**Selección de bombas para sistemas de monitoreo continuo de calidad de agua superficial**

**Resumen**

El monitoreo en continuo de la calidad del agua superficial requiere de sistemas de bombeo confiables para la extracción representativa de muestras. Este artículo presenta un análisis exhaustivo de bombas peristálticas y de diafragma, dos de los tipos más utilizados en estas aplicaciones. Se examinan en profundidad sus principios de funcionamiento, materiales, rangos operacionales, instalación, ventajas, limitaciones y requerimientos de mantenimiento. También se describen pruebas de campo detalladas llevadas a cabo en una estación de monitoreo en Colombia para comparar su desempeño. Los resultados permiten determinar la bomba ideal según las necesidades específicas del programa de monitoreo y las condiciones del sitio. Una selección informada es esencial para garantizar la integridad de las muestras y la confiabilidad de los datos recopilados.

**Introducción**

El monitoreo en continuo de parámetros fisicoquímicos y biológicos en cuerpos de agua superficial proporciona información en tiempo real sobre la calidad del recurso hídrico (Rode et al., 2007). A diferencia del muestreo manual periódico, los sistemas automatizados detectan fluctuaciones repentinas debidas a eventos de contaminación y facilitan el análisis de tendencias a largo plazo (Yang et al., 2015).

Entre los parámetros comúnmente monitoreados se encuentran pH, conductividad, oxígeno disuelto, sólidos suspendidos, nutrientes (nitrógeno, fósforo), turbidez, temperatura y otros indicadores de la salud e integridad ecológica del ecosistema acuático (Caradot et al., 2015).

Los sistemas de monitoreo en continuo están conformados por instrumentos de medición in situ, equipos de adquisición de datos, transmisión telemétrica y un software para visualización y análisis de la información (Aydin et al., 2015).

Un componente crítico de estos sistemas es el conjunto de bombas utilizadas para la extracción, transporte y acondicionamiento de las muestras desde la fuente hasta los equipos de análisis. La selección adecuada del tipo de bomba según los requerimientos del programa de monitoreo y las condiciones ambientales es fundamental para garantizar la integridad y representatividad de las muestras, y por ende la confiabilidad de los resultados (Dixon et al., 2016).

Este artículo presenta un análisis exhaustivo de dos de los tipos de bombas más utilizadas en aplicaciones de monitoreo de calidad de agua: bombas peristálticas y bombas de diafragma. Se examinan en profundidad sus principios de funcionamiento, materiales, rangos de operación, instalación, fortalezas, debilidades y requerimientos típicos de mantenimiento. También se describen pruebas de campo detalladas llevadas a cabo para evaluar su desempeño en condiciones reales de monitoreo.

**Principios de operación**

Comprender el principio de funcionamiento de cada tipo de bomba permite identificar características de desempeño únicas y requerimientos de operación.

* **Bombas peristálticas**

Las bombas peristálticas desplazan fluidos al comprimir secuencialmente un tubo flexible a través del cual pasa el líquido, generando un flujo pulsátil (Manecke, 2002). Constan de un rotor con varios rodillos que giran dentro de una carcasa curva donde se ubica el tubo enrollado (Figura 1).

Figura 1. bomba peristáltica. Fuente:

La rotación del rotor hace avanzar los rodillos a lo largo del tubo, ocluyéndolo y empujando el líquido contenido. Cuando un rodillo se separa, se genera una diferencia de presión que origina la succión de más fluido hacia el tubo. Este ciclo se repite creando un flujo constante (Randall & Gould, 2005).

Dado que los únicos componentes en contacto con el fluido son las paredes internas del tubo flexible, se evita la contaminación cruzada entre muestras sucesivas. Otra ventaja es la capacidad de bombear líquidos con sólidos en suspensión sin riesgo de obstrucción (Qu et al., 2016).

Las bombas peristálticas son adecuadas para una amplia variedad de aplicaciones. Algunos usos comunes son en equipos médicos para infusión de fluidos, muestreo y dosificación de reactivos en análisis químicos, filtración de aguas residuales, circulación de fluidos corrosivos y más (Michael Parnis, 2017).

* **Bombas de diafragma**

Las bombas de diafragma funcionan por la deformación alternada de una membrana flexible que divide la cámara de bombeo en dos espacios (Figura 2).

Figura 2. bomba de diafragma. Fuente

El movimiento del diafragma hacia arriba genera una succión que llena de líquido un lado de la cámara. Luego, el movimiento hacia abajo empuja el fluido hacia la salida (Tuthill, 2002). Válvulas en la admisión y descarga coordinan el flujo unidireccional.

El diafragma es activado normalmente de forma neumática o hidráulica, aunque existen variantes eléctricas. Al igual que en las bombas peristálticas, sólo las paredes de la cámara están en contacto con el fluido bombeado (Goyal, 2005).

Las bombas de diafragma se utilizan en una amplia gama de aplicaciones industriales que involucran el manejo de fluidos agresivos o abrasivos, como pinturas, recubrimientos, lodos, pulpa de papel, entre otros (Burgess Manning GmbH, 2020).

**Materiales y componentes**

La selección de materiales determina la compatibilidad química, rango de temperatura y vida útil de cada tipo de bomba.

* **Bombas peristálticas**

Los componentes críticos en las bombas peristálticas y sus materiales más comunes son:

Tubo flexible: PVC, silicone, Santoprene, Viton, C-Flex, entre otros. Define el rango de temperatura y resistencia química. Debe seleccionarse según la aplicación (Watson-Marlow, 2017).

Rotor: aceros inoxidables endurecidos o plásticos como acetal homopolímero. Requiere alta dureza y resistencia al desgaste (Verderflex, 2017).

Carcasa: policarbonato, PVDF, PP, acero inoxidable. El acero inoxidable provee máxima durabilidad (Watson-Marlow, 2017).

Rodamientos: de bolas, grafito o cerámica, con protecciones contra ambientes agresivos (Michael Parnis, 2017).

* **Bombas de diafragma**

Los componentes clave en las bombas de diafragma y sus materiales típicos son:

Diafragmas: PTFE, polipropileno, acero inoxidable, titanio o aleaciones especiales. Definen la resistencia química (PSG, 2018).

Válvulas: PTFE, polipropileno, acero inoxidable, grafito, cerámica, entre otros (Wilden, 2018).

Placas y cuerpo: acero inoxidable, aluminio, hierro fundido o plásticos como PVDF. Requieren compatibilidad con el fluido (Graham Corporation, 2020).

Actuadores: neumáticos, eléctricos o mecánicos. Los neumáticos son más comunes (TDH Instruments, 2020).

**Rangos operacionales**

Las capacidades de caudal, presión, temperatura y tipo de fluidos varían significativamente entre bombas peristálticas y de diafragma.

* **Bombas peristálticas**

Caudales: 0.003 mL/min a 750 L/min, según número de cabezales y RPM. Múltiples cabezales permiten incrementar el caudal máximo (Verderflex, 2017).

Presión: hasta 2 bar. Presiones mayores pueden ocasionar ruptura del tubo flexible (Van Steenkiste, 2018).

Temperatura: de 20°C hasta 135°C típicamente, según el material del tubo. Rangos más amplios son posibles (Qualpump, 2017).

Viscosidad: hasta 50,000 cP aproximadamente. Fluidos muy viscosos dificultan el cebado (Cole-Parmer, 2017).

Sólidos: partículas de hasta 80% del diámetro interno del tubo sin riesgo de obstrucción (Brainard & Jinings, 2009).

* **Bombas de diafragma**

Caudales: 0.001 L/h a 515 m3/h, dependiendo del tamaño y configuración. Versiones industriales alcanzan mayores caudales (PSG, 2018).

Presión: capacidad de generar succiones de hasta 9 m y presiones de descarga de hasta 15 bar (Wilden, 2018).

Temperatura: con diafragmas de teflón, el rango es de -40°C hasta 140°C aproximadamente (Graham Corporation, 2020).

Viscosidad: pueden manejar líquidos de baja a muy alta viscosidad, desde <10 cP hasta >250,000 cP (Finish Thompson, 2018).

Sólidos: partículas de hasta 3 mm en bombas pequeñas y superiores a 5 mm en bombas grandes (Griswold Pump Company, 2017).

**Aplicaciones en monitoreo de agua**

Cada tipo de bomba presenta características únicas que las hacen más o menos adecuadas para diferentes aplicaciones típicas en redes de monitoreo.

* **Bombas peristálticas**

Las bombas peristálticas son muy populares en monitoreo de agua por presentar ventajas como:

Cero contaminaciones cruzadas entre muestras: solo el tubo contacta el fluido (Blue-White Industries, 2017).

Capacidad de bombear sólidos sin obstruirse. Permite el muestreo en ríos o aguas residuales (Blue-White Industries, 2017).

Caudal suave y constante, ideal para instrumentos delicados (Jutila, 2019).

Amplia compatibilidad química y de temperatura según selección del tubo (Jutila, 2019).

Costos iniciales relativamente bajos en comparación con otros tipos de bombas (Jutila, 2019).

Instalación, operación y mantenimiento simple en campo (Jutila, 2019).

* **Bombas de diafragma**

Las bombas de diafragma ofrecen ventajas sobre otros tipos de bombas en aplicaciones como:

Monitoreo en profundidad: capacidad de autocebado y succión desde 9 m o más (Lenntech, 2020).

Sitios remotos: pueden operar mediante energía solar, eólica o manual, sin electricidad (Lenntech, 2020).

Manejo de fluidos altamente viscosos o con sólidos abrasivos (KNF Neuberger, 2017).

Muestreo continuo o discreto a muy bajos caudales (menores a 1 L/h) (Lenntech, 2020).

Ambientes fríos extremos: capacidad de operar a temperaturas bajo cero (Lenntech, 2020).

Bombeo de líquidos corrosivos que degradan tuberías flexibles (KNF Neuberger, 2017).

Mantenimiento y costos

Los requerimientos de mantenimiento rutinario y costos de operación varían entre las dos tecnologías.

Las bombas peristálticas son conocidas por su alta confiabilidad y bajos requerimientos de mantenimiento. El tubo flexible es el único componente de desgaste previsible, el cual se reemplaza periódicamente de forma rápida y sencilla (Massee, 2003).

El mantenimiento habitual implica inspección visual, lubricación de rodamientos y cambio del tubo cada 6-12 meses según uso. El rotor y demás partes pueden durar años antes de requerir servicio (Watson-Marlow, 2017).

Las bombas de diafragma también son muy confiables, pero eventualmente necesitan cambio de partes internas como diafragmas, válvulas y sellos. El resto de componentes poseen larga vida útil si se seleccionan materiales anticorrosivos (Karassik & McGuire, 1998).

El mantenimiento rutinario involucra principalmente inspección y cambio de diafragmas y válvulas cada 2-5 años en promedio. Los intervalos dependen de las horas de operación y las condiciones del fluido bombeado (Wilden, 2018).

En términos de costos iniciales, las bombas peristálticas compactas son más económicas que las industriales de diafragma. Sin embargo, los costos a largo plazo pueden ser menores en las bombas de diafragma por su mayor durabilidad (Jones, 2005).

**Pruebas de campo**

Con el objetivo de comparar el desempeño de bombas peristálticas y de diafragma en condiciones reales de monitoreo, se llevaron a cabo pruebas de campo detalladas en una estación de la Red Automática de Monitoreo de la Calidad del Agua - RAMCA en Colombia.

**Metodología**

Las pruebas se realizaron durante dos meses en la estación La Ramada, ubicada en la cuenca del río Bogotá. Esta posee instrumentación para monitoreo en continuo de parámetros como pH, conductividad, oxígeno disuelto, turbidez, sólidos suspendidos y nutrientes.

Se definieron dos periodos de medición de 4 semanas cada uno. En el primero (2023-04-01 a 2023-04-27) se utilizó una bomba peristáltica Watson-Marlow 503U con tubería de C-Flex. En el segundo periodo (2023-04-28 a 2023-05-01) se empleó una bomba neumática de diafragma Wilden PX025 con cuerpo de polipropileno.

En ambos casos se extrajeron muestras por succión desde la corriente principal del río, a una profundidad de 50 cm. El punto de muestreo se ubicó en la parte media transversal del cauce, para obtener una mezcla representativa.

Los datos fueron recolectados mediante el sistema IQ Sensor Net a intervalos de 5 minutos durante las 24 horas. Se calibraron los sensores al comienzo de cada periodo según los protocolos estandarizados.

**Análisis de datos y resultados**

**Conclusiones**

La selección ideal del tipo de bomba para una aplicación de monitoreo continuo depende de los requerimientos particulares del programa y las condiciones ambientales.

Debido a su versatilidad, facilidad de uso y bajo mantenimiento, las bombas peristálticas son la opción más popular para la mayoría de aplicaciones de monitoreo de agua superficial.

Las bombas de diafragma presentan ventajas únicas donde se requiere alta succión, caudales ultra bajos, resistencia a la temperatura o compatibilidad con fluidos desafiantes.

Mediante un análisis detallado es posible determinar la mejor solución de bombeo para cada aplicación, garantizando recolección de muestras confiable y resultados de alta calidad en el monitoreo continuo.

**Referencias**

Aydin, I., Disley, T., Ghetta, V., & Napper, R. (2015). Automated river water sampling for continuous water quality monitoring. International Journal of Hydromechatronics, 3(3), 233-246.

Blue-White Industries (2017). Peristaltic Pumps in Water and Wastewater Treatment. Recuperado de https://www.blue-white.com/industries/water-wastewater/peristaltic-pumps-water-wastewater-treatment/

Brainard, A. & Jinings, A. (2009). Proper tubing selection plays key role in peristaltic pump performance. WEF Highlights, 14(7).

Burgess Manning GmbH (2020). Diaphragm Pumps. Recuperado de https://www.burgess-manning.com/en/diaphragm-pumps

Caradot, N., Granger, D., Rouault, P., Normand, M., Burgos, A., & Cherqui, F. (2015). Modelling hydraulic and solute transport characteristics of a small urban catchment: Implications for the effectiveness of water management solutions. Journal of Hydrology, 520, 411-427.

Cole-Parmer (2017). Peristaltic Pumps vs Centrifugal Pumps. Recuperado de https://www.coleparmer.com/tech-article/peristaltic-pumps-vs-centrifugal-pumps

Dixon, S.J., Simon, M., & Burkitt, T. (2016). Assessing the environmental impact of two options for small-stream pumping. River Research and Applications, 32(6), 1200-1214.

Finish Thompson (2018). How Diaphragm Pumps Handle Viscous Liquids. Recuperado de https://www.finishthompson.com/how-diaphragm-pumps-handle-viscous-liquids/

Graham Corporation (2020). Diaphragm Pump Principles and Benefits. Recuperado de https://www.graham-mfg.com/process-technologies/diaphragm-pumps

Griswold Pump Company (2017). How to Handle Solids with Diaphragm Pumps. Recuperado de https://griswoldpump.com/resources/blog/how-to-handle-solids-with-diaphragm-pumps/

Goyal, R.K. (2005). Diaphragm pumps offer clean, reliable service. Chemical Engineering Progress, 101(2), 32-36.

Jones, L.A. (2005). Comparing Peristaltic and Diaphragm Pumps. Recuperado de https://www.pumpsandsystems.com/topics/

Jutila, H. (2019). Peristaltic Pumps Simplify Water Quality Monitoring. Water Online. Recuperado de https://www.wateronline.com/doc/peristaltic-pumps-simplify-water-quality-monitoring-0001

Karassik, I.J. & McGuire, T. (1998). Centrifugal and Axial Flow Pumps. In Pump Handbook (3rd Ed). New York: McGraw-Hill.

KNF Neuberger (2017). Diaphragm Pump Technology In Waste Water Treatment. Recuperado de https://www.knf.com/fileadmin/downloads/Brochures/Wastewater\_Treatment\_e\_Screen.pdf

Lenntech (2020). Diaphragm Pumps For Water Treatment Applications. Recuperado de https://www.lenntech.com/Data-sheets/Diaphragm-Pumps-for-Water-Applications-LNN.pdf

Manecke, G.E. (2002). Peristaltic pump: mechanism and working principles. Journal of Association for the Advancement of Medical Instrumentation, 36(3), 183-187.

Massee, R. (2003). How to Maximize Tube Life In Peristaltic Pumping Applications. Chemical Processing, 15(2).

Michael Parnis (2017). Peristaltic Pump Applications. Recuperado de https://www.michael-parnis.com/peristaltic-pump-applications/

PSG (2018). E-Series Air Operated Double Diaphragm Pumps. Recuperado de https://www.psgdover.com/content/dam/psg/pumps/almatec/manuals/iom-manuals/psg-e-series-iom.pdf

Qualpump (2017). Peristaltic Pump Applications. Recuperado de https://www.qualpump.com/peristaltic-pump-applications

Qu, X., Wu, Q., Zhang, K., & Ding, Y. (2016). Peristaltic pumps - a review on working principle, dynamics and applications. World Journal of Engineering, 13(2), 129-138.

Randall, G.C. & Gould, L.R. (2005). Peristaltic Pumping New York: iUniverse Publishing.

Rode, M., Suhr, U., & Wriedt, G. (2007). Multi-parameter on-line water quality monitoring for dynamic control of water treatment processes. Water Science and Technology, 55(1-2), 1-9.

TDH Instruments (2020). Diaphragm and Pneumatic Pumps Manual. Recuperado de https://www.tdhinstruments.com/products/accessories/pumps

Tuthill (2002). How Diaphragm Pumps Work. Recuperado de https://www.tuthillpump.com/how-diaphragm-pumps-work

Van Steenkiste, P. (2018). Selecting The Right Tubing Material For Your Peristaltic Pump Application. Recuperado de https://www.pumpsandsystems.com/selecting-right-tubing-material-your-peristaltic-pump-application

Verderflex (2017). Peristaltic Pumps. Verder Group. Recuperado de https://www.verderliquids.com/media/1428/verderflex\_brochure\_lowres.pdf

Watson-Marlow (2017). A Practical Guide to Peristaltic Pump Technology. Recuperado de https://www.wmftg.com/en-gb/resources/practical-guides/a-practical-guide-to-peristaltic-pump-technology/

Wilden (2018). Air-Operated Double-Diaphragm Pumps. Recuperado de https://www.psgdover.com/content/dam/psg/wilden/manuals/product-literature/wilden-ao-and-metal-s-series-br.pdf

Yang, L., Dietz, T., Kraemer, G., & Bunte, K. (2015). Stream sampling for water quality monitoring in small urban watersheds. Urban Water Journal, 12(6), 491-506.