

ASEGURAMIENTO METROLÓGICO DE LA PLANTA POTABILIZADORA DE AGUA DEL SISTEMA CUTZAMALA, COMISIÓN NACIONAL DE AGUA

Carmen Marina Trejo Morales¹, Salvador Echeverría Villagómez¹, Jorge Malagón Díaz², Francisco Javier Patiño Peña², Abdías Montoya Ayala²

¹Centro Nacional de Metrología (CENAM), ²Comisión Nacional del Agua (CNA)

ctrejo@cenam.mx, saleche@cenam.mx, jorge.malagon@cna.gob.mx, francisco.patino@cna.gob.mx, abdias_ma@hotmail.com

Resumen: El artículo presenta los resultados del Proyecto MESURA[®] llevado a cabo en la planta potabilizadora de agua Los Berros, del Sistema Cutzamala, de la Comisión Nacional de Agua (CNA). El proceso de potabilización en la planta se realiza mediante tratamientos de “coagulación-floculación-precipitación-filtración”, indicados en la NOM-127-SSA-1994. En este trabajo se realizó el análisis sistémico integral de las diferentes variables que afectan al proceso, haciendo un análisis y diagnóstico de la operación de la planta y se determinaron, en base a ello, acciones de mejora en los sub-procesos de medición. El proceso y sus mediciones unitarias involucradas se modelaron con el objetivo de determinar las incertidumbres requeridas en cada una de las mediciones, esta determinación, para realizarse de manera óptima, implicó el análisis sistémico de las interacciones entre diferentes variables; con ello fue posible evaluar contra este parámetro fundamental la corrección de las mediciones realizadas. Asegurada la corrección de las mediciones, en algunos casos se realizaron recomendaciones para su automatización. Es importante enfatizar que se partió del principio de que asegurando el proceso, el producto cumplirá con las especificaciones de la norma referida.

1. INTRODUCCIÓN

La planta potabilizadora Los Berros, del Sistema Cutzamala de la CNA es la planta potabilizadora de agua superficial más grande del país. Está ubicada en Los Berros, Estado de México, a 30 km de Valle de Bravo, y procesa el agua proveniente de 9 presas de la región. Tiene una capacidad para potabilizar un gasto de 20 m³ de agua por segundo y trabaja normalmente en un nivel entre 80 y 100% de éste. La planta surte de agua a un número de aproximadamente 5 millones de habitantes de la región metropolitana, entre el Distrito Federal y el Estado de México. Como criterio de calidad, el agua suministrada por la planta debe cumplir con los parámetros y estándares de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-1994, ‘Salud ambiental, agua para uso y consumo humano —Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización’.

En el primer semestre de 2003 las autoridades de la CNA decidieron, como parte de su estrategia de mejora, realizar acciones tendientes a la certificación de la planta, específicamente en el proceso de potabilización, conforme a la norma ISO 9001: 2000. Para llevar a cabo el aseguramiento metrológico de las operaciones, la CNA contrato el Programa MESURA[®] del CENAM, y éste se ejecutó en la planta a partir del 13 de agosto del 2003, lográndose terminar en 4 meses, tiempo récord para una planta

de tal magnitud. El 12 de diciembre la planta recibió la auditoría de evaluación, siendo recomendada para su certificación sin ninguna no-conformidad relativa al punto 7.6 de la norma o a ningún otro aspecto relacionado con sus sistemas de medición. No obstante, además del aseguramiento metrológico de la operación, que es un resultado estándar de MESURA[®], como un beneficio adicional se muestra la optimización que es posible a partir del análisis sistémico integral del proceso, y las oportunidades de mejora e innovación que surgen de este análisis.

2. EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA

El proceso de potabilización se lleva a cabo en 5 módulos con capacidad de 4 m³ de agua por segundo cada uno. Las operaciones críticas son la dosificación de sulfato de aluminio —Al₂(SO₄)₃— para promover la floculación, la adición de cloro gaseoso —Cl₂— para desinfectar el agua, la difusión de los aditivos, la sedimentación o precipitación de sólidos suspendidos y su filtración final. La Fig. 1 muestra una esquematización de este proceso, así como los subprocesos relacionados para acondicionamiento y suministro de aditivos. Asimismo, se presentan las operaciones críticas de medición, cálculo y control para suministro de la cantidad requerida de aditivos.

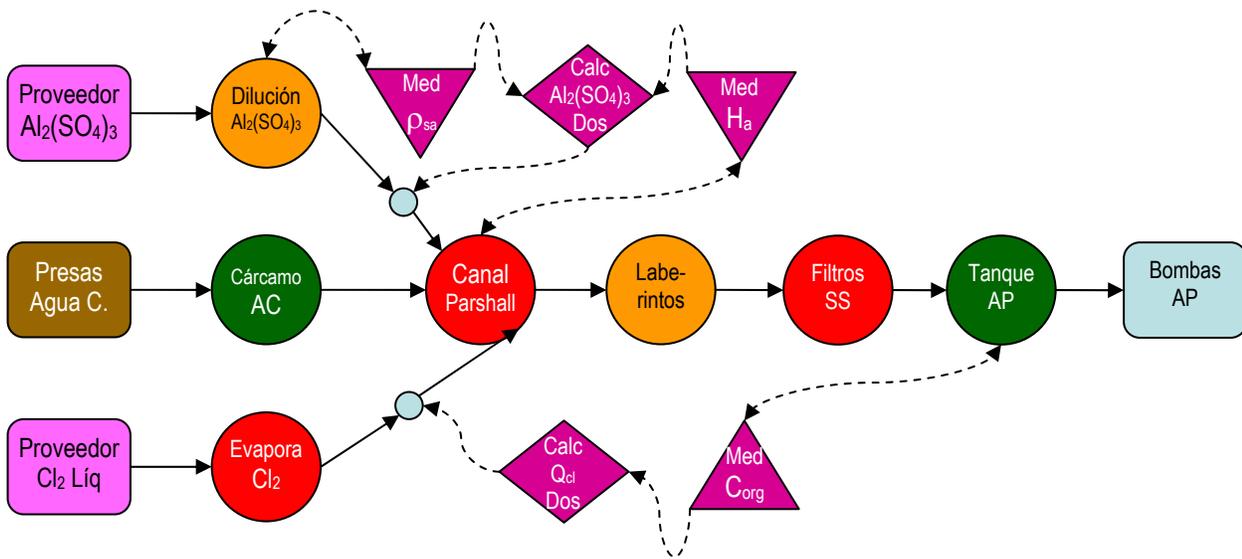


Figura 1. Proceso de potabilización de agua por floculación, sedimentación, cloración y filtración.

En la figura anterior las estaciones del proceso y operaciones son como se muestran en la tabla 1.

No	Estación	Operación
1. de Proceso		
1.1	Cárcamo	Recepción y separación agua cruda
1.2	Canales Parshall	Recepción de aditivos y medición (3.7, 3.8)
1.3	Floculadores	Floculación
1.4	Sedimentadores	Sedimentación
1.5	Filtros	Filtrado de sólidos suspendidos
1.6	Tanque de sumergencia	Recolección de agua potable (3,4)
2. de Subproceso		
2.1	Tolvas de Dilución $Al_2(SO_4)_3$	Mezclado de sulfato y agua cruda
2.2	Torre de Dosificación $Al_2(SO_4)_3$	Suministro sulfato: f (3.1, 3.2, 3.3, 3.8)
2.3	Evaporadores de Cl_2	Evaporación de cloro (3.5)
2.4	Cloradores	Suministro cloro: f (3.6)
3. De Medición y Control		
3.1	Prueba de jarras	Concentración óptima de sulfato
3.2	Densímetros	Medición de densidad de sulfato
3.3	Medidores de flujo	Gasto de sulfato
3.4	Cloro residual libre	Medición de cloro
3.5	Presión	Medición de presión en evaporadores
3.6	Presión negativa	Medición de presión negativa en cloradores
3.7	Garganta Parshall	Medición de altura en canal
3.8	Gasto de agua cruda	Cálculo de gasto en canal
3.9	Temperatura	Medición de temperatura en evaporadores
Tabla 1. Operaciones de proceso, subproceso, medición y control.		

Una estación-operación crítica que combina proceso y medición son los canales, que son ductos abiertos con un perfil diseñado conforme a la teoría de

Parshall, Ref. [2], y una garganta en la cual la medición de altura del agua puede ser relacionada directamente con el gasto en el canal por medio de una ecuación empírica o valores de tablas.

3. ESPECIFICACIONES CRÍTICAS DEL PRODUCTO

Desde el punto de vista de las mediciones, cálculos y control, las operaciones relacionadas con los subprocesos de dosificación de sulfato de aluminio y cloro gaseoso son críticas, esto es, las operaciones 3.1 a 3.4 y 3.8, que definen las cantidades requeridas de estos aditivos para lograr la calidad especificada del agua potable.

Conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-1994, Ref. [1], existen 42 parámetros cuyos estándares debe cumplir el agua para considerarse potable y apta para el consumo humano. La norma no especifica que la planta potabilizadora deba medir el 100% de los parámetros establecidos y tampoco especifica frecuencias de análisis, lo que sí establece es que el agua como producto final debe estar en la tolerancia de la especificación de los parámetros listados. Sin embargo 3 de estos parámetros son referencia para los responsables de la operación de la planta, de que el proceso está siendo eficiente. Estos parámetros se muestran en la tabla 2.

	Parámetro	Tolerancia
1.	Cloro libre residual	0,2 mg/l – 1,5 mg/l
2.	Color	Máximo 20 unidades PtCo
3.	Turbiedad	Máximo 5 NTU

Tabla 2. Parámetros que definen acciones a tomar

En el proceso real que se esquematiza en la Fig. 1, las operaciones de medición (triángulos), así como las de cálculo y decisión (rombos) que se encargan de controlar las variables de influencia para estos parámetros (calidad de aditivos, dosificación y flujos de agua) son interdependientes, y esto agrega complejidades prácticas que se discuten en las siguientes secciones.

4. ANÁLISIS DEL PROCESO Y SU MODELACIÓN

El volumen total de agua potable a obtener, a partir de los volúmenes de agua cruda, más aditivos combinados en los canales Parshall de cada módulo, menos los sólidos extraídos en el proceso de filtración puede ser representado por la expresión (1).

$$V_{acp} \oplus V_{sap} \oplus V_{clp} \otimes V_{sff} \Rightarrow V_{apf} \quad (1)$$

En la expresión anterior, para cada canal Parshall *p*, las variables son:

- v1 $V_{acp}(x_1)$ Volumen de agua cruda de entrada en p
- v2 $V_{sap}(x_2)$ Volumen de sulfato de aluminio en p
- v3 $V_{clp}(x_3)$ Volumen de cloro gaseoso en p
- v4 $V_{sff}(x_4)$ Volumen de sólidos filtrados en filtros
- v5 $V_{apf}(y)$ Volumen de agua potable de salida en filtros
- o1 \oplus Operación de agregar aditivos y mezclar
- o2 \otimes Operación de filtrar sólidos suspendidos

La expresión (1) es estrictamente una ecuación sólo si se habla de cantidades totales de agua y componentes, pero no de sus parámetros x_i , o de sus características de calidad y , que son las que se busca modificar con el proceso. Por otro lado, en esta expresión, estrictamente sólo la variable **v1** es independiente, ya que las variables **v2** y **v3** deben asignarse conforme a la primera para que el proceso se lleve a cabo correctamente, se extraigan los sólidos existentes **v4** y se obtenga la calidad requerida en **v5**, con las características especificadas por la norma y mostradas en la tabla 2. Además, puesto que la calidad y cualidad de los insumos **v1**, **v2** y **v3** pueden variar, para cada uno de ellos deben ser considerados sus parámetros específicos x_i . Por otro lado, puesto que el proceso no es estático sino continuo, las cantidades en proceso son gastos y no volúmenes, así que la expresión (1) debe ser derivada con respecto al tiempo para obtenerlos.

Con las consideraciones anteriores, la expresión (1) puede ser escrita:

Q_{acp}	\oplus	Q_{sap}	\oplus	Q_{clp}	\otimes	Q_{sf}	\Rightarrow	Q_{apf} (2)
Variable Independiente con parámetros x_1		Variable Codependiente a ser calculada con $Q_{acp}(x_1)$ y parámetros x_2 de V_{sap}		Variable Codependiente a ser calculada con $Q_{acp}(x_1)$ y parámetros x_3 de V_{clp}		Variable Dependiente a ser obtenida automáticamente con $Q_{acp}(x_1)$, $Q_{sap}(x_2)$ y $Q_{clp}(x_3)$		Variable Dependiente a ser obtenida automáticamente dadas las anteriores

5. ASEGURAMIENTO METROLÓGICO DEL PROCESO

En el proceso existen 2 subprocesos de preparación y dosificación de los aditivos:

5.1 Dilución y dosificación de sulfato de aluminio Al_2SO_4 para eliminación de sólidos

5.2 Evaporación y dosificación del cloro Cl_2 para desinfección de agua

La adición del sulfato de aluminio es crítica para provocar la floculación, en la cual el sulfato difundido en el agua cruda provoca el aglutinamiento de los sólidos suspendidos en ésta para su posterior precipitación y filtración final. La difusión del sulfato, la floculación y la precipitación requieren cierto movimiento del agua y cierto tiempo que son logrados mediante el paso de ésta por los laberintos (sistema hidráulico), en algunos casos, ayudado por agitadores (sistema mecánico) al inicio de ellos.

La adición de cloro es crítica por su función como desinfectante. La acción del cloro gaseoso que se dosifica en los canales Parshall debe destruir los organismos vivientes potencialmente infecciosos contenidos en el agua, así se asegura la disminución de gérmenes patógenos hasta una concentración inocua. Los contenidos de cloro residual libre deberán estar dentro de los límites especificados en la norma Ref. [1], tabla 2.

Con cada uno de los subprocesos mencionados existen operaciones de medición, cálculo y control del aditivo que son críticas para la calidad del agua obtenida.

En la aplicación de la Etapa I del Programa **MESURA**[®] [4] se investigaron las variables críticas del proceso, así como elementos para determinar su incertidumbre requerida. Conforme a estos datos, en las Etapas II y III se realizó el diagnóstico específico por cada una de ellas, se diseñaron las cartas de trazabilidad correspondientes y se recomendaron acciones para lograrlas. Estas

acciones se llevaron a cabo en la Etapa IV y consistieron en calibración de patrones y equipo, suministro de materiales de referencia, capacitación y asesoría para actualización de procedimientos.

Como acción prioritaria se logró el aseguramiento metrológico de las capacidades de medición requeridas para verificar la calidad final del producto, conforme a los requerimientos de la norma [1].

Simultáneamente, las variables críticas del proceso cuyo aseguramiento metrológico se logró son las dadas en la tabla 3.

	Variable crítica	Incertidumbre requerida	Incertidumbre de medición
1.	Gasto de agua cruda en Parshall (Q_{acp})	$\pm 2\%$	$\pm 3,5\%$
2.	Altura de agua en c. Parshall (H_a)	± 50 mm	$\pm 5,9$ mm
3.	Gasto de $Al_2(SO_4)_3$ (Q_{sap})	$\pm 1\%$	$\pm 0,19\%$
4.	Densidad $Al_2(SO_4)_3$ (ρ_{sat} , ρ_{sdt})	± 3 kg/m ³	± 2 kg/m ³
5.	Gasto de Cl_2 (Q_{clp})	$\pm 2\%$	No realizada ¹

Tabla 3. Variables críticas del proceso.

Otras variables de control y monitoreo cuyo aseguramiento metrológico se dio fueron: masa y volumen de aditivos, volumen de agua y sulfato de aluminio en tanques mediante medición de alturas con ultrasonido, presión y temperatura de cloro en proceso de gasificación, así como análisis químico de propiedades del agua para monitoreo del proceso.

Durante la aplicación del Programa se detectaron áreas de posible mejora y algunas de ellas se implantaron inmediatamente. Entre las mejoras inmediatas se realizó la eliminación de algunas mediciones que se detectaron no relevantes, y la medición más exacta de variables muy críticas como la altura en los Parshall y otras.

Con ello se logró un primer objetivo del Programa en la Planta, no obstante se detectó que en los procesos de medición y control existían otras áreas de oportunidad para posible mejora que requerían un análisis más detallado, ya que muchas operaciones se llevaban a cabo de manera rutinaria y con poco conocimiento de causa y, por lo mismo era difícil reunir elementos para proponer algún cambio. El análisis realizado se muestra a continuación.

6. ANÁLISIS DE LOS SUBPROCESOS DE ADICIÓN DE Al_2SO_4 Y Cl_2

A continuación se describen los subprocesos y su control mediante las operaciones de medición.

a) Control del gasto de sulfato de aluminio por agregar, Q_{sap} .

El sulfato de aluminio que se recibe como materia prima se agrega a los tanques en un volumen V_{sat} y se diluye con un volumen de agua cruda, esto es, sin tratar, V_{act} , para alcanzar un volumen de sulfato diluido V_{sdt} . La concentración aproximada del sulfato original C_{sao} es 7,3% a 7,7 % de alúmina y 21% a 23 % de sulfatos, y su densidad aproximada ρ_{sat} es 1,3 mg/l a 1,31 mg/l.

Una vez diluido (densidad = 1,22 mg/l – 1,28 mg/l), el sulfato está listo para agregarse a cada uno de los canales Parshall mediante dosificadores que regulan el gasto Q_{sap} cuyo control se establece en base a la medición del gasto de agua cruda a tratar en cada canal Q_{acp} y de la densidad del sulfato disuelto ρ_{sdt} . Q_{acp} se estima con una ecuación empírica (3) a partir de la medición de la altura del agua en la garganta del canal Parshall H_a y de las dimensiones del canal, W (ancho) y otros parámetros —ver Ref. [2].

$$Q_{acp} = f(H_a) = H_a \times (W \times C_p) / K_p \quad (3)$$

En esta ecuación empírica, el gasto estimado tiene un margen estimado de error de cálculo [2] de $u_{ac} = \pm 2\%$. La altura H_a , medida con regla graduada o ultrasonido, tiene una incertidumbre estimada $u_{Ha} = \pm 0,1$ m. La incertidumbre resultante de la estimación de gasto de agua cruda con u_{Ha} es $u_{Qacp} = \pm 3,5\%$

La concentración óptima de sulfato de aluminio para una calidad de agua cruda determinada se obtiene a partir de la llamada **prueba de jarras**. Dado que la calidad del agua cruda de las presas tiene alta variabilidad, incluido su contenido de sólidos suspendidos, es preciso ajustar constantemente la cantidad de sulfato de aluminio por agregar para provocar la floculación y posterior filtración. La prueba consiste en agregar un volumen de Al_2SO_4 , V_{saj} , en diferentes cantidades (típicamente 0, 1, 2, 3, 4 y 5 ml), a 6 jarras con un mismo volumen de agua cruda V_{acj} (típicamente 2 litros). El agua se deja reposar y después de 15 min se determina la turbidez, el pH y el color del agua. La concentración óptima C_{saj}^* se define por determinación visual, aquella jarra que tenga mayor

cantidad de sólidos suspendidos y menor opacidad. La resolución intrínseca de esta prueba es de 1 ml/l, 0,1 % ó 1000 ppm, como quiera expresarse. La repetibilidad y reproducibilidad de la prueba es muy alta y fue considerada 97%, ya que no se observó ninguna variación en todas las pruebas realizadas en un periodo de 2 semanas.

$$C_{saj}^* [\text{ppm}] = V_{saj}^* (\text{det visual}) [\mu\text{l}] / V_{acj} [5 \text{ l}] \quad (4)$$

Con la concentración C_{saj}^* determinada, se busca replicar esa misma concentración en el flujo de agua en los canales Parshall, lo cual es condición necesaria para lograr la floculación adecuada previa a la filtración.

Igualando la concentración óptima en canal Parshall a la de las jarras se tiene:

$$C_{saj}^* = V_{saj}^* / V_{acj} = V_{sap} (\text{por ad}) / V_{acp} (\text{calculado}) \quad (5)$$

Así, el volumen y gasto óptimos de sulfato de aluminio original requeridos en canal Parshall por volumen y gasto de agua cruda son:

$$V_{sap}^* [l] = C_{saj}^* (\text{det vis}) [\text{ppm}] \times V_{acp} (\text{calc}) [ml] \quad (6)$$

$$Q_{sap}^* [l/s] = C_{saj}^* (\text{det vis}) [\text{ppm}] \times Q_{acp} (\text{calc}) [ml/s] \quad (7)$$

No obstante, después de la operación de dilución, se cuenta en los tanques con un sulfato de aluminio diluido V_{sdt} a partir del sulfato original V_{sat} mezclado con agua cruda V_{act} :

$$V_{sdt} = V_{sat} + V_{act} \quad (8)$$

La concentración en el tanque C_{sat} , de sulfato original V_{sat} , en sulfato diluido V_{sdt} es:

$$C_{sat} = V_{sat} / V_{sdt} = V_{sat} / (V_{sat} + V_{act}) \quad (9)$$

Para obtener el volumen V_{sdt} y gasto Q_{sdt} requeridos de sulfato diluido en tanque por adicionar al Parshall se considera que la proporción final de sulfato original debe ser la misma que la determinada en (6), esto es, que $V_{sat} = V_{sap}^*$, y se tiene:

$$V_{sdt} = (1 / C_{sat}) \times V_{sat} = (C_{saj}^* / C_{sat}) \times V_{acp} \quad (10)$$

$$Q_{sdt} [l/s] = (C_{saj}^* / C_{sat}) \times Q_{acp} (\text{calc con Ha}) [ml/s] \quad (11)$$

No obstante, puesto que actualmente no se tiene buen control sobre las cantidades de sulfato de aluminio original V_{sat} y agua cruda V_{act} que se mezclan en los tanques, es preciso determinar la concentración C_{sat} por otros medios. Para esto se considera el volumen en términos de densidad y la suma de masas.

$$V_{sdt} = m_{sdt} / \rho_{sdt}; \quad V_{sat} = m_{sat} / \rho_{sat}; \quad V_{act} = m_{act} / \rho_{act}$$

$$m_{sdt} / \rho_{sdt} = (m_{sat} / \rho_{sat}) + (m_{act} / \rho_{act}) \quad (13)$$

$$m_{sdt} = m_{sat} + m_{act} \quad (14)$$

$$m_{sdt} = (\rho_{sdt} / \rho_{sat}) m_{sat} + (\rho_{sdt} / \rho_{act}) m_{act} \quad \text{de (13)}$$

De lo anterior se tiene:

$$[1 - (\rho_{sdt} / \rho_{sat})] m_{sat} + [1 - (\rho_{sdt} / \rho_{act})] m_{act} = 0 \quad (15)$$

$$m_{act} = [(\rho_{sdt} / \rho_{sat}) - 1] / [1 - (\rho_{sdt} / \rho_{act})] m_{sat} \quad (16)$$

Y reduciendo las masas a volúmenes se tiene la concentración de sulfato original en sulfato diluido en términos de densidades:

$$C_{sat} = V_{sat} / V_{sdt} = (\rho_{act} - \rho_{sdt}) / (\rho_{act} - \rho_{sat}) \quad (17)$$

Con los valores de C_{saj}^* de la prueba de jarras (4, 5) y de C_{sat} (17) calculado a partir de las densidades de agua cruda, sulfato original y sulfato diluido, medidas con densímetro, se tiene que el gasto óptimo de sulfato diluido en el canal es:

$$Q_{sdt} [l/s] = (C_{saj}^* / C_{sat}) \times Q_{acp} (\text{calc con Ha}) [ml/s] \quad (18)$$

Con este análisis ha sido posible sugerir una optimación de los procesos de medición involucrados en la dosificación del sulfato de aluminio para lograr un control más robusto y más económico. Algunas de las propuestas de optimación genéricas están referidas en la sección de conclusiones.

b) Gasificación y dosificación del cloro Cl_2 para eliminación de carga orgánica

El subproceso de gasificación y dosificación del cloro es, de alguna manera, más directo. El cloro se adquiere en estado líquido y se almacena en tanques con presión controlada. Después se transporta mediante ductos a evaporadores donde, mediante variación de temperatura y presión, se gasifica para ser suministrado al agua cruda. El análisis realizado en este subproceso fue promordialmente cualitativo, dadas las áreas de oportunidad para mejora que con él se detectaron.

La cantidad de cloro a dosificar se determina actualmente mediante control póstumo¹, esto es, realizando mediciones de cloro residual al agua potable al final del proceso y ajustando posteriormente el dosificador de gasto si los límites de control no se cumplen. Lo anterior tiene dos grandes desventajas: **a)** un tiempo de respuesta y ajuste muy largo, y **b)** una cantidad considerable de agua puede salir fuera de los límites de control.

Por lo anterior, la primera acción de mejora sugerida fue habilitar los instrumentos de medición para concentración de cloro existentes en las primeras fases del proceso, para posteriormente ajustar las

características e incertidumbre de esta determinación a los mecanismos de control para dosificación del cloro gaseoso.

7. PROPUESTAS PARA LA OPTIMACIÓN DE LOS PROCESOS DE MEDICIÓN Y CONTROL DE ADITIVOS

Con lo discutido, adicionalmente al aseguramiento metrológico del proceso en su estado actual logrado con la aplicación del Programa *MESURA*[®], se sugirieron acciones de mejora en tres aspectos principales:

1. Lograr incertidumbres tales en la cadena de mediciones que ningún eslabón sea más robusto que los otros, dado que ello redundaría en gastos excesivos, por un lado, o en vulnerabilidad del sistema, por el otro. Del análisis anterior se desprende que a fin de tener sistemas de medición óptimos debe existir una relación determinada entre las incertidumbres de medición del gasto de agua cruda Q_{acp} , la densidad del sulfato de aluminio ρ_{sdt} y el gasto del sulfato de aluminio diluido Q_{sap} . Al final cada componente de incertidumbre deberá ser ponderada en términos de su contribución al riesgo de que el proceso y el producto final queden o no fuera de los límites de control y/o especificación.
2. Automatizar mediciones habilitando equipos existentes y adquiriendo otros para mejorar el control, conforme al diseño óptimo de incertidumbres determinadas en 1.
3. Modificar puntos de medición que requieren cambios mayores, pero en algunos casos son determinantes, como la localización de medidores de ultrasonido en los canales Parshall o los medidores de cloro residual.
4. Someter a análisis algunas operaciones intermedias, como la dilución de sulfato de aluminio, que probablemente puedan eliminarse del proceso para reducir tiempos y costos.

8. CONCLUSIONES

Se ha mostrado el análisis de lo que fue el proyecto de aseguramiento metrológico en una planta potabilizadora de agua, como ejemplo de los beneficios que se obtienen cuando los sistemas de medición se abordan y analizan de manera integral y sistémica. Como se ha visto, las mayores áreas

de oportunidad se descubren con el análisis de procesos o subprocesos completos, mismos que involucran normalmente muchas especialidades de la metrología. Se muestra con ello que muchos de estos beneficios no se alcanzarían si la función metrológica se aborda de manera desagregada, analizando cada especialista de manera independiente sólo las variables o técnicas de su especialidad.

Con este y otros ejemplos es posible ver que existe una gran área de oportunidad, a nivel nacional, para realizar análisis sistémicos de necesidades metrológicas en diferentes procesos y funciones productivas.

También es posible ver que existen áreas de oportunidad en la aplicación de otras disciplinas como:

- a) Ingeniería concurrente, para el diseño óptimo de sistemas de medición integrados a procesos.
- b) Investigación de operaciones y programación lineal, para la optimación de las cadenas de incertidumbre que afectan el control de un parámetro determinado.
- c) Estadística bayesiana, para la consideración e integración de factores determinados por la experiencia en la estimación de incertidumbres.
- d) Análisis de riesgo, para la consideración integrada de estimación de incertidumbres y control estadístico de procesos en el diseño óptimo de sistemas de medición.

Finalmente, es necesario mencionar la importancia de desarrollar personal con el perfil y competencias necesarias para abordar los problemas de medición desde esta perspectiva, tanto a nivel de las empresas como a nivel de las organizaciones que prestan apoyo metrológico, y el área de oportunidad que esto significa.

9. REFERENCIAS

1. NOM-127-SSA-1994, '*Salud ambiental, agua para uso y consumo humano —Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*'
2. Norma ANSI/AWWA C560-00. '*Sluice gate flow measurements; sluice gate specifications*'
3. Plan de Calidad del Proceso de Potabilización, Planta los Berros, Sistema Cutzamala, 2003.
4. Informe *MESURA*[®] RMI-CNM-IT1-005/2003, CMTM, et al, Sep. 2003.