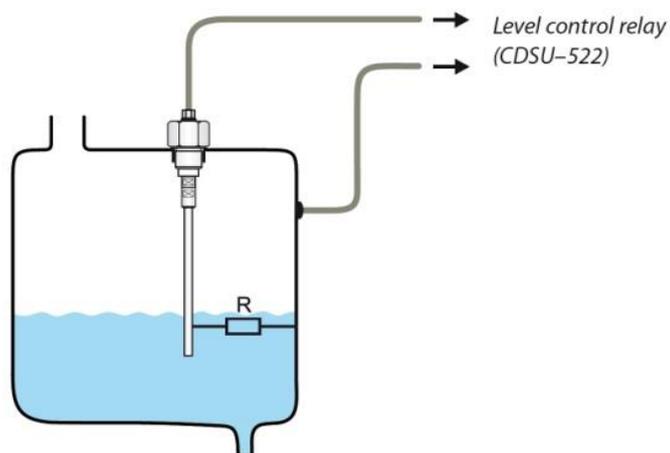


Figura 16. Sensor de nivel por conductancia. ^{XVI}

Elección del tipo de instrumento:

Cada uno de estos equipos es utilizado en diferentes procesos de una planta depuradora:

- Sumideros: medidores ultrasónicos y flotadores son los más habituales.
- Control bypass de la planta: Conductancia, capacitancia o flotadores.
- Tanque de almacenamiento de sustancias químicas: los medidores ultrasónicos son comunes en esta aplicación. Con acceso al fondo del tanque, los sensores de presión también son utilizados.
- Tanque de contención de lodos: los medidores ultrasónicos son ideales pues se montan por encima del fango y lo mide sin contacto.
- Digestores: diferencias en el diseño de un digestor pueden suponer que el medidor que funciona en uno, no lo haga en otro. Frecuentemente una simple alarma de nivel usando una conductancia o capacitancia sonda es suficiente.
- Tanque de almacenamiento de sustancias químicas: los medidores ultrasónicos son comunes en esta aplicación. Con acceso al fondo del tanque, los sensores de presión también son populares.
- Lagunas y estanques de sedimentación: los medidores ultrasónicos son la primera opción debido a que no están en contacto con el agua y su fácil instalación.

3.4 Caudal de líquidos y gases

Un caudalímetro es un dispositivo para medir el volumen de agua que transcurre por una canalización en un tiempo determinado. Si bien es verdad que el propio caudalímetro no supone ninguna mejora en el proceso, es una parte fundamental para la operación de una estación depuradora pues permiten saber los caudales a gestionar, y con ellos se ajustan otros parámetros en las diferentes etapas del tratamiento de aguas.

La medida de caudales no sólo es realizada en el agua residual, si no que existen otros caudales como pueden ser el caudal de aireación, el caudal de fangos o los circuitos de reactivos, cuya medida también es fundamental.

Dentro de las estaciones depuradoras hay diferentes puntos de medida de caudal, la selección de un equipo medidor se tiene que ajustar a las características del punto de medición. Entre los distintos parámetros que se necesitan para elegir un medidor de caudal, destacan los siguientes:

- Tipo de flujo (canal abierto o tubería)
- Diámetro
- Caudal
- Velocidad del agua
- Tipología de agua que va a medir
- Exactitud e incertidumbre requerida

En las siguientes páginas, se detalla información sobre los siguientes tipos de caudalímetros.

- Caudalímetros deprimógenos.
- Caudalímetro de área variable.
- Caudalímetros de turbina
- Caudalímetros magnéticos
- Caudalímetro Canal Parshall
- Caudalímetro ultrasónico con efecto Doppler

Siendo los tres últimos los más habituales en depuradoras de aguas residuales.

Caudalímetros deprimógenos.

Son medidores que producen una caída de presión que se relaciona con el caudal circulante por medio de la ecuación de Bernoulli. Los más usados son: el tubo Venturi, la tobera, la placa de orificio, el tubo de Pitot y el tubo de Annubar.

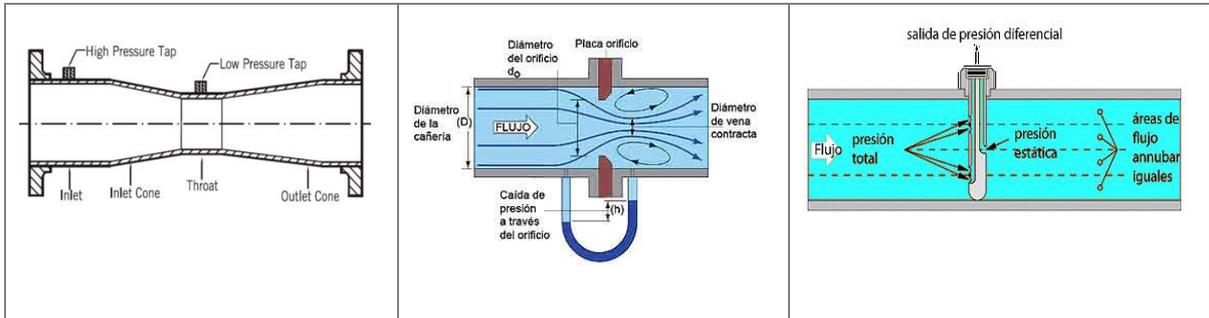


Figura 17: Diagrama de funcionamiento de tubo Venturi, placa de orificio, y tubo de Annubar. ^{XVII}

Tubo de Venturi: dispositivo con forma de dos conos opuestos con un tramo recto que forma un estrechamiento y mide la velocidad calculando la diferencia de presión provocada por el estrechamiento.

Placa de orificio: dispositivo similar al tubo de Venturi, en este caso, se utiliza un orificio para forzar el paso del líquido y provocar el estrechamiento. Dispone de un manómetro para calcular la pérdida de presión.

Tubo de Annubar: dispositivo con varias tomas dentro de la tubería, para interpolar los perfiles de velocidad, que realiza una medida de la diferencia de presión.

Caudalímetro de área variable.

Son una contraposición de los medidores deprimógenos en vez de tener un área fija y producir una caída de presión, tienen una caída de presión casi constante y el área de restricción varía. El más usado es el rotámetro.



Figura 18: Caudalímetro de área variable. ^{XVIII}

Caudalímetros de turbina

El paso del fluido a través de los álabes de la turbina genera una rotación proporcional a la velocidad del mismo. La velocidad de giro de los álabes acciona un transductor cuya señal son pulsos, que pueden ser contabilizados y son proporcionales a la velocidad de giro de la turbina. Existen dos tipos de transductores magnéticos:

- Reluctancia: la velocidad la determina el paso de las palas individuales a través del campo magnético creado por un imán.
- Inductivo: el rotor lleva incorporado un imán permanente que genera un campo magnético giratorio que produce una corriente alterna captada por una bobina.

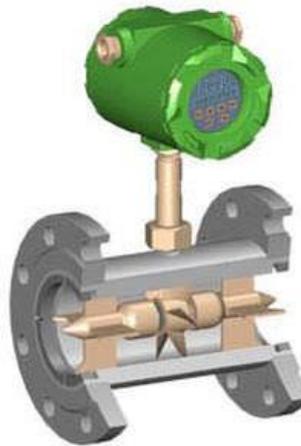


Figura 19: Caudalímetro de turbina^{XIX}

Caudalímetros magnéticos

Se aplica un campo magnético al tubo de medida, lo que da como resultado, una diferencia de potencial proporcional al flujo perpendicular a las líneas de corriente. El flujo magnético requiere de un fluido conductor, por ejemplo, agua que contenga iones, como puede ser el agua residual.

Entre las ventajas de este medidor destacan:

- Baja pérdida de carga.
- No le afectan los golpes de ariete.
- Bajo coste de mantenimiento mecánico.
- Facilidad de limpieza.

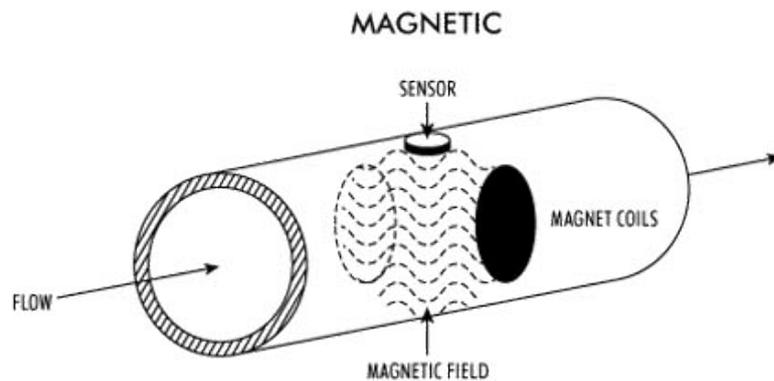


Figura 20. Caudalímetro magnético. ^{XX}

Caudalímetro Canal Parshall

Es un medidor de caudal en canal abierto muy utilizado en el tratamiento de aguas residuales. Consiste en un estrechamiento tipo Venturi. Las principales ventajas de este tipo de medidor son:

- Los sedimentos no afectan al caudal medido.
- La velocidad de llegada del agua no afecta a su funcionamiento.
- Alto rango de medición.
- Se puede construir de diversos materiales.
- No se desajusta con el tiempo.



Figura 21. Canal Parshall. ^{XXI}

Caudalímetro ultrasónico con efecto Doppler

Es un tipo de caudalímetro ultrasónico que se basa en su efecto homónimo. El efecto Doppler es el cambio de frecuencia de una onda producida por el movimiento relativo de la fuente y su observador. Este caudalímetro requiere de dos sensores, el primero emite la onda de ultrasonido a una frecuencia determinada y el segundo recibe esa onda reflejada. La variación en la onda reflejada está relacionada de manera directa con la velocidad del fluido. Cuentan con las siguientes ventajas:

- No hay pérdida de carga
- Vida útil larga.
- Los sensores de ultrasonidos pueden ser montados a posteriori.

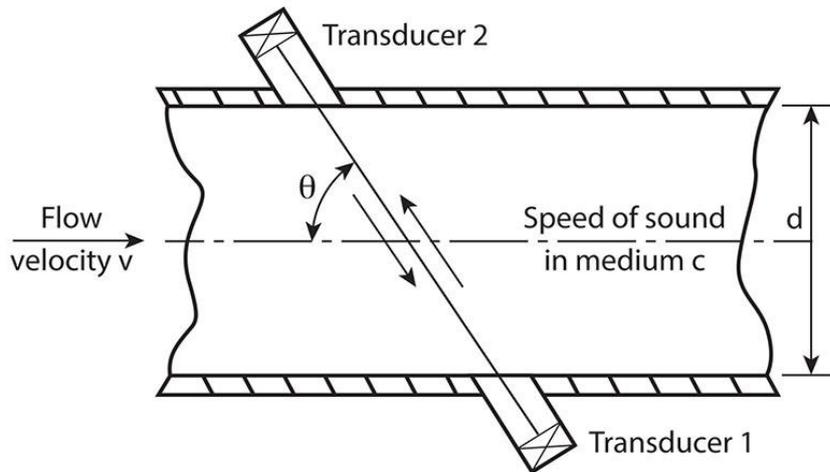


Figura 22. Caudalímetro efecto Doppler. ^{XXII}

Puntos de medida

Habitualmente las estaciones depuradoras más pequeñas simplemente miden caudal en la entrada de la planta, sin embargo en plantas de mayor tamaño es habitual que se lleve a cabo la medición de los siguientes caudales:

- Caudal de entrada a la planta.
- Caudal a la salida de la planta.
- Caudal a la entrada del tratamiento primario.
- Caudal del bypass.
- Caudal del fango primario.
- Caudal del tratamiento biológico.
- Caudal de recirculación de fangos
- Caudal de fango a digestión.
- Caudal de fangos a deshidratación.

3.5 pH

Se define pH como el logaritmo negativo en base 10 de la actividad de los protones de una sustancia. La escala de pH varía entre 0 y 14, aunque es posible obtener valores fuera de ese rango, donde 7 representa una disolución neutra, valores menores que 7 representa una disolución ácida y valores mayores que 7 una básica. La escala al ser logarítmica implica por ejemplo que un pH de 2 contiene 10 veces más ácido que un pH de 3.

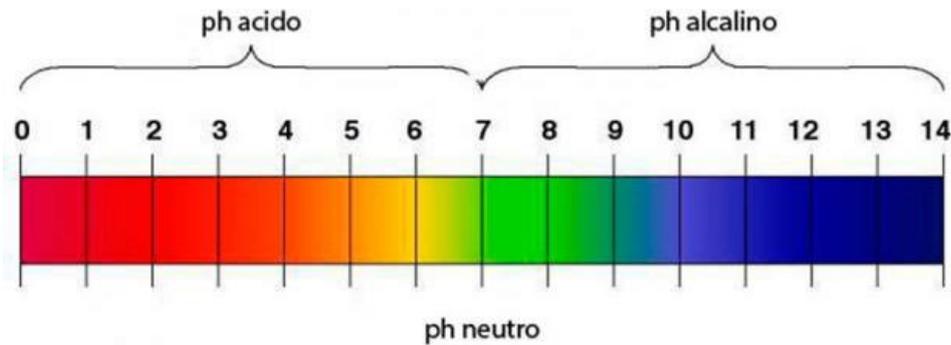


Figura 23: Escala de pH

En el tratamiento de aguas residuales municipales, condiciones extremas de pH, pueden ocasionar los siguientes efectos perjudiciales.

- Los microorganismos son sensible a los medios ácidos o básicos, por lo tanto el pH de las aguas residuales se supone que debe estar en la zona neutral, pH de 7. En niveles de pH por debajo de 5 y por encima de 10, la actividad de las bacterias prácticamente cesa.
- pH con valores por debajo de 6,5 dan como resultado destrucción de materiales metálicos y componentes mecánicos e incluso daño en la red de alcantarillado.
- La solubilidad de muchas sustancias varía con el pH y la temperatura. Se pueden dar precipitados no deseados.

Aunque el pH es una variable importante en todos los procesos biológicos, es especialmente crítica en la digestión anaerobia y en la nitrificación donde se liberan grandes cantidades de protones, dando lugar a una acidificación y fallo del proceso. Por tanto, su medición y control son importantes. Sin embargo, en el caso del agua residual con gran capacidad tampón, las medidas de pH pueden ser menos sensibles para indicar cambios en el proceso y no son aconsejables para la supervisión y control del mismo. En esos casos deben ser reemplazados por sistemas de medida de bicarbonato.

La determinación del pH puede realizarse colorimétricamente mediante un fotómetro o potenciométricamente mediante pHmetro, siendo esta segunda técnica la más utilizada gracias a su gran precisión y rango de medida.

pHmetro

Miden el potencial eléctrico a través del electrodo cuando se meten en el agua y lo compara con un electrodo de referencia, que tiene un potencial eléctrico constante, y además cuenta con un dispositivo compensador de temperatura que ajusta la medida.

Los métodos colorimétricos se basan en el cambio de color al añadir un indicador, y midiendo la absorbancia al hacer pasar un haz de luz por la muestra. No son muy utilizados pues el área de aplicación es muy limitada y tienen bastantes interferencias.

Es una práctica común instalar electrodos de pH en una planta de tratamiento. La inmersión de estas sondas en lodos “pegajosos” ha terminado en el desarrollo de diferentes estrategias de limpieza: hidráulica (spray de agua), mecánica (cepillo), química (enjuague con un agente limpiador) o limpieza ultrasónica. Con estas técnicas se puede alcanzar unos mayores períodos sin mantenimiento



Figura 24. pHmetro en EDAR.^{XXIII}

El pH es medido en:

- Influyente
- Tanque de aireación
- Eliminación de nutrientes
- Digestión anaerobia

3.6 Conductividad

La conductividad es la medida de la capacidad del agua para permitir el paso de una corriente eléctrica. La conductividad en el agua varía según la presencia de sólidos inorgánicos disueltos como cloratos, nitratos, sulfatos y fosfatos aniónicos (iones con carga negativa) o sodio, magnesio calcio, hierro, y aluminio catiónico (iones con carga positiva). Compuestos orgánicos como aceite, fenol, alcohol, y azúcar no son buenos conductores de electricidad, por tanto, tienen una conductividad baja en agua. La temperatura también afecta a la conductividad, cuanto más caliente está el agua, mayor es su conductividad.

La unidad básica de conductividad es el mho o Siemens. La conductividad se mide en micromho por centímetro ($\mu\text{mho/cm}$) o microsiemens por centímetro ($\mu\text{S/cm}$). El agua destilada tiene una conductividad en el rango de 0,5 a 3 $\mu\text{mho/cm}$.

Los sensores que miden conductividad son usados para monitorizar los cambios de composición en el afluente, y también son básicos en las estrategias de control de eliminación química de fósforo.

Sensores conductivos

Constan de sondas con dos electrodos que están uno en frente del otro. Se aplica corriente alterna a los electrodos que genera una corriente en el medio. La intensidad de la corriente depende de la cantidad de aniones y cationes libres en el medio. Cuantos más aniones y cationes libres contenga el líquido, mayor será la conductividad eléctrica y el flujo de corriente.



Figura 25. Sensor conductivo. ^{XXIV}

Sensores conductivos de 4 electrodos

Una alta concentración de iones en el medio deriva en una repulsión mutua de los iones, y por lo tanto, a una reducción de la corriente, es el llamado efecto de polarización. Esto puede influir en la precisión de medición de las sondas. Los sensores de 4 electrodos tienen dos electrodos que no tienen corriente, por lo tanto, no se ven afectados por el efecto de polarización. Miden la diferencia de potencial en el medio.



Figura 26. Sensor conductivo de 4 electrodos. ^{XXV}

Sensores toroidales/inductivos

Los sensores toroidales contienen una bobina de transmisión y de recepción y miden conductividad en de la siguiente manera:

- Un oscilador genera un campo magnético alterno en la bobina de transmisión, lo que induce un voltaje en el medio.
- Los cationes del medio y aniones comienzan a moverse generando corriente alterna.
- Esto induce a un campo magnético alterno a por lo tanto a una corriente que fluye a la bobina de recepción.
- La intensidad de corriente y la conductividad se incrementan con el número de iones libres en el medio.



Figura 27. Sensor toroidal/inductivo. ^{XXVI}

La conductividad es medida en:

- Afluente.
- Salida decantador primario.
- Influyente.
- Eliminación de nutrientes.

3.7 Sólidos en suspensión

Probablemente la variable más importante en el tratamiento de agua residual sean los sólidos en suspensión. Los sólidos en suspensión totales son partículas más grandes de 2 micras encontradas en el agua, si son de menor tamaño se consideran sólidos disueltos.

La medición regular de la concentración de los sólidos en suspensión es fundamental, para garantizar que se pueda reaccionar ante cualquier cambio en el proceso que sea clave para mantener una planta de tratamiento eficiente.

Los sólidos suspendidos se controlan en el tratamiento del agua para garantizar que el proceso de tratamiento biológico se lleve a cabo de manera eficiente. Si la concentración de sólidos es demasiado alta, entonces existe el riesgo de que el sistema se sobrecargue, requiriendo más oxígeno, desperdiciando energía. Si los sólidos caen, los agentes biológicos se quedarán sin alimento y comenzarán a morir, lo que provocará una disminución de la eficiencia y un costoso proceso de repoblación.

Hay tres principios de medición:

Óptico: con la llegada de los detectores sensibles de luz, se han desarrollado sensores capaces de automatizar la medición de alteraciones ópticas en una muestra iluminada. Aunque es imposible hacer una medida directa de la concentración de masa seca, los sistemas pueden dar estimaciones razonables siempre que se realice una calibración regular. Como desventaja principal encontramos que las burbujas de aire causan interferencias en la señal óptica que puede resultar en errores.

Ultrasónico: se puede determinar la concentración de biomasa por la diferencia de la velocidad del sonido entre los sólidos en suspensión y una solución libre de microorganismos. La necesidad de una referencia libre de organismos requiere la retirada de la muestra o la medición in situ de la señal de fondo. Los problemas de este método son de nuevo las interferencias con las burbujas de aire y además las fluctuaciones de temperatura puede incrementar el error.

Espectrometría dieléctrica: La aplicación de un campo eléctrico a una suspensión de células en una solución acuosa da como resultado el movimiento de iones en la solución y dentro de las células, lo que lleva a la separación de cargas o la polarización a través de la membrana. El alcance de esta polarización puede ser medida por la capacitancia de la suspensión. Con la asunción de que el estado fisiológico de los microorganismos permanece invariable, la capacitancia puede ser usada para monitorizar el contenido de biomasa. Cambios en la estructura de la membrana celular, composición y permeabilidad pueden afectar a la medida de capacitancia.

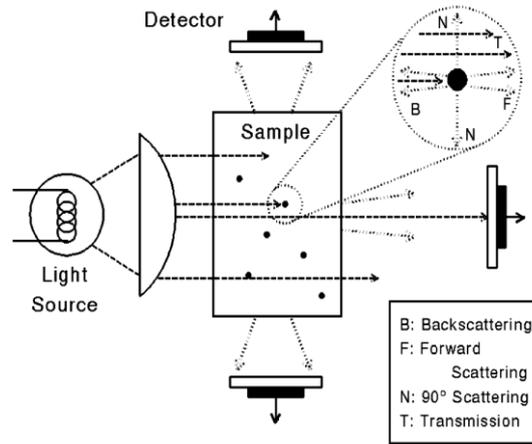


Figura 28: Método óptico. ^{xxvii}

Los sólidos en suspensión son medidos en:

- Afluente
- Tanque de aireación
- Digestión anaerobia
- Influyente

3.8 Dureza

La dureza del agua es un parámetro que indica la cantidad de calcio y magnesio en forma de carbonatos que están presentes en el agua. Ambos se suelen expresar como medida del carbonato cálcico equivalente, es decir, la suma de las concentraciones de calcio y magnesio como si fueran carbonato cálcico.

La dureza se clasifica en dureza proveniente de carbonato y dureza no proveniente de carbonato. La dureza también puede ser temporal o permanente, la dureza temporal es aquella que se puede eliminar simplemente hirviendo el agua.

A nivel industrial un agua dura puede traer consigo diversos inconvenientes como la aparición de depósitos de cal o el acortamiento de la vida útil de los equipos.

Tipo	Valor, mg/l
Agua blanda	<50
Agua intermedia	50-100
Agua dura	100-200
Agua muy dura	>200

Tabla 1. Clasificación de tipos de dureza. ^{xxviii}

Analizadores colorimétricos

Se basan en la capacidad de los metales en la absorción o atenuación de la luz de una longitud de onda determinada, se colorea la muestra con reactivos y se mide la intensidad del color fotométricamente. Se

evalúa la diferencia entre intensidades de luz emitida y luz absorbida. La absorción de luz se relaciona proporcionalmente con la concentración de metal coloreado.

La dureza es medida en el Influyente.

3.9 Oxígeno disuelto

El control del oxígeno disuelto en el reactor es de gran importancia ya que de ello depende la estabilidad de las bacterias encargadas de la descomposición de la materia orgánica. Cuando no hay suficiente oxígeno en el reactor las bacterias mueren a un mayor ritmo y el agua residual no es tratada correctamente. Si por el contrario, hay demasiado oxígeno disuelto, por exceso de aireación, la planta estará gastando más energía de la necesaria, ya que significará que los equipos de aireación están inyectando más aire del solicitado y es importante destacar que la aireación puede suponer hasta el 70% del consumo energético de la planta.

El oxígeno disuelto es un parámetro fundamental para la operación del digestor, una concentración de oxígeno disuelto muy baja hace que el medio no sea estable pues los microorganismos aerobios morirían debido a esa falta de oxígeno y los fangos no estarían correctamente tratados, entonces la estación depuradora debería reemplazar esa biomasa, lo cual es un proceso costoso para la planta. Debido a este riesgo muchas plantas se exceden en oxígeno que inyectan al proceso, lo cual es muy costoso tanto energética como económicamente además que puede originar la proliferación de organismos indeseados.

Hay dos tipos de sensores, los amperométricos y los ópticos, los primeros miden el oxígeno con bastante precisión hasta concentraciones de nivel trazas, sin embargo, necesitan un mantenimiento más exhaustivo, mientras que los ópticos tienen una rápida disponibilidad de valores de medición estables y un bajo mantenimiento.

Medidores amperométricos

Están formados por un cátodo y un ánodo. Se sumergen en un electrolito contenido en un receptáculo y se aplica una tensión a ambos. El oxígeno del producto atraviesa la membrana, entra en el electrolito y, al alcanzar el cátodo genera una corriente. El ánodo mantiene la circulación de corriente mediante una reacción química de equivalencia. La corriente generada es proporcional a la presión parcial de oxígeno en el producto.



Figura 29. Medidor amperométrico de oxígeno disuelto. Endress+Hauser.^{XXIX}

Medidores ópticos

Los medidores ópticos comprenden un LED, un fotodiodo y una sección de separación. La capa contiene moléculas marcadas que se excitan con luz naranja y responden emitiendo de luz fluorescente roja. Las moléculas de oxígeno se unen a las moléculas marcadas y atenúan (desactivación) la luz fluorescente. El fotodiodo detecta entonces la variación en la intensidad de la luz la cual refleja la presión parcial de oxígeno en el producto.



Figura 30. Medidor óptico de oxígeno disuelto. Endress+Hauser^{XXX}

El oxígeno disuelto es medido en:

- Tanque de aireación
- Eliminación de nutrientes
- Decantador secundario

3.10 Demanda biológica de oxígeno (DBO)

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es un parámetro importante y ampliamente utilizado para evaluar la calidad del agua. DBO es una medida del oxígeno requerido para biodegradación de materia orgánica en agua.

Normalmente, el componente biodegradable de las aguas residuales se mide por el estándar, método de demanda de oxígeno bioquímico (DBO5). La DBO5 es una medida de la cantidad de oxígeno disuelto requerida para la oxidación bioquímica de los solutos orgánicos en 5 días desde el momento en que la muestra de prueba se sembró con un sistema microbiano. Sin embargo, la prueba de DBO es inadecuada para el control automático debido al tiempo requerido para completar la prueba y la dificultad para lograr mediciones consistentemente precisas. Por lo tanto, la medición en línea de la carga de las aguas residuales se basa en Estimación en línea de BOD (BODst) a corto plazo. Actualmente se utilizan dos tipos de métodos BODst en línea: métodos respirométricos y sondas microbianas.

Método respirométrico

El principio de medida del método respirométrico se basa en la medición del consumo de O_2 por parte de los seres que habitan en un sustrato el cual se convierte en CO_2 . Estos análisis nos dan una idea de la velocidad de consumo de oxígeno.

Los dispositivos en los que se lleva a cabo las respirometrías, se denominan respirómetros. Estos consisten en pequeños reactores biológicos que miden velocidades de respiración de los microbios. Los respirómetros más usuales (botellas) incluyen un manómetro para medir la diferencia de presión que produce el consumo de oxígeno, aunque también hay otros métodos de medición como el electrolítico o el de entrada directa.

La producción de CO_2 en el medio, ha de ser extraída, pues en el consumo de O_2 y la generación de CO_2 se nivelaría la presión y no habría una diferencia de presión que medir. La absorción de CO_2 puede darse de dos formas:

- Con una solución tampón, que lo absorba en forma de bicarbonato disuelto en líquido.
- Mediante algún hidróxido alcalino.

Sonda microbiana

Estos dispositivos consisten en una membrana sintética con microorganismos inmovilizados como elemento biológico de reconocimiento y un electrodo de oxígeno como transductor físico.

Durante la medida los componentes orgánicos disueltos en agua son oxidados por las bacterias presentes. Dado que la intensidad de la respiración del sustrato es proporcional a DBO, la concentración de oxígeno en las proximidades de la membrana del electrodo disminuye con relación al nivel real de concentración de OD en la solución. La diferencia entre los dos valores es proporcional a la DBO.

La DBO es medida en:

- Influyente.
- Entrada decantador primario
- Salida decantador primario.
- Salida digestor aerobio.
- Salida decantador secundario.
- Efluente.

3.11 Demanda química de oxígeno (DQO)

Uno de los parámetros clave en la monitorización de plantas de tratamiento de aguas residuales, es la demanda química de oxígeno (DQO). La demanda química de oxígeno es la cantidad de oxígeno requerida para oxidar la materia orgánica de una muestra. Se expresa en forma de concentración en masa de oxígeno diatómico ($\text{mg O}_2/\text{ml}$). Es un parámetro muy utilizado en el tratamiento de aguas residuales pues nos da una idea de la cantidad de organismos que contiene.

Si las estaciones depuradoras no reducen el contenido en materia orgánica antes de que el agua llegue a su cauce natural, los microbios en el agua receptora consumirán la materia orgánica. Como resultado de esto, los microbios también consumirán el oxígeno como parte de la descomposición de los desechos orgánicos. Este agotamiento del oxígeno junto con las condiciones ricas en nutrientes se denomina eutrofización, una condición que puede llevar a la muerte a la vida animal.

Los métodos para medir la demanda química de oxígeno, se basan en la adición de un oxidante, mayoritariamente dicromato potásico (K_2CrO_7), una sal de cromo hexavalente que es de color naranja brillante. Entre el 95 y 100% de la materia orgánica es oxidada por el dicromato potásico. Cuando el dicromato potásico se reduce a la forma trivalente, se vuelve de color verde apagado. Durante la digestión es necesario tener un exceso de oxidante, para asegurarse que la reacción de oxidación se completa, por tanto, es importante conocer el exceso del oxidante. Se realiza también una digestión en una disolución de ácido sulfúrico y calor (150°C), se añaden normalmente sales metálicas con el fin de suprimir interferencias y catalizar la reacción. Los métodos más comunes para valorar la DQO son:

Valoración

En la valoración el exceso de dicromato se hace reaccionar con un agente reductor, sal de Mohr (sulfato ferroso amónico). A medida que añadimos la sal, el exceso de dicromato reacciona para convertirse en su forma trivalente, cuando reaccione todo el exceso, se alcanza el equilibrio. En este punto la cantidad de sal de Mohr, es igual a la cantidad de dicromato potásico en exceso, y se puede calcular el dicromato que ha oxidado la materia orgánica. El proceso se puede automatizar con un indicador potenciométrico.



Figura 31. Valoración. ^{XXXI}

Método colorimétrico

Se puede saber el consumo de dicromato viendo el cambio de la absorbancia de la muestra. Las muestras absorben a diferente longitud de onda debido al color de cromo trivalente (Cr^{3+}) y el cromo hexavalente (Cr^{6+}).

Para cuantificar la cantidad de cromo trivalente de una muestra después de la digestión midiendo la absorbancia de la muestra a una longitud de onda de 600nm en un fotómetro. La absorbancia del cromo hexavalente a 420nm se puede utilizar para determinar la cantidad excedida de cromo al final de la digestión.



Figura 32. Espectrómetro. ^{XXXII}

La DQO es medida en:

- Influyente.
- Entrada decantador primario.
- Salida decantador primario.
- Salida digestor aerobio.
- Salida decantador secundario.
- Efluente.

3.12 Eliminación de nutrientes

De acuerdo con las directivas de la CE, las instalaciones de tratamiento de aguas residuales están obligadas a cumplir con los permisos de descarga de nutrientes en el medio ambiente. Los altos niveles de nutrientes, como los fosfatos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales, se liberan en el medio y son la causa principal de la eutrofización, que ocurre en los océanos, lagos y ríos cuando la calidad del agua se deteriora debido a la contaminación de con este tipo de contaminantes.

Las mediciones actuales de nutrientes, como el fósforo, el amoníaco y los ácidos grasos volátiles en el agua, se basan principalmente en el monitoreo offline e implican un muestreo de datos de baja frecuencia y demoras entre el muestreo y la disponibilidad de los resultados. Sin embargo, en los últimos años ha aumentado el interés en el uso de sistemas de monitoreo en línea capaces de distinguir los cambios anormales de las variaciones normales.

Métodos ópticos

El nutriente se detecta principalmente, usando un fotosensor que mide la longitud de onda producida por la reacción química entre el fósforo y un reactivo especial. Este método tiene algunas limitaciones: el manejo de las muestras es problemático, la adquisición de un espectro de referencia y calibración son necesarios para muestras de distinto origen.

Sensores de fibra óptica

Se suele utilizar una combinación de los métodos ultravioleta-sensibles de la detección de contaminantes. Las fibras tienen tiempos de respuesta y decaimiento rápidos y pueden lograr una alta eficiencia mediante el diseño de ópticas de entrega apropiadas. Los sistemas de fibra óptica son especialmente adecuados para lugares difíciles y de difícil acceso.

Sensores amperimétricos, potenciométricos y conductimétricos

Estos sensores se utilizan ampliamente en la medición de la contaminación del agua. Estos sensores cambian de propiedades como resultado de la interacción con el componente objeto de medida.

Biosensores

Los biosensores se han aplicado ampliamente a una variedad de problemas analíticos en medicina, alimentos, industrias de procesos, seguridad, defensa y para el monitoreo ambiental, incluida la evaluación de la calidad del agua. Un biosensor es un dispositivo analítico que convierte una respuesta biológica en una señal eléctrica.

La eliminación de nutrientes es medida en:

- Influyente.
- Efluente.
- Decantador primario.
- Digestor aerobio.
- Decantador secundario.

3.13 Potencial Redox

En el tratamiento de aguas residuales, el potencial de oxidación-reducción es la medida de la capacidad del agua residual para permitir la existencia de reacciones de biológicas.

El potencial redox (ORP) se mide en milivoltios (mV). En la escala de ORP, la presencia de un agente oxidante como el oxígeno incrementa el valor del potencial redox, mientras que la presencia de un agente reductor como un sustrato, disminuye el valor del potencial redox. Monitorizando el ORP del agua residual, un operador puede determinar qué reacción biológica está ocurriendo y si las condiciones operacionales deberían ser cambiadas para prevenir o potenciar esa reacción.

El potencial redox es una unidad de medida de la actividad de los electrones en medio acuoso. Un metal precioso actúa de elemento medidor donde los electrones activos se unen. El potencial medido en este electrodo depende del número de los electrones activos en el medio.

El valor del potencial redox se calcula con la diferencia de potencial, la referencia y el sistema de medida utilizando la ecuación de Nernst.

La interpretación de mediciones de ORP se basa en la detección de zonas singulares con forma de rodillas en perfiles ORP. Las rodillas indican la aparición de un sistema tampón redox, comparable a un sistema de tampón de pH en titulaciones de ácido/base.

El ORP se mide usando un sensor electroquímico llamado sensor ORP o REDOX. Al igual que con los sensores de pH, el tipo más común de sensor de ORP es un sensor de combinación con un electrodo de medición y un electrodo de referencia. La celda de medición es típicamente de un metal noble como el platino u oro, detecta cambios en el potencial de REDOX, mientras que la referencia proporciona una señal de comparación estable.

Al igual que una medición de pH, una medición de ORP no es un indicador directo de la concentración, sino más bien un indicador de actividad.

El potencial redox es medido en:

- Tanque de aireación
- Eliminación de nutrientes
- Decantador secundario
- Digestor anaerobio

3.14 Nivel de la interfase de fango

En el tratamiento de aguas residuales, las suspensiones se separan en sus componentes sólidas y líquidas por sedimentación. Para operar este proceso económica y eficientemente en la práctica, es indispensable monitorizar la separación, las zonas de transmisión de la clarificación y fases de sedimentación continuamente.

Los sensores de nivel de fango se utilizan para el control del bombeo de los fangos. Monitorizan continuamente la separación y las zonas de transición y clarificación, para operar el proceso eficientemente.

Su principio de medida es el ultrasonido. La variable medida es el tiempo que la señal ultrasónica medida necesita alcanzar las partículas sólidas en la zona de separación y la vuelta al receptor.

Entre las ventajas que supone monitorizar la interfase del fango, la mejora la calidad del producto y la reducción de los desechos son las más destacables.

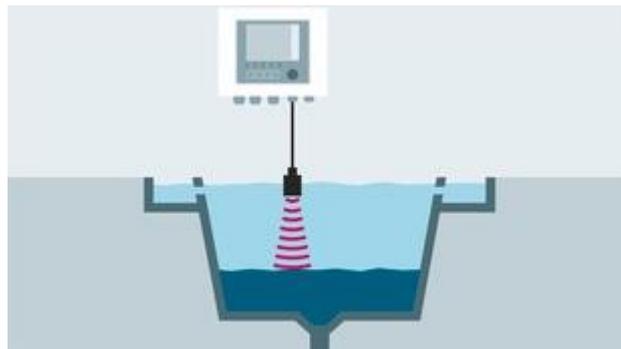


Figura 33. Medidor de interfase de fango. ^{xxxiii}

El nivel de la interfase de fango es medido en:

- Decantador primario.
- Decantador secundario.
- Digestor aerobio.

3.15 Turbidez

La turbidez es una característica del agua, que mide la cantidad de luz que dejan pasar las partículas en suspensión que contiene. Esta turbidez puede ser causada por partículas orgánicas e inorgánicas y a su vez ésta puede ser temporal o permanente debido a la naturaleza de las mismas.

La turbidez es una característica típicamente óptica, a mayor turbidez el color del agua cambia, además conforme aumenta la turbidez del agua se dan ciertas variaciones en otros parámetros. Una turbidez elevada reduce el contenido de oxígeno disuelto pues, reduce la capacidad de ciertos organismos, al no recibir el aporte lumínico necesario para realizar la fotosíntesis y también porque las aguas turbias absorben más calor que las limpias, algo que reduce el oxígeno disuelto.

La turbidez afecta a los organismos acuáticos, aguas con una turbidez elevada puede obstruir las branquias de los peces, reducir su resistencia a las enfermedades y demás efectos perniciosos para la biomasa acuática.

La turbidez afecta a la operación de tratamiento de aguas residuales, por ejemplo dificulta la desinfección al proteger algunos microbios, algunos de ellos patógenos, del desinfectante. La medición de la turbidez del agua da un indicador del nivel de la efectividad de tratamiento de la misma.

La turbidez se suele medir con un turbidímetro, que mide la intensidad de un haz de luz a 90° cuando éste pasa por la muestra de agua. Las unidades de turbidez de un nefelómetro calibrado se denominan unidades nefelométricas de turbidez (UNT). Hasta cierto punto, la cantidad de luz que se refleja para una cantidad dada de partículas depende de las propiedades de las partículas, como su forma, color y reflectividad, por esta razón (y la razón por la que las partículas más pesadas se asientan rápidamente y no contribuyen a una lectura de turbidez), una correlación entre la turbidez y los sólidos suspendidos totales (TSS) nos puede llevar a error.

Se mide la turbidez para evaluar la calidad del agua, así como, la eficiencia de los procesos de tratamiento de la misma, como por ejemplo, la decantación.



Figura 34. Turbidímetro laboratorio y en continuo^{xxxiv}

Algunas recomendaciones para el uso de turbidímetros.

- Para el control del caudal que llega al turbidímetro se deberían instalar una válvula y un rotámetro
- El sensor debería estar lo más cercano al punto de medida, para evitar retrasos.
- Si la corriente tiene sólidos sedimentables, la velocidad de la línea debe ser lo suficientemente alta como para evitar esta sedimentación.
- Hay que evitar el uso de tuberías transparentes para evitar la posibilidad crecimiento de algas.

La turbidez es medida en:

- Influyente.
- Salida del decantador primario
- Salida del digestor anaerobio
- Salida del clarificador.
- Efluente.

3.16 Cloro

El cloro es un importante desinfectante que se utiliza ampliamente en la industria química, así como en el tratamiento de agua. El cloro como tal es un gas venenoso, usado por ejemplo como arma química en la I Guerra Mundial, que no es compatible con la vida acuática, por eso no se suele utilizar directamente, si no en forma de disolución de hipoclorito que libera cloro de manera gradual.

El nivel cloro se utiliza como una graduación del nivel de desinfección de una corriente de agua.

El cloro residual es uno de los indicadores más útiles y sensibles usados para monitorizar los sistemas de distribución de agua.

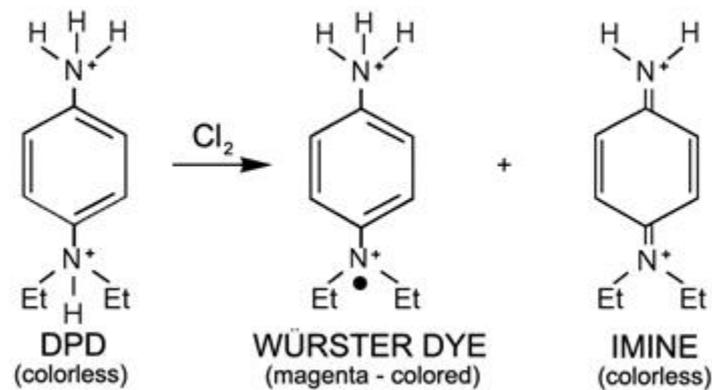
Los métodos de medida varían desde sofisticados sistemas de monitorización de cloro online a electrodos sensores portátiles. Los sistemas online pueden ser equipados con sistemas de control, señal y alarma que avisen al operador de concentraciones bajas de cloro, y algunos tienen lazos de control que ajustan automáticamente las concentraciones de cloro en el sistema. Por el contrario, el uso de sensores portátiles o kits colorimétricos requiere de técnicos para tomar muestras y leer los resultados y que inicien las acciones necesarias basadas en los resultados del test.

Podemos encontrar los siguientes tipos de métodos para su medida.

- N,N-dietil-p-fenilendiamine (DPD) método colorimétrico.
- Método iodométrico
- Electrodo amperométrico.
- Sensores de membrana polarográficos.

Método colorimétrico DPD

El DPD es oxidado por el cloro para formar dos productos de oxidación, el nivel de color producido refleja la cantidad de cloro libre o total presente en la muestra. Tanto un colorímetro como un espectrofotómetro se usan para medir el color.



Método Yodométrico

Incluye la adición de yoduro de potasio a la muestra de agua para reaccionar con el cloro libre y formar Iodo. El Iodo libre que se genera es monitorizado y correlacionado a la cantidad de cloro presente. Sin embargo, este método no puede distinguir entre cloro libre y combinado, por lo tanto, solo se debería usar para monitorizar el cloro total.

Electrodos amperométricos

Consiste en la combinación de dos sondas que usan un cátodo de platino y un ánodo de plata para amperométricamente medir el cloro libre residual, pH y temperatura. Ocurre una reacción electroquímica que genera una corriente proporcional a la concentración.

Sensores de membrana polarográficos

Es una tecnología que consiste en un par de electrodos que monitoriza el cloro libre. Los electrodos se sumergen en un electrolito conductivo y aislado de la muestra por una membrana permeable al cloro. El cloro libre se difunde a través de la membrana y se reduce a cloruro en la superficie de los electrodos, generando un flujo de electrones entre los dos electrodos. La corriente generada es proporcional a la concentración de cloro libre.

La concentración de cloro es medida en el efluente.

4 DISPOSITIVOS DE ACTUACIÓN Y COMUNICACIÓN

4.1 Sistemas de Control

Las EDAR cuentan con sistemas de control industrial e instrumentación asociada que se utiliza para la monitorización y el control de los procesos. Dichos sistemas pueden abarcar desde unos pocos controladores montados en paneles modulares hasta grandes sistemas de control distribuidos interconectados e interactivos con miles de conexiones.

Estos sistemas reciben información de datos de todos los sensores que están midiendo las variables necesarias de cualquier tipo de proceso y estas se comparan con los parámetros de ajuste deseado, en función de esta comparación el sistema calcula la actuación necesaria y responde a través de los elementos de control final.

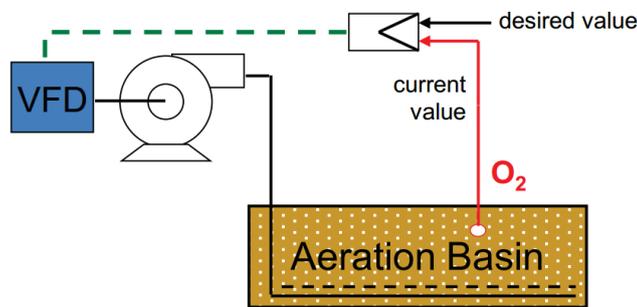


Figura 35: Ejemplo control de soplante xxxv

Los sistemas más grandes generalmente se implementan mediante sistemas de control de supervisión y adquisición de datos (SCADA), o sistemas de control distribuido (DCS) y controladores lógicos programables (PLC). Cabe mencionar que los sistemas SCADA y PLC son también escalables a pequeños sistemas con pocos bucles de control.

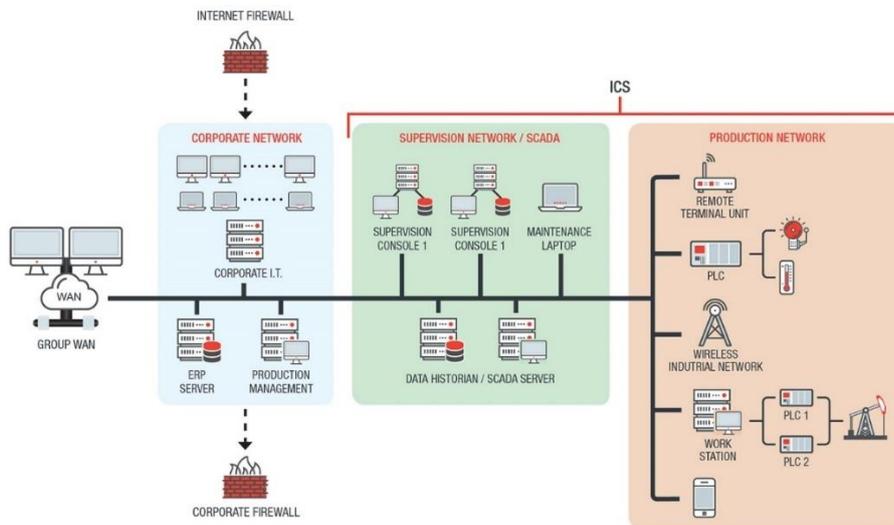


Figura 36: Ejemplo de Sistema de Control Industrial. xxxvi

4.2 Redes de control

Inicialmente, el control de las plantas EDAR se realizaba manual o mecánicamente mediante el uso de sistemas hidráulicos. A medida que la electrónica fue penetrando en el ámbito industrial, los sistemas de control mecánico fueron reemplazados por sistemas de control electrónicos que emplean transductores, relés y circuitos de control. Estos sistemas inicialmente eran de dimensiones importantes y consumían mucho espacio, a menudo requiriendo también muchos kilómetros de cableado. Con la llegada al mercado de los circuitos integrados y de los microprocesadores, las funciones de múltiples bucles de control analógico podían replicarse mediante un solo controlador digital.

Los controladores digitales comenzaron a reemplazar constantemente al control analógico, aunque la comunicación todavía se realizase usando señales analógicas. Este cambio de los sistemas analógicos hacia los sistemas digitales dio como resultado la necesidad de nuevos protocolos de comunicación. Estos protocolos de comunicaciones comúnmente se conocen como protocolos fieldbus.

Más recientemente, los sistemas de control digital comenzaron a incorporar redes a todos los niveles del control industrial, así como la interconexión en red de equipos comerciales e industriales utilizando estándares Ethernet. Esto ha dado como resultado un entorno de red que parece similar a las redes convencionales a nivel físico, pero que tiene requisitos significativamente diferentes.

Las redes de control de EDAR son de tipología industrial, y se diferencian de otro tipo de redes, como por ejemplo las comerciales, en que están conectadas a equipos físicos y son usadas para controlar y monitorizar procesos. Otras peculiaridades de este tipo de redes se resumen a continuación:

- Se pueden implementar en multitud de casuísticas, cada industria y sector son diferentes, pero siempre cuentan con sistemas de control adaptados a las necesidades concretas.
- La arquitectura suele tener una jerarquía consistente en varios niveles, por ejemplo: la conexión de instrumentación y controladores, la interconexión entre los propios controladores, la interfaz humano-máquina y el nivel de almacenamiento de datos y comunicación externa. En cada nivel son utilizados protocolos diferentes.
- Debido al hecho de que las redes de control industrial están conectadas a equipos físicos, la falla de un sistema tiene un impacto mucho más severo que el de los sistemas comerciales. Los diversos efectos de la falla de una red industrial pueden incluir daños al equipo, pérdida de producción, daño ambiental, etc.
- Las respuestas deben ser en tiempo real.
- Los paquetes de datos transmitidos suelen ser de pequeño tamaño, más especialmente en niveles bajos de la jerarquía, por ejemplo, entre sensores y controladores, donde una medida simple o una señal digital necesita ser transmitida.
- Especialmente en entornos agresivos, como los existentes en las EDAR, las redes de control deben ser resistentes a las condiciones más complicadas. Las aguas residuales, por ejemplo, contienen partículas en suspensión, pueden tener componentes corrosivos y suciedad, etc. Además en subprocesos de las EDAR como el de las cogeneración, nos podemos encontrar con altas temperaturas, gases nocivos, etc.

4.3 SCADA, PLC y DCS

SCADA

EL SCADA (Supervisory Control And Data Adquisition) es una aplicación con acceso a instrumentos y actuadores con una interfaz gráfica desarrollada. La función principal del SCADA es la supervisión del funcionamiento de la planta, por lo que la adquisición de datos y la presentación de los mismos en dicha interfaz es primordial. Un SCADA además permite que se envíen comandos que pueden controlar un hardware, por ejemplo, desde un SCADA se puede arrancar una bomba o también modificar parámetros de referencia que lógicamente afectarán al funcionamiento de los actuadores.

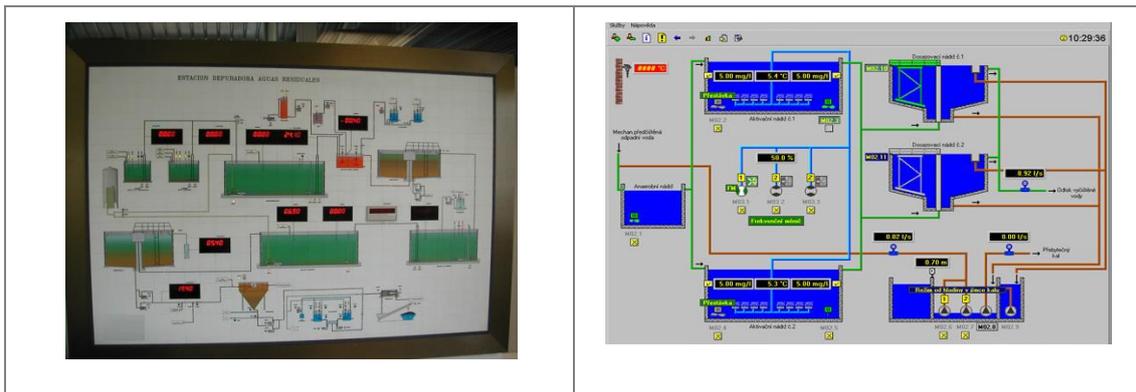


Figura 37: Panel de control en pared y SCADA en PC en dos diferentes EDAR

El hardware de control que se comunica con un SCADA se conoce como una Unidad de Terminal Remota (RTU) y generalmente es un tipo de PLC especializado. Los SCADA tienden a responder ante eventos, con el objetivo de informar solo de cambios en el estado del sistema supervisado en lugar de enviar un flujo constante de variables de proceso. Por ejemplo, un sistema impulsado que responde ante eventos enviará un valor binario cuando el flujo impulsado por una bomba sea menor que un determinado valor, para dar aviso de que la bomba tiene un problema, otro tipo de sistemas transmitiría regularmente un valor analógico que contiene el flujo a través de la tubería. Esto permite una reducción en el número de comunicaciones enviadas y reduce los requisitos de ancho de banda.

Un sistema SCADA generalmente consta de dos capas: aplicaciones de cliente que presentan el HMI y aplicaciones de servidor que coordinan y registran los datos que muestran los clientes, además de gestionar la comunicación con los dispositivos de control.

Al tratarse puramente de software, los sistemas SCADA se ven muy afectados por las tendencias en cuanto a tecnologías de información estándar, como los avances en los sistemas operativos y el hardware de la computadora con el que se ejecuta el software. Debido a ello es común encontrarse con situaciones en el que el software SCADA puede quedarse obsoleto con respecto al sistema operativo del equipo que lo ejecuta.

PLC



Figura 38. PLC. XXXVII

PLC es una abreviatura de Programmable Logic Controller, es un dispositivo que se utiliza en control industrial de procesos, automatizando el mismo. El PLC es utilizado ampliamente en la industria y en la vida cotidiana. Un PLC consta de:

- **Bastidor y fuente de energía:** es el soporte de todo el conjunto, dependiendo de las necesidades puede ser de diferentes tamaños. La fuente de energía se conecta en el bastidor y suministra una corriente directa regula a los otros módulos conector en el bastidor.
- **CPU:** es el cerebro del PLC, consiste en un microprocesador, una memoria y otros circuitos integrados para el control lógico, monitorización y comunicación. La CPU tiene diferentes modos de operación:
 - Modo programación: acepta el programa lógico descargado que se usará para escribir el programa controlador.
 - Modo ejecución: El PLC en estado de operación, haciendo todas las comprobaciones y funcionando gobernado por el programa que tiene.
 - Modo parada: algunos programas necesitan que el PLC esté parado, por eso existe este modo.
 - Modo reset: hace un reset al PLC, se puede hacer sin resetear los datos de la memoria o reseteándolo por completo.
- **Sistema de entradas y salidas:** es la conexión física entre los equipos y el PLC.
 - Inputs: pueden consistir en dispositivos analógicos o digitales. Una tarjeta de entrada digital puede manejar dispositivos los cuales den una señal que es encendido o apagado, como un pulsador o un interruptor de límite. Por otro lado una tarjeta de entrada analógica convierte un voltaje o una corriente en un número digital equivalente que puede ser entendido por la CPU, como por ejemplo, las provenientes de un termopar o un caudalímetro.
 - Outputs: como los inputs, pueden consistir en dispositivos analógicos o digitales. Una tarjeta digital de salidas enciende o apaga un dispositivo como un LED, un relé o un

motor pequeño. Una tarjeta analógica de salidas convertirá un número digital enviado desde la CPU a un voltaje o corriente real, los rangos típicos son 0-10VDC o 4-20mA y se pueden utilizar para controladores de caudalímetros y reguladores de presión.

Funcionamiento

Un PLC funciona escaneando continuamente programas e iterando el proceso muchas veces por segundo (hasta 10.000). Cuando el PLC arranca, realiza comprobaciones de hardware y software en busca de fallos. Si no hay problemas el PLC comenzará con el ciclo de escaneo, éste consiste en 3 pasos:

- Escaneo de las entradas: una forma simple de ver esto es que el PLC toma una instantánea de las entradas y resuelve la lógica. El PLC mira cada tarjeta de entrada para determinar si está encendida o apagada y guarda esta información en una tabla de datos para usar en el siguiente paso. Esto hace que el proceso sea más rápido y evita los casos en que una entrada cambia desde el inicio hasta el final del programa.
- Ejecutar programa (o ejecución lógica): el PLC ejecuta un programa, una instrucción a la vez utilizando solo la copia de la memoria de las entradas del programa de lógica de escalera. Por ejemplo, el programa tiene la primera entrada como una vez, dado que el PLC sabe qué entradas están conectadas / desconectadas del paso anterior, podrá decidir si la primera salida debe activarse.
- Escaneo de las salidas: cuando finaliza el escaneo de escalera, las salidas se actualizan usando los valores temporales en la memoria. El PLC actualiza el estado de las salidas en función de las entradas que se activaron durante el primer paso y los resultados de la ejecución de un programa durante el segundo paso. El PLC ahora reinicia el proceso iniciando una verificación de fallas.

Los PLC son ampliamente utilizados en la industria y en el tratamiento de aguas residuales, pues cuentan con las siguientes ventajas como: es un equipo de tamaño reducido y bajo coste de mantenimiento, reducción del coste de la mano de obra y da la posibilidad de controlar más de una máquina con el mismo equipo.

Como desventaja se apunta que se requiere de personal cualificado para el manejo y buen funcionamiento de estos equipos

DCS

Es un sistema de control para procesos industriales, en los que controladores autónomos se distribuyen por todo el sistema, pero hay un operador central de control de supervisión.

Un Sistema de control distribuido (DCS) es un sistema de control automatizado que consiste en varios subsistemas, incluida la captura de datos y el procesamiento de datos, que pueden intercambiar información con el campo (proceso o planta) en arquitectura distribuida o no centralizada. En otras palabras, no hay un solo ordenador controlador en el sistema, sino que varios controladores se distribuyen para las secciones de la planta y se segregan adecuadamente: la información intercambiada por los subsistemas es recopilada por los supervisores apropiados. La pérdida de un centralizador no afecta la

capacidad de mantener el control del sistema. Entre otros beneficios: no da como resultado un fallo general en el control de la planta.

Para un proceso o planta generalmente, cuenta con un gran número de bucles de control, en el que los controladores autónomos se distribuyen por todo el sistema, pero existe un control de supervisión central del operador. Esto contrasta con los sistemas de control no distribuidos que usan controladores centralizados; cualquiera de los controladores discretos ubicados en una sala de control central o dentro de una computadora central. El concepto de DCS aumenta la confiabilidad y reduce los costos de instalación localizando las funciones de control cerca de la planta de proceso, con monitoreo y supervisión remota.

Los sistemas de control distribuido surgieron por primera vez en industrias con procesos críticos de alta seguridad y de gran valor, y resultaron atractivos porque el fabricante de DCS suministraría tanto el nivel de control local como el equipo de supervisión central como un paquete integrado, reduciendo así el riesgo de integración del diseño. Hoy en día, la funcionalidad de los sistemas SCADA y DCS es muy similar, las EDAR suelen equiparse con SCADA, el DCS tiende a ser utilizado en grandes plantas de proceso continuo donde la alta confiabilidad y seguridad es importante, y la sala de control no está geográficamente remota.

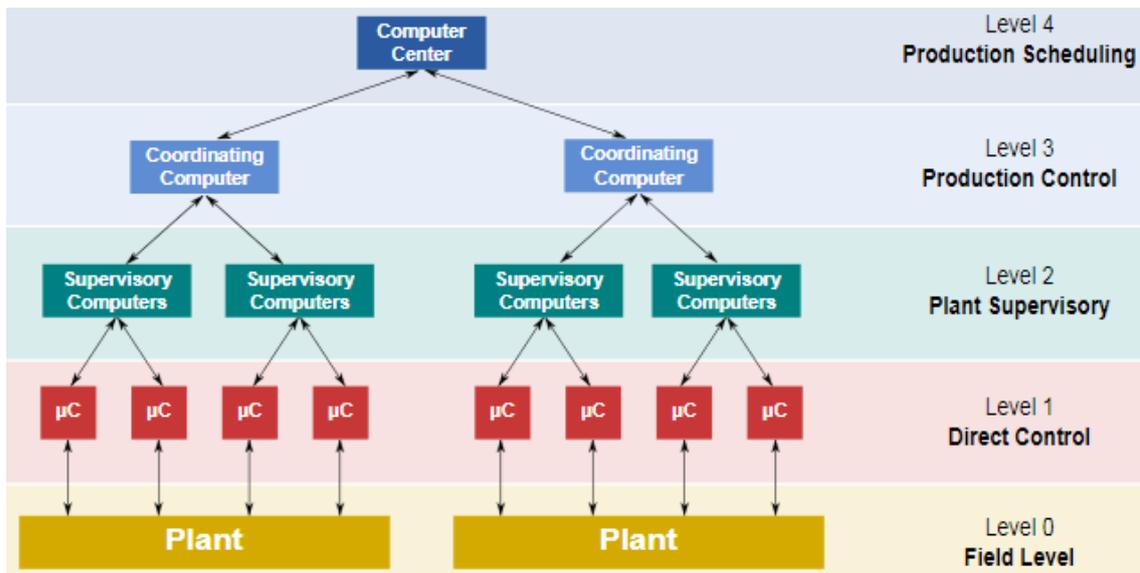


Figura 39. Estructura de un DCS. ^{xxxviii}

En el nivel 0 se encuentran los dispositivos de campo, esto significa el conjunto de variables de proceso PV (valor de proceso), SP (set point) y OP (output) variables de control que representan el objeto del sistema de control, como por ejemplo, los sensores de temperatura, de presión o las válvulas de control.

En el nivel 1 son sistemas informáticos remotos, capaces de capturar variables de campo del campo y calcular automáticamente variables de control (a través de diagramas lógicos, diagramas de flujo y controladores de control PID). La adquisición se lleva a cabo a través de módulos de adquisición de E / S dedicados y se publica en el nivel 2 a través de la red de control o red en serie (por ejemplo, modbus).

Nivel 2: Nivel de operador, lectura de variables de proceso del campo PV (valor de proceso) y control de las variables de control SP (set point) y OP (output). El operador, a través de la interfaz hombre-máquina, tiene control de campo completo.

El nivel 3 accede a los datos presentados en el nivel 2 y los procesa para que los termine (con un muestreo definido por el usuario) para generar estrategias avanzadas de control APC (basado en la historización) o sistemas de entrenamiento de simulación OTS.

En el nivel 4: Recopilación de datos para sistemas de previsión remota a través de una conexión segura de solo lectura con acceso de nivel 3 a través de DMZ. El nivel de oficina se usa principalmente con fines estadísticos.

Las similitudes entre el DCS y el PLC cada vez son mayores, el uso de un sistema de control distribuido tiene sentido en procesos que requieren de un régimen de medida continuo, y plantas de gran tamaño pues los costes que a priori podrían ser menores con la elección de PLC, se equiparán.

5 BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES

Vanrolleghem, P. A., & Lee, D. S. (2003). On-line monitoring equipment for wastewater treatment processes: state of the art. *Water Science and Technology*, 47(2), 1-34.

Spellman, F. R. (2013). *Handbook of water and wastewater treatment plant operations*. CRC Press.

Iglesias Díez, J. (2013). *Análisis y selección de medidores de caudal en instalaciones depuradoras de aguas residuales* (Master's thesis).

Gernaey, K., Bogaert, H., Vanrolleghem, P., Van Vooren, L., & Verstraete, W. (1998). Sensors for nitrogen removal monitoring in wastewater treatment. *BIOTECHNOLOGY RESEARCH SERIES*, 7, 180-207.

Haseen Khan, P. (2005). *Guidelines for the Design, Construction and Operation of Water and Sewerage Systems*. Government of Newfoundland and Labrador, Department of Environment and Conservation. Section 6.

YSI Incorporated. (2009). *The Dissolved Oxygen Handbook*. 6-45

Jouanneau, S., Recoules, L., Durand, M. J., Boukabache, A., Picot, V., Primault, Y. & Thouand, G. (2014). Methods for assessing biochemical oxygen demand (BOD): A review. *Water research*, 49, 62-82.

Korostynska, O., Mason, A., & Al-Shamma'a, A. (2012). MONITORING OF NITRATES AND PHOSPHATES IN WASTEWATER: CURRENT TECHNOLOGIES AND FURTHER CHALLENGES. *International Journal on Smart Sensing & Intelligent Systems*, 5(1).

INYGES Consultores, S.L. Anejo N°15. Automatismos y control. Saneamiento y depuración de Losar de la Vera. Confederación hidrográfica del Tago. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio ambiente.

Endress and Hauser AG, Fecha: 2017/11/24 Conductivity sensors and transmitters. Recuperado en: <https://www.endress.com/en/Field-instruments-overview/liquid-analysis-product-overview/conductivity-sensors-transmitters>

Endress and Hauser AG, Fecha: 2017/11/24 Oxygen sensors and transmitters. Recuperado en: <https://www.endress.com/en/Field-instruments-overview/liquid-analysis-product-overview/oxygen-sensors-transmitters>

Endress and Hauser AG, Fecha: 2017/11/24 Sludge level sensors and transmitters. Recuperado en: <https://www.endress.com/en/Field-instruments-overview/liquid-analysis-product-overview/sludge-level-sensors-transmitters>

Dr.Calderón Laboratorios Ltda. , Fecha: 2017/11/22 Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno DBO5 Método respirométrico
http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/Analisis_De_Aguas/Determinacion_DBO5_Metodo_Respirometrico.htm

Imágenes:

-
- ^I Ultra Electronics Nuclear Sensors & Process Instrumentation: www.ultra-nspi.com
- ^{II} Omega Engineering: <https://es.omega.com>
- ^{III} Global Sources: www.globalsources.com
- ^{IV} Vulcan: www.vulcanelectric.com
- ^V Instrumentation Today: www.instrumentationtoday.com
- ^{VI} Instrumentation Today: www.instrumentationtoday.com
- ^{VII} Instrumentation Today: www.instrumentationtoday.com
- ^{VIII} Chipkin Automation Systems Inc. www.automationwiki.com
- ^{IX} Sensors Magazine: www.sensorsmag.com
- ^X Direct Industry: www.directindustry.com
- ^{XI} Renovables del sur: <https://renovablesdelsur.com>
- ^{XII} Chipkin Automation Systems Inc. www.automationwiki.com
- ^{XIII} Pure Vita Labs: www.pvl.com
- ^{XIV} Gems Sensors: www.gemssensors.com
- ^{XV} Aqua Technology Group: www.aquatechnologygroup.com
- ^{XVI} Pure Vita Labs: www.pvl.com
- ^{XVII} www.sapiensman.com
- ^{XVIII} Tecfluid: www.tecfluid.com
- ^{XIX} Direct Industry: www.directindustry.com
- ^{XX} www.saba.kntu.ac.ir
- ^{XXI} Open Channel Flow: www.openchannelflow.com
- ^{XXII} Fluid Flow Meters: www.flowmeters.co.uk
- ^{XXIII} Benvalle: www.benvalle.com
- ^{XXIV} Endress+Hauser: www.endress.com
- ^{XXV} Direct Industry: www.directindustry.com
- ^{XXVI} Direct Industry: www.directindustry.com
- ^{XXVII} Direct Industry: www.directindustry.com
- ^{XXVIII} Agua Pura y Sana: www.aguapuraysana.com
- ^{XXIX} Endress+Hauser: www.endress.com
- ^{XXX} Endress+Hauser: www.endress.com
- ^{XXXI} Direct Industry: www.directindustry.com
- ^{XXXII} Reportero Industrial: www.reporteroindustrial.com
- ^{XXXIII} Sensara: www.sensaratech.com
- ^{XXXIV} Hach: www.hach.com / Endress+Hauser: www.endress.com
- ^{XXXV} Hatch: www.hatch.com
- ^{XXXVI} Boraltech: www.boraltec.blogspot.com.es / Reliance: www.reliance-scada.com
- ^{XXXVII} Siemens: <https://w5.siemens.com/cms/mam/industry/Automatizacion/SIMATIC-sistemas-de-automatizacion-industrial/plc/Pages/plc-siemens-SIMATIC.aspx>
- ^{XXXVIII} Wikipedia: www.wikipedia.com