

COMPORTAMIENTO DE MEDIDORES ANTE FLUJO DE AGUA CON SEDIMENTOS: DISEÑO EXPERIMENTAL Y PRUEBAS

• Isaac Bonola-Alonso • Edmundo Pedroza-González •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

• Alfredo Botello-Hernández •
Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México

• Alberto Castro-Salazar •
Constructora e Impulsora Tollocan

Resumen

En México, una muy importante proporción del agua usada para riego se extrae del subsuelo por medio de pozos profundos. La medición del agua así extraída se realiza frecuentemente con medidores que tienen algunos de sus componentes en contacto directo con el flujo, y cuando el agua contiene sedimento, dichos medidores presentan mal funcionamiento y no se tiene certeza sobre cuáles son las partes que fallan ni cómo. Un comentario común es que las partes móviles, como propelas y turbinas, se desgastan por la fricción de las partículas sólidas; pero no se encontró evidencia de tal afirmación. Para tener un mejor conocimiento del proceso de falla, se diseñó y construyó un banco de pruebas, en el que se colocaron medidores bajo condiciones de flujo con sedimentos. En este artículo se presentan las características del banco de pruebas, las diferentes etapas de su construcción, los detalles del programa experimental y los resultados. Lo más notorio fue que los componentes más dañados de los medidores, contra la opinión más aceptada, no son las partes móviles, sino los apoyos y rodamientos.

Palabras clave: medidores de flujo, flujo de sedimentos, banco de pruebas, programa experimental, concentración de sedimentos, medición.

Introducción

Con objeto de aclarar el objetivo del trabajo, el desarrollo del mismo y los resultados y conclusiones, se considera conveniente describir de manera breve los componentes de los medidores utilizados. Generalmente, los medidores tienen tres partes básicas: (1) elemento primario, (2) transmisión y (3) registro. En la figura 1 se muestran los esquemas de estas partes en los medidores tipo propela, turbina y de paletas.

El elemento primario (1) es la parte del medidor que está en contacto directo con el agua y es la que, al girar, genera la información para determinar la velocidad y el

gasto que pasa en la tubería; para este caso, los elementos primarios son propelas, turbinas y paletas. Tales elementos están sostenidos por rodamientos sobre los que se apoyan para girar. La transmisión (2) es el elemento que recibe información del elemento primario y lo transmite al registro. En la mayoría de los medidores, el giro se transmite utilizando un imán. El registro (3) (denominado también presentador de datos, carátula o pantalla) es el elemento que recibe por medio del transmisor el número de giros del elemento primario y los convierte, previa calibración, a los distintos parámetros requeridos, generalmente gasto y volumen, ya sea de manera digital o mecánica, por medio de engranes y agujas.

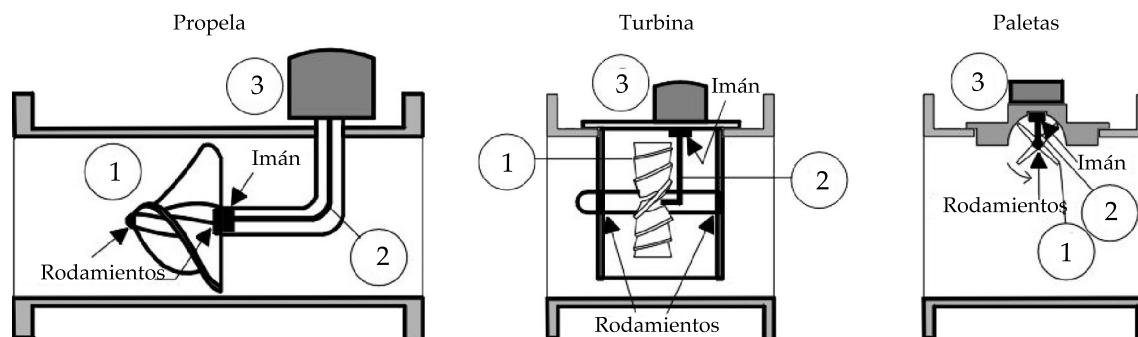


Figura 1. Esquemas ilustrativos de los componentes básicos de un medidor tipo velocidad.

Por otro lado, es común que en la mayoría de los pozos existentes en nuestro país, el agua que se extrae contenga sedimentos en suspensión en muy variadas concentraciones, y es conocido entre los fabricantes, vendedores y usuarios de medidores, que los sedimentos en el agua afectan los medidores.

Es lógico suponer que los medidores fallen o se descompongan cuando en el flujo existen sedimentos, pero no se sabe con detalle cuáles son los efectos ocasionados por los sedimentos en el medidor, ni cuánto podría resistir funcionando bajo estas condiciones. Al respecto se ha preguntado a fabricantes y distribuidores; ellos mencionan que efectivamente la presencia del sedimento provoca que fallen, pero no tienen la certeza de cómo ni cuál es el efecto. Asimismo, en trabajos de campo realizados en pozos agrícolas, se ha encontrado que algunos medidores de propela o turbina no funcionan y los usuarios señalan que el desperfecto se debe a la presencia de sedimento en el agua extraída. Tanto fabricantes como distribuidores y usuarios coinciden en que los sedimentos afectan, pero no conocen realmente cómo. La hipótesis más común es que el sedimento desgasta las aspas de las propelas y de los álabes de las turbinas, alterando el perfil hidrodinámico y afectando eventualmente el proceso de medición.

Contra esta hipótesis se presentó el caso de un medidor de turbina instalado en un sistema de riego en Atlacahualoya en el estado de Morelos, México, el cual, de acuerdo con sus dueños, tenía 25 años instalado. El medidor funcionó poco tiempo y su falla se le atribuyó a la presencia de sedimentos.

Con el fin de investigar la causa de la falla, se desarmó el medidor y se descubrió que los álabes de la turbina estaban bien biselados y no presentaban desgaste; por el contrario, se encontró material fino incrustado en el eje de giro y algunas partículas más grandes que provocaban el mal funcionamiento. El medidor se limpió y probó en el laboratorio, obteniéndose un error menor al 1% (Álvarez y Pedroza, 2004).

Se realizaron búsquedas bibliográficas y no se encontró publicación que hablara sobre el tema. Fueron estas ambigüedades, confusiones e insuficiencia del estado del conocimiento sobre el tema, lo que impulsó a los autores al desarrollo de este estudio experimental.

Objetivo del estudio

Dos preguntas se han planteado cuando en un pozo se tiene sedimento en el agua y el medidor instalado es susceptible a esta circunstancia:

- a) ¿De qué manera se ve afectado el medidor?
- b) ¿Cuánto tiempo puede funcionar adecuadamente?

Con objeto de tener alguna respuesta para la primera pregunta se realizó un experimento considerando cierta cantidad de sedimentos en el flujo, a fin de analizar qué partes del medidor se ven afectadas y de qué forma. Se estableció, sin embargo, que la segunda pregunta no sería posible contestarla en el mismo experimento, porque se tiene muy poca certeza de la cantidad de sedimento que efectivamente pasa por el medidor en condiciones reales.

Una primera dificultad para determinar la concentración de sedimentos en un tren de descarga de un pozo profundo se encuentra en la poca representatividad que tienen las muestras de agua tomadas para tal fin, ya que es común que la muestra se tome del tanque en donde descarga el pozo, lo que resulta poco representativo, ya que no se tiene la certeza de cuánto tiempo (y, sobre todo, cuánto volumen) fue necesario para que se almacenara esa cantidad de sedimentos en el tanque. Otra manera común de tomar la muestra es introduciendo un recipiente en la descarga del pozo; sin embargo, la poca capacidad de dichos recipientes y los grandes volúmenes que se descargan hacen que la muestra tomada sea poco representativa. La incertidumbre aumenta ante el comentario generalizado por parte de los usuarios de que la mayor cantidad de sedimento se tiene durante los primeros minutos de operación del pozo (coloquialmente, en el arranque), es decir, que la concentración de sedimentos no es constante durante el periodo de extracción, lo que resulta en que, definitivamente, ninguna de las formas de muestreo resulte representativa.

Es así que el objetivo del experimento fue realizar pruebas en medidores bajo condiciones de sedimento en el flujo hasta hacerlos fallar, para evidenciar la manera en que lo hacen, sin considerar el tiempo que tardan en hacerlo.

Diseño y construcción del banco de pruebas

Para satisfacer las necesidades del estudio, el banco debía cumplir con dos parámetros principales: gasto volumétrico y temperatura. El gasto se definió en función de información obtenida en un censo de más de 4 000 pozos en todo el país (Pedroza *et al.*, 2001). Se calculó el promedio de velocidad de dichos pozos y se obtuvo 1.82 m/s; como el banco de pruebas se construiría con tubería de 6 pulgadas de diámetro, el gasto de prueba resultó de 33 litros por segundo, aproximadamente. Por otro lado, el límite de la temperatura se estableció con base en lo especificado en la NOM-012-SCFI-1994 (Secretaría de Fomento y Comercio Industrial, 1997) (30 °C como máximo); dicho rango fue respaldado con lo especificado en los documentos técnicos de algunos medidores, que establecen hasta 35 °C para garantizar un correcto funcionamiento del dispositivo.

El diseño final del banco fue el resultado de una interesante serie de propuestas y consecuentes modificaciones, en función de la comparación del desempeño esperado con el real; su desarrollo se resume en los arreglos que se presentan a continuación (Botello, 2006).

Arreglo 1. Banco elemental

Se comenzó con un circuito rectangular cerrado de aproximadamente 2 m de ancho por 12 m de largo, que tenía como elemento propulsor una bomba de 15 HP, con una descarga de 6 pulgadas, diámetro que se mantiene en el resto del circuito. Se instaló también una válvula de compuerta, un termómetro y diferentes accesorios para estructurar el circuito. Durante su operación, el primer evento peculiar fue el notable incremento de la temperatura del agua a razón de 10 °C por hora, llegando incluso a superar los 50 °C; la temperatura inicial en el agua fluctuaba entre los 18 y 20 °C. El gasto alcanzado con esta bomba fue de 45 litros por segundo. Se observó además en este arreglo



Figura 2. Vista del banco elemental.

la presencia de vibraciones en el circuito, así como ruido de inestabilidades en el impulsor de la bomba, que hizo sospechar la presencia de aire dentro del sistema. En la figura 2 se muestra el primer arreglo.

Arreglo 2. Disminución en la potencia de la bomba

Con la finalidad de bajar la temperatura del agua durante la operación, se cambió la bomba de 15 HP por una de 7.5 HP, con un diámetro de descarga de 4 pulgadas, diámetro que se extendía hasta la válvula de compuerta en donde cambia a 6 pulgadas. Con estos cambios se logró muy poco, ya que aunque se redujo la potencia de operación, la temperatura continuó subiendo a razón de 8 °C por hora, superando nuevamente la temperatura establecida como límite (30 °C). Además de lo anterior, el hecho de cambiar la bomba generó una disminución del gasto a 29.5 litros por segundo, por debajo de los 33 l/s requeridos. Se observó también que esta modificación no disminuyó el problema de las vibraciones en el sistema, generadas por el aire atrapado en el circuito.

Arreglo 3. Suministro de agua de enfriamiento

Para bajar la temperatura del circuito se suministró agua fría al sistema por medio

de un tubo de media pulgada, al que se le instaló un medidor para controlar el gasto de enfriamiento y obviamente se colocó un tubo de excedencias. Además, se instaló un tramo de tubo transparente para monitorear el flujo en el circuito. Con este arreglo se obtuvieron mejores resultados, ya que la temperatura solamente se incrementó 3 °C con un gasto de enfriamiento de 0.5 litros por segundo. Sin embargo, el tubo transparente permitió observar la circulación de grandes cantidades de aire con turbulencia en el circuito.

Arreglo 4. Eliminación del aire

Para eliminar el problema del aire atrapado, se instaló en el circuito una TEE con un tubo abierto, aguas abajo de la bomba. Se observó que el aire efectivamente salía por el tubo expulsor, pero generaba una turbulencia excesiva en la superficie, por lo que se decidió presurizar el circuito, colocando una tapa de acrílico transparente, en la que se colocó una válvula para eliminar el exceso generado por el suministro del agua de enfriamiento; adicionalmente se cambió su ubicación aguas arriba de la bomba. El resultado fue satisfactorio, se eliminó el aire en el circuito y la turbulencia. Además, se comprobó que la temperatura se puede controlar con la cantidad de agua de enfriamiento que se introduce al sistema. En la figura 3 se muestra el detalle de los dispositivos instalados. En esta misma etapa se montó el circuito sobre unos soportes para elevarlo y hacer más fáciles los trabajos y las lecturas de los medidores.

Arreglo 5. Aumento del gasto, pruebas con agua limpia

Para aumentar el gasto sin cambiar la bomba de 7.5 HP, se instaló en la descarga de la bomba una ampliación de 4 a 6 pulgadas y se eliminó la válvula de compuerta, tratando con esto de disminuir las pérdidas. Como consecuencia de tal modificación se obtuvo un gasto de 33.33 litros por segundo. Se adicionó también un

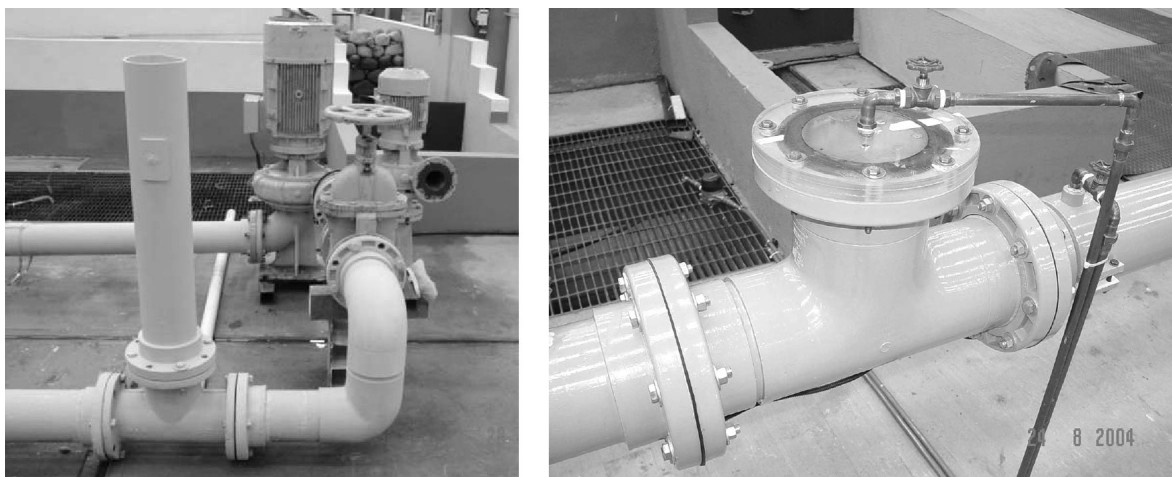


Figura 3. Propuesta inicial de la TEE (tubo abierto) y modificación posterior (presurización).

variador de frecuencias para el paro y arranque lento de la bomba, lo cual eliminó vibraciones y permitió variar los gastos de operación. Con este arreglo y cumplidas las condiciones de gasto y temperatura, se iniciaron las pruebas con los medidores funcionando con agua aún sin sedimento. En la figura 4 se muestra el arreglo final del banco de pruebas para la etapa de agua limpia.

Arreglo 7. Conversión a circuito cerrado y propuesta de un tanque de enfriamiento

Una vez monitoreado el comportamiento de los medidores con agua limpia, se incorporó el sedimento al sistema, presentándose inmediatamente un nuevo problema, ya que el sedimento era eliminado a los pocos minutos por la descarga de excedencias; es decir, que el diseño de un sistema abierto con sustitución de agua para fines de enfriamiento era inadecuado para pruebas en las que la concentración de sedimentos debía permanecer constante durante todo el programa experimental.

Al respecto se propusieron dos soluciones. Primeramente se intentaría compensar el sedimento eliminado del sistema mientras

que en la segunda se proponía cerrar el circuito, eliminado el ingreso del agua de enfriamiento y su respectiva descarga de

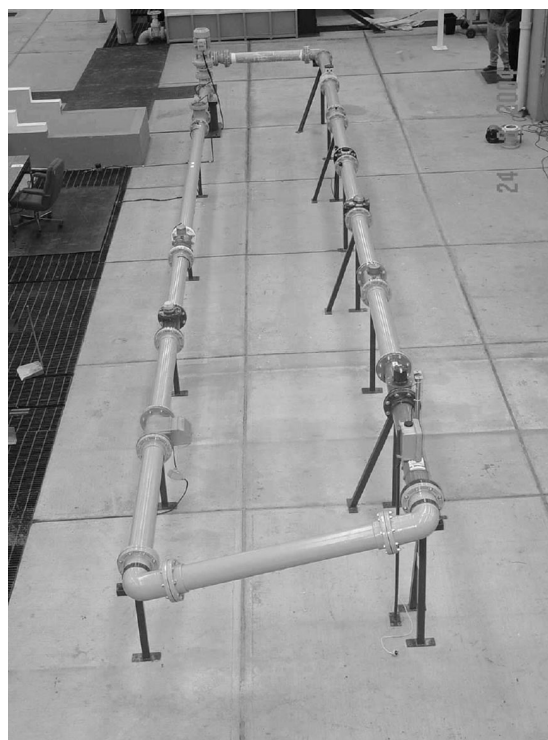


Figura 4. Arreglo del banco para agua limpia.

excedencias. La primera solución se descartó por la imposibilidad de medir con precisión la cantidad del sedimento que salía del circuito, independientemente de que esta propuesta implicaba tener una gran reserva de sedimentos para compensar, y un dispositivo o persona que lo estuviera suministrando durante todo el tiempo de operación del banco. La segunda presentaba el problema de que, al cerrar el circuito y evitar la sustitución de agua, la temperatura del agua se volvería a elevar hasta superar el límite establecido (30 °C). Para corregir este inconveniente, se diseñó un tanque de enfriamiento basado en el dispositivo de los calentadores de paso, en los que el agua se hace circular a través de un serpentín sometido al calor, de modo que cuando el agua termina su recorrido registra un incremento en su temperatura. En este caso se construyó un serpentín con tubería de cobre de una pulgada de diámetro, con un recorrido aproximado de 14 metros, el cual fue sumergido completamente en una charola con agua fría, que era sustituida constantemente. Con este dispositivo se solucionó el problema del exceso de temperatura y la pérdida de sedimento. En la figura 5 se presenta el diseño final del banco de pruebas y en la figura 6 se muestra un detalle del dispositivo de enfriamiento.

Concentración de sedimentos y granulometría

Se decidió utilizar sedimento con granulometría fina, porque se descartó la idea de que las partículas mayores desgastaran las aspas de las propelas o los álabes de las turbinas. Esta reflexión se basó en los resultados del análisis realizado al medidor del sistema de riego en Atlacahualoya, en el estado de Morelos, mencionado en la introducción. Por otro lado, si se observa el proceso de limpieza de partes metálicas con chorros de arena impulsados por bombas de gran potencia (*sandblasteo*), se puede apreciar que la arena así lanzada limpia el metal y lo pule, pero no



Figura 5. Diseño final del banco de pruebas.

lo desgasta, por lo que resulta poco probable que los sedimentos que viajan en el agua tengan tal capacidad, dada la baja velocidad. Además, dicha baja velocidad parece incapaz de levantar las partículas mayores; es más probable que dichas partículas avancen pegadas a la parte inferior de las tuberías sin tocar mayormente las turbinas o propelas. Se consideró más probable que las partículas pequeñas penetren en los espacios que existen entre los diferentes elementos móviles del medidor, afectando su funcionamiento.

En el censo realizado en más de 4 000 pozos en el país, mencionado anteriormente, se reportó información en 1 191 pozos con diferentes concentraciones de sedimentos (Pedroza *et al.*, 2001). Se encontró que el 75% de los pozos tiene una concentración de 1 500 ppm o menos, y el 97% tiene 3 000 ppm o menos (ver figura 7); inclusive se reportaron pozos con concentraciones de 5 000, 7 000 y hasta 13

355 ppm. Otro dato relacionado e interesante se encontró en el Manual del Usuario de los medidores de propela modelos FM104 y FM184 de la marca Sparling. En dicho manual se lee: "El porcentaje de sólidos no debería exceder de 5%" (www.sparlinginstruments.com). No se indica si dicho porcentaje es en peso o en volumen; en el caso de que fuera en peso, un porcentaje de 5% equivale a 6 mil ppm, aproximadamente, y si dicho porcentaje fuese en volumen, correspondería a un valor de alrededor de 13 mil ppm. Con base en estos antecedentes, para las pruebas se usaron sucesivamente concentraciones de 1 500, 3 000 y 13 000 ppm.

Se decidió usar una granulometría que iba desde arenas finas (0.02 mm) hasta limo y arcilla (0.002 mm). Los tamaños y las cantidades del sedimento utilizado en las pruebas se muestran en el cuadro 1.

Medidores utilizados

Los medidores evaluados se solicitaron a fabricantes y proveedores que aceptaron facilitarlos para realizarles las pruebas. En las primeras etapas se utilizaron cinco medidores: cuatro de propela y uno de turbina. Posteriormente se

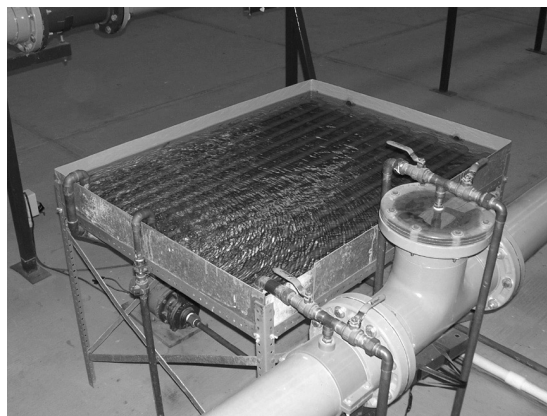


Figura 6. Dispositivo de enfriamiento.

incorporaron otros dos medidores: uno más de turbina y uno de paletas. Con objeto de proteger los intereses de los fabricantes, se decidió no identificar a los medidores con sus respectivas marcas, en su lugar se denominaron como Propela P1, Propela P2, Propela P3, Propela P4, Turbina T1, Turbina T2 y Paletas L1. Durante la instalación se tuvo el cuidado de respetar las especificaciones de cada fabricante en lo que a la longitud del tramo recto aguas arriba y abajo del medidor se refiere.

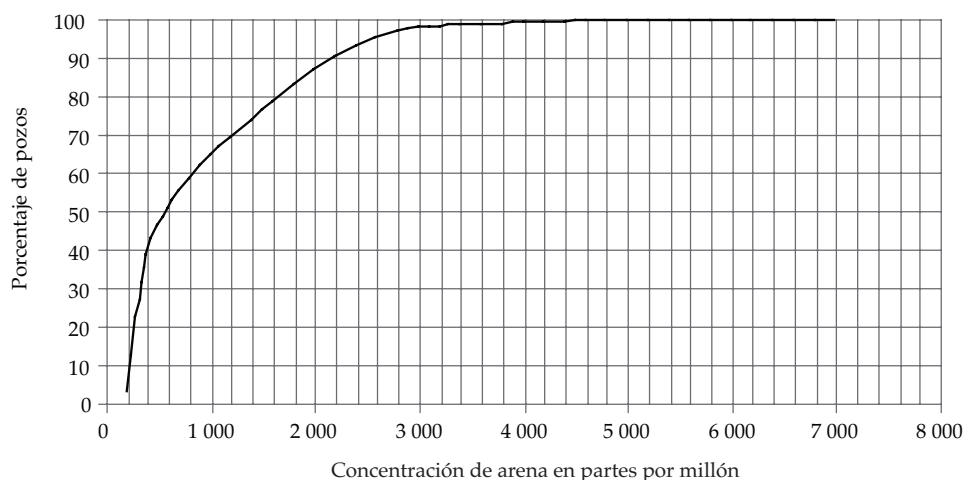


Figura 7. Porcentaje de pozos con diferentes concentraciones de sedimentos.

Cuadro 1. Características de los sedimentos utilizados.

Malla (núm.)	Tamaño (mm)	(Porcentaje que pasa, en peso)	Cantidad en g		
			1 500 ppm	3 000 ppm	13 000 ppm
100	0.149	30	229.5	459.0	1 989.0
200	0.074	30	229.5	459.0	1 989.0
Charola	< 0.074	40	306.0	612.0	2 652.0
			765.0	1 530.0	6 630.0

Programa experimental

Como ya se mencionó, los medidores se hicieron funcionar con agua limpia para descartar posibles fallas por desperfectos o cualquier motivo ajeno a la presencia del sedimento en el flujo. Superada esta etapa se iniciaron las etapas de flujo con sedimento iniciando con 1 500 ppm, posteriormente se incrementaron a 3 000 y finalmente se terminó con una concentración de 13 000 ppm. El banco funcionaba de lunes a viernes, las 24 horas, y se apagaba los fines de semana por seguridad. Cada mañana se tomaba una lectura del gasto a todos los medidores.

Primera etapa, comportamiento de los medidores en agua limpia

En la gráfica de la figura 8 se muestra el comportamiento de cada medidor durante la etapa de agua limpia. En la figura se observa que en general todos los medidores tuvieron un desempeño aceptable, ya que si bien se tienen variaciones en los gastos, dichas variaciones se mantienen en valores cercanos a cada uno de sus promedios. Los medidores P1 y P2 tienen variaciones de más del 3% respecto de su valor promedio. Los demás medidores tienen variaciones menores al 2%.

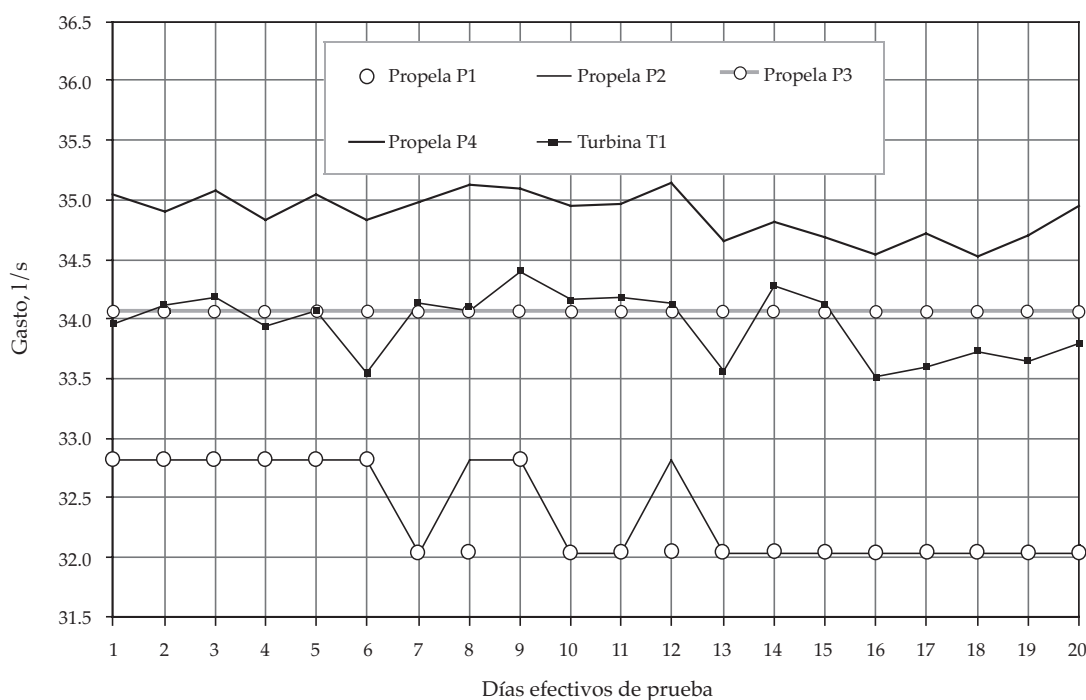


Figura 8. Comportamiento de los medidores en condiciones de agua limpia.

El comportamiento del medidor P3 parece muy estable, sin embargo debe aclararse que este medidor no presenta el gasto instantáneo, por lo que el gasto se obtuvo dividiendo el volumen registrado por el medidor entre un tiempo determinado; por el contrario, los demás medidores sí presentan el gasto instantáneo, por lo que es visible la variación del gasto en pequeños intervalos de tiempo. Normalmente estas variaciones se deben a pulsos irregulares en el flujo provocados por efectos turbulentos; también se presentan variaciones derivadas de los algoritmos de filtrado de señal que usan los medidores en el tratamiento digital de la información. Para fines de esta prueba, se consideró que los medidores funcionan correctamente, porque no se presentan tendencias en sus respectivas gráficas.

Segunda etapa, concentración de 1 500 ppm de sedimento

Cuando se adicionó el sedimento en el banco, se comenzó con 1 500 ppm y se mantuvo esta condición por veinte días; durante este periodo, los medidores no presentaron problemas en su funcionamiento. Para lograr un análisis comparativo más sencillo, los valores de las ordenadas se calcularon como la diferencia porcentual entre el gasto promedio de los medidores en agua limpia y los gastos que se fueron presentando en las etapas subsecuentes. En la gráfica de la figura 9 se puede observar que los medidores tienen un desempeño adecuado, ya que la mayoría no varía más de 1% respecto del gasto promedio en agua limpia. Nuevamente los medidores P1 y P2 son los que mayor variación presentan, sin embargo puede

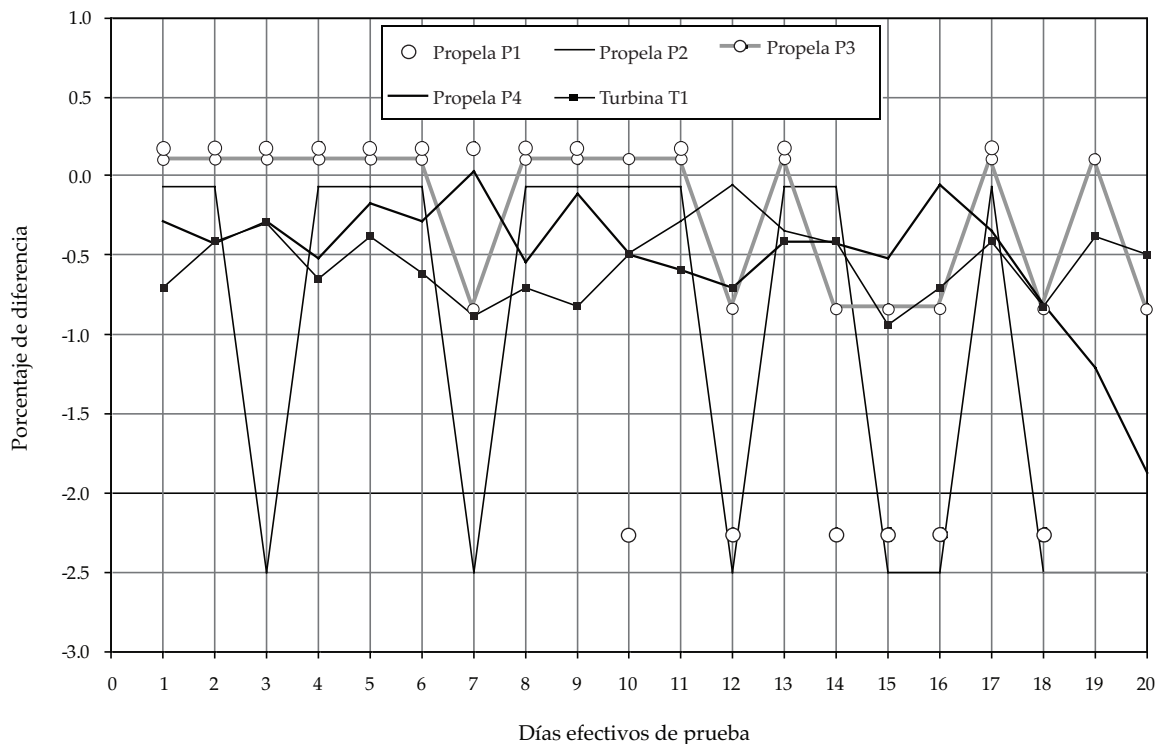


Figura 9. Comportamiento de los medidores ante una concentración de 1 500 ppm de sedimento en el flujo.

considerarse dicho comportamiento como una característica propia de cada tecnología y marca, más que por la presencia del sedimento. Solamente el medidor P4 presentó una disminución en sus registros hacia el final de la etapa.

Tercera etapa, concentración de 3 000 ppm en el sedimento

Como se ha mencionado, los experimentos se realizaron con la intención de conocer cómo fallan los medidores sin considerar el tiempo en el que lo hacen; por lo tanto, se decidió aumentar la concentración de sedimento hasta llegar a las 3 000 ppm. Los resultados de esta etapa se muestran en la figura 10.

En esta etapa es notorio el incremento de la variación, aunque no en valores excesivos, ya que se tuvieron variaciones porcentuales que

fueron desde 5% negativas hasta 2.5% positivas. De nueva cuenta, los medidores P1 y P2 son los que tienen mayores variaciones. En esta etapa, el medidor P1 presentó una caída de sus registros de 45%; se creyó que ya había fallado, sin embargo, el fabricante, que siempre estuvo muy atento al seguimiento del experimento, solicitó revisar su medidor, encontrando que efectivamente la falla no se debía al sedimento, sino a una tuerca apretada insuficientemente; se corrigió este inconveniente y el medidor funcionó de manera correcta. En esta etapa se consideró que los medidores presentaron desempeños aceptables.

Cuarta etapa, sedimento con 13 000 ppm de concentración

Aún cuando es excesiva una concentración de 13 000 ppm, sí se reportan pozos con dicha magnitud; además, se buscaba provocar el

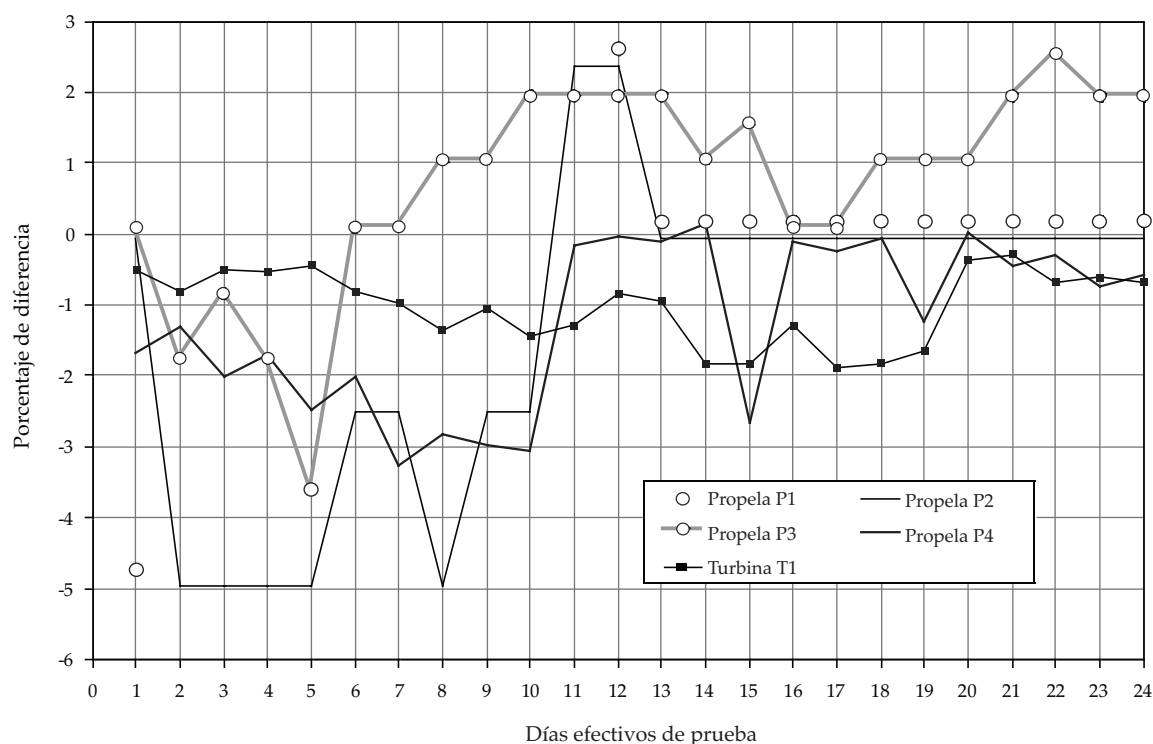


Figura 10. Funcionamiento de los medidores con 3 000 ppm de sedimento.

fallo de los medidores para observar la forma en que lo hacen, por lo tanto se aumentó la concentración hasta dicho valor. En esta etapa, un fabricante adicional facilitó un medidor de turbina y uno de paletas. Los resultados se muestran en la figura 11.

Con esta concentración, todos los medidores fallaron, aunque en diferentes tiempos; los primeros en hacerlo fueron los de turbina (T1 y T2) y el medidor de paletas L1. El caso de los medidores T2 y L1 es de llamar la atención, ya que se colocaron únicamente en esta cuarta etapa, fallando en los primeros días. Aunque también lo hizo en el mismo tiempo el otro medidor de turbina T1. Posteriormente fallaron los medidores P1 y P2, después el medidor P4 y el último en hacerlo fue el P3. Este último cayó hasta lecturas con una diferencia porcentual de más de 18% respecto de su promedio con agua limpia, después parecía recuperarse hasta fallar definitivamente el día 38 de esta etapa.

Análisis de los daños en los componentes de los medidores

Cuando todos los medidores fallaron, se dio por terminada la prueba; se desmontó cada uno y se desarmaron todos los componentes internos, analizándose con cuidado cada parte, especialmente aquellas que sufrieron algún daño. En el cuadro 2 se presenta el detalle de dicha revisión, con el objeto de comparar los diferentes análisis.

Como puede observarse en el cuadro 2, los daños en los medidores de propela y turbina comenzaron a partir de la acumulación de sedimento en los rodamientos. En los medidores de propela, la falla de los rodamientos provoca daños en los componentes más cercanos a éstos; es decir, en los ejes de giro y en los imanes. Por otro lado, en los medidores de turbina, el desperfecto en los rodamientos provoca excentricidad en el giro de las turbinas, que comenzaron a rozar el soporte

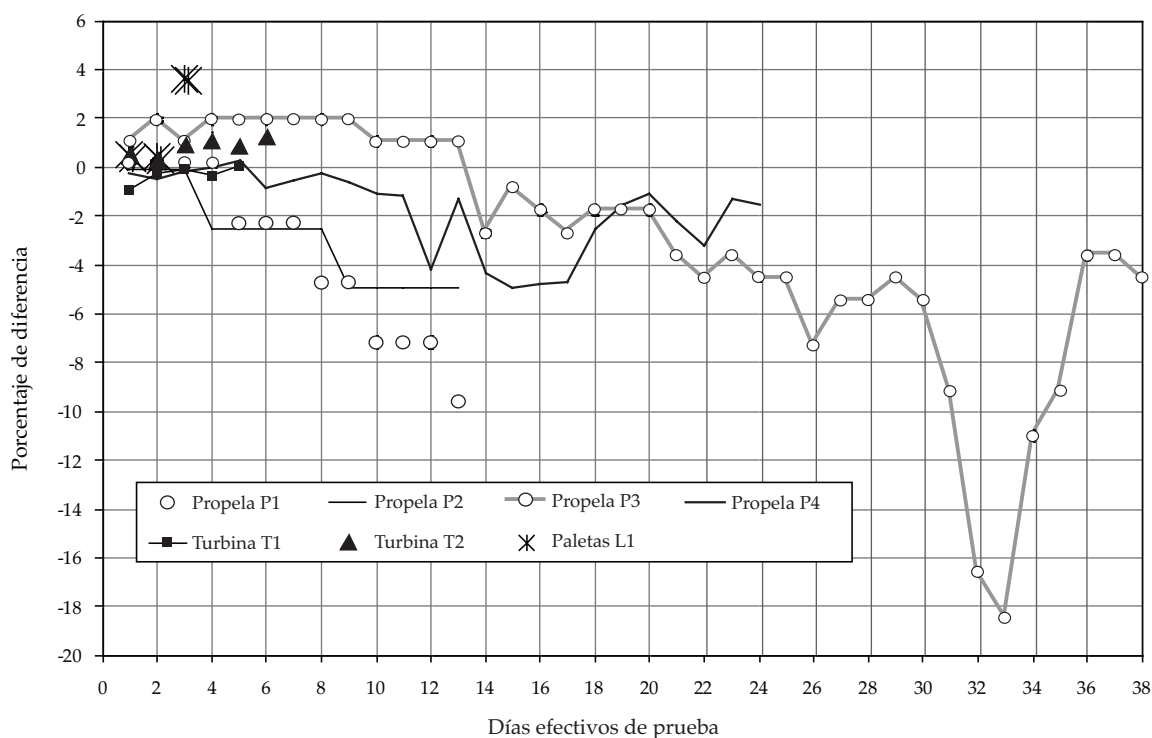


Figura 11. Funcionamiento de los medidores con 13 000 ppm de sedimento.

Cuadro 2. Descripción de las partes dañadas en los medidores.

Medidor		Descripción del daño
Propela	P1	Los rodamientos fueron los más dañados debido a la acumulación del sedimento; incluso se dañó en menor grado el eje de la propela, a pesar de estar fabricado con acero inoxidable.
	P2	Nuevamente los rodamientos fueron los más vulnerables; una vez dañados estos elementos, el desgaste alcanzó al eje de la propela.
	P3	Al igual que los medidores anteriores, los rodamientos que soportan al eje de la propela son los elementos más afectados, ya que los sedimentos logran penetrar a la cámara donde se alojan y se mezclan con el lubricante, formando una masa que provoca fricción y desgaste.
	P4	El sedimento en el agua ocasionó que el medidor sufriera desgaste de los rodamientos en el casquillo de la punta de la propela y en el soporte de la misma, así como separación y desgaste total del imán de transmisión.
Turbina	T1	Los álabes de la turbina se desgastaron debido al contacto que se produjo entre ésta y el soporte; también se atascaron y destruyeron los engranes de la transmisión. Ambos problemas se generaron a partir del desgaste en los rodamientos por la acumulación de sedimento en los mismos.
	T2	Los álabes de la turbina entraron en contacto con el soporte y se desgastaron notablemente hasta bloquearse por completo. Ello se generó a partir del enorme desgaste que sufrieron los dos rodamientos en los que se apoya el giro de la turbina.
Paletas	L1	El medidor presentó una falla muy peculiar: el imán de la transmisión está en contacto directo con el agua y obviamente con el sedimento, ello ocasionó que el imán atrajera las partículas ferrosas del sedimento, lo que provocó el bloqueo total de los engranes de la transmisión; las paletas continuaron girando hasta que dichos engranes se destruyeron completamente.

hasta bloquearse completamente. Finalmente, el medidor de paletas falló a partir de la acumulación de las partículas ferrosas del sedimento en el imán de la transmisión.

Conclusiones y recomendaciones

Como se sospechó, las partes que se deterioran no son las turbinas ni las propelas, al menos no son la primera causa del mal funcionamiento de los medidores. También se confirmó que las partículas del sedimento que afectan a los medidores no son las de mayor tamaño. Las partes que fallan inicialmente son los rodamientos debido a la acumulación de sedimento en los intersticios de las partes móviles. En otro caso, la falla se debió a la acumulación de material ferroso por atracción magnética en el imán de transmisión.

Las turbinas se dañaron por la excentricidad en el giro, provocada por el desgaste de

los rodamientos, no por el impacto directo del sedimento en los álabes. Asimismo, es notorio que los medidores de turbina sean más susceptibles al fallo, probablemente por tener el apoyo de su giro en dos rodamientos, mientras que los medidores de propela solamente tienen un rodamiento.

Los fabricantes han reforzado los materiales y recubrimientos de las propelas y turbinas, y algunos así lo mencionan en sus catálogos publicitarios; sin embargo, tal reforzamiento parece inadecuado, ya que los experimentos demostraron que las partes más susceptibles son los rodamientos, por lo que en estos componentes es donde se requieren acciones de revisión y modificaciones para disminuir el deterioro. De hecho, al momento de la redacción del presente artículo, el fabricante de los medidores de propela P1 y P2, que siempre se mantuvo cerca del desarrollo de las pruebas, realiza pruebas en varios de sus medidores a

los que hizo diferentes modificaciones en los rodamientos para mejorar su desempeño.

Finalmente, se insiste en el enfoque del estudio: las pruebas se llevaron a cabo con el claro objeto de indagar sobre la manera en que afecta el sedimento a los medidores, cuáles son las partes que se desgastan o se rompen. Con el tipo de pruebas realizadas no se puede determinar el tiempo en que los medidores fallarán; se recomienda efectuar otra serie de pruebas con los detalles necesarios y suficientes para que se tenga alguna idea sobre el tiempo en que lo harán.

Recibido: 06/10/09
Aprobado: 14/09/10

Referencias

- ÁLVAREZ, R.A. y PEDROZA, G. E. *Efecto de la presencia de arena en el flujo de agua, sobre un medidor con partes móviles*. XVIII Congreso Nacional de Hidráulica, Asociación Mexicana de Hidráulica, San Luis Potosí, México, 2004.
- BOTELLO, A. *Diseño, construcción y puesta en operación de un banco experimental para la evaluación de macromedidores en condiciones de flujo con sedimentos*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México, 2006.
- PEDROZA, E., ARROYO CORREA, M., OCHOA, L., RUIZ, J.A. y SANTANA, J.S. *Propuesta tecnológica para mejorar la medición en pozos agrícolas*. Informe técnico. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 2001, 62 pp.
- SECRETARÍA DE FOMENTO Y COMERCIO INDUSTRIAL. NOM-012-SCFI-1994. *Medición de flujo de agua en conductos cerrados de sistemas hidráulicos-Medidores para agua potable fría-Especificaciones*. México, D.F.: Secretaría de Fomento y Comercio Industrial, 1997.

Abstract

BONOLA-ALONSO, I., PEDROZA-GONZÁLEZ, E., BOTELLO-HERNÁNDEZ, A. & CASTRO-SALAZAR, A. *The behavior of meters in water flow with sediment: experimental design and testing*. Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. II, No. 2, April-June, 2011, pp. 97-110.

In Mexico, an important amount of water used for irrigation is extracted from deep wells. Frequently, the measurement of this water is made by meters whose movable components are in direct contact with the flow. If the water contains sediments, the meters present operation failures; however, which parts fail or how is largely unknown. It is frequently thought that the movable parts, such as propellers or turbines, are worn down by the friction of solid particles, but this has not been proven yet. In order to have a better understanding of these failures, a test installation was designed and built with several meters placed under flow with sediment conditions. This paper presents the characteristics of the test installation, the different construction stages, and test details and results. One important conclusion is that the parts of the meters which were being damaged the most were not the movable components, but the supports and bearings.

Keywords: flow meters, sediment flow, test installation, experimental schedule, sediments concentration, measurement.

Dirección institucional de los autores

M.I. Isaac Bonola-Alonso
M.I. Edmundo Pedroza-González

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO
Teléfono + (52) (777) 329 3600
ibonola@tlaloc.imta.mx
epedroza@tlaloc.imta.mx

Ing. Alfredo Botello-Hernández

Tesista de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos
Calle 3, casa 3, Villas de Xochitepec
62790 Xochitepec, Morelos, MÉXICO
Teléfono + (52) (777) 361 2961
albotellohernandez@hotmail.com

Ing. Alberto Castro-Salazar

Laboratorista, Constructora e Impulsora Tollocan
Calle Sauce 3, Colonia San Francisco Texcalpan
62570 Jiutepec, Morelos, MÉXICO
Teléfono + (52) (777) 319 1242
acaastro67@yahoo.com.mx