

CAPÍTULO VII – 11. CONTROL DE LOS FILTROS RÁPIDOS

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MÉTODOS DE CONTROL DE LOS FILTROS	4
2.1. CONSIDERACIONES INICIALES	4
2.2. CONSIDERACIONES SOBRE LOS MÉTODOS DE CONTROL.....	7
2.2.1. <i>Carga Hidráulica Disponible Constante y Resistencia Total del Filtro Constante “CHDC - RTFC”</i>	7
2.2.2. <i>Carga Hidráulica Disponible Variable y Resistencia Total del Filtro Variable – “CHDV – RTFV”</i>	12
2.2.2.1. Filtración con Velocidad Constante	12
2.2.2.2. Filtración con Velocidad Declinante	16
2.2.3. <i>Carga Hidráulica Disponible Constante y Resistencia Total del Filtro Variable – “CHDC y RTFV”</i>	62
2.2.4. <i>Carga Hidráulica Disponible Variable y Resistencia Total del Filtro Constante – “CHDV” y RTFC</i>	63
3. PROYECTO DE UN SISTEMA DE FILTRACIÓN CON VELOCIDAD DECLINANTE CON VOLUMEN DE AGUA ALMACENADO SOBRE LOS FILTROS.....	64
3.1. VELOCIDAD MEDIA DE FILTRACIÓN.....	64
3.2. PÉRDIDA DE CARGA EN EL FONDO DE LOS FILTROS	64
3.3. PÉRDIDA DE CARGA EN LA COMPUERTA DE ENTRADA A LOS FILTROS	65
3.4. PÉRDIDA DE CARGA EN LA SALIDA DE LOS FILTROS	66
3.5. PÉRDIDA DE CARGA EN EL VERTEDERO DE SALIDA (CÁMARA INDIVIDUAL)	66
3.6. PÉRDIDA DE CARGA EN EL MEDIO FILTRANTE LIMPIO Y CAPA SOPORTE.....	66
3.7. ECUACIÓN GENERAL DE LA PÉRDIDA DE CARGA DURANTE LA FILTRACIÓN	67
4. EJEMPLOS	68

5. BIBLIOGRAFIA.....83

LISTA DE ILUSTRACIONES

TABLAS

Tabla 1. Velocidades de filtración, pérdidas de carga, coeficientes de resistividad y ecuaciones básicas del modelo de Di Bernardo (1985, 1986).....	35
Tabla 2. Nivel N_{3c} y velocidades de filtración en los filtros restantes al final del lavado de uno de ellos (Di Bernardo, 1986)	37
Tabla 3. Velocidades de filtración, pérdidas de carga, coeficientes de resistividad y ecuaciones del modelo de Machado y Di Bernardo (1996) – filtro F_1	40
Tabla 4. Ecuaciones para determinar el nivel N_3 y de las velocidades de filtración en los filtros restantes durante el lavado de un filtro de la batería (Machado y Di Bernardo, 1996)	43
Tabla 5. Resumen de los resultados de operación en la instalación piloto (Machado y Di Bernardo, 1996).....	48
Tabla 6. Características del Medio Filtrante	69
Tabla 7. Características de la Capa Soporte	69
Tabla 8. Determinación de $\sum X_i / D_i^2$	70
Tabla 9. Determinación de $\sum X_i / D_i^2$	70
Tabla 10. Determinación de $\sum X_i / D_i^2$	70
Tabla 11. Resultados durante la filtración.....	71
Tabla 12. Resultados durante el lavado de un filtro.....	72
Tabla 13. Características del Medio Filtrante	80
Tabla 14. Características de la Capa Soporte	81

FIGURAS

Figura 1. Interconexión de dos cámaras por una cañería de escurrimiento por gravedad de R_A a R_B ..1	1
Figura 2. Interconexión entre dos reservorios por cuatro cañerías del mismo diámetro – escurrimiento por gravedad de R_A a R_B2	2
Figura 3. Variación de la resistencia total del filtro y pérdida de carga en el dispositivo de control – método de carga hidráulica disponible constante por resistencia total del filtro constante.....8	8
Figura 4. Esquema de dispositivo de control de caudal y nivel utilizado en los filtros de velocidad constante – Método de carga hidráulica disponible constante y resistencia total del filtro constante9	9
Figura 5. Esquema de sifón parcializador y de control de nivel – Método de carga hidráulica disponible constante y resistencia total del filtro constante.....9	9
Figura 6. Esquema de un filtro con velocidad constante con control de nivel y de caudal – método de carga hidráulica disponible constante y resistencia total del filtro constante10	10
Figura 7. Diagrama de presión en un filtro con velocidad y nivel constantes.....11	11
Figura 8. Disposición típica de entrada y salida de filtros con velocidad constante y nivel de agua variable.....13	13
Figura 9. Resultados de simulaciones de lavados en filtro con velocidad y nivel constantes y en filtro con velocidad constante y nivel variable (Di Bernardo y Freire, 1984)15	15
Figura 10. Disposición típica de filtros con velocidad declinante variable18	18
Figura 11. Esquema ilustrativo del descenso del nivel de agua que se produce inmediatamente después que un filtro recién lavado es puesto en operación20	20
Figura 12. Variación de la velocidad de filtración y de la pérdida de carga en un filtro de una batería con velocidad declinante variable, según Cleasby (1969, 1972)20	20
Figura 13. Resultados de la operación en la planta piloto de filtración con velocidad declinante (Di Bernardo y Cleasby, 1980)21	21
Figura 14. Variación del nivel de agua en el canal común de alimentación a filtros y velocidades de filtración observadas en la planta de tratamiento de agua (Di Bernardo, 1989)22	22
Figura 15. Variación del nivel de agua y de las velocidades de filtración durante el lavado de un filtro y luego de haber sido puesto en funcionamiento (Di Bernardo y Cleasby, 1980)22	22
Figura 16. Variación de la pérdida de carga y de la turbiedad de los efluentes de instalaciones piloto con velocidad (SFUD) y con velocidad constante (FUC) para una velocidad media de filtración igual a 293 m/d (Di Bernardo y Cleasby, 1980).....23	23
Figura 17. Turbiedad del afluente y de los efluentes de instalaciones piloto con velocidad declinante y con velocidad constante para una velocidad media de filtración igual a 293 m/d – filtración directa en línea (Hilmoe y Cleasby, 1986).....24	24
Figura 18. Estudio teórico para determinar la cota del umbral del vertedero de salida de los filtros de sistemas de filtración con velocidad declinante (Di Bernardo y Souza, 1991).....26	26
Figura 19. Curvas de presión en el manto filtrante durante la carrera de filtración del filtro F_2 de una batería de 4 filtros de velocidad declinante con el umbral del vertedero de salida ubicado a la misma cota de la superficie del manto filtrante (Di Bernardo y Souza, 1991).....27	27
Figura 20. Curvas de presión en el medio filtrante durante la carrera de filtración del filtro F_2 de una batería de 4 filtros de velocidad declinante con el umbral del vertedero de salida situado 0,65 m debajo de la cota de la superficie del manto filtrante (Di Bernardo y Souza, 1991).....28	28
Figura 21. Configuración típica de la variación del nivel de agua en el canal común de alimentación de los filtros y velocidades de filtración en un sistema de filtración con velocidad declinante, incluyendo el inicio de la operación (Di Bernardo, 1985, 1986)32	32
Figura 22. Variación del nivel de agua en el canal común de alimentación de los filtros en función de la velocidad de filtración y de las pérdidas de carga turbulenta y laminar (Di Bernardo, 1985, 1986)33	33
Figura 23. Pérdida de carga y niveles de operación en función de la velocidad de filtración – sistema de filtración con velocidad declinante y capacidad adicional de almacenamiento de agua aguas arriba de los filtros (Machado y Di Bernardo, 1996)41	41
Figura 24. Esquema de la instalación piloto de filtración con velocidad declinante variable con almacenamiento adicional de agua aguas arriba de los filtros (Machado y Di Bernardo, 1996)47	47

Figura 25. Variación del nivel de agua, velocidades de filtración y turbiedad del afluente y de los efluentes global y del filtro F_3 ($N = 4$; $U_{med} = 300$ m/d; $H_d = 1,25$ m; sin capacidad adicional de almacenamiento aguas arriba de los filtros) (Machado y Di Bernardo, 1996)	49
Figura 26. Variación del nivel de agua, velocidades de filtración y turbiedad del afluente y de los efluentes global y del filtro F_3 ($N = 4$; $U_{med} = 300$ m/d; $H_d = 1,25$ m; capacidad adicional de almacenamiento aguas arriba de los filtros = 4 A) (Machado y Di Bernardo, 1996)	50
Figura 27. Variación del nivel de agua, velocidades de filtración y turbiedad del afluente y de los efluentes global y del filtro F_3 ($N = 4$; $U_{med} = 300$ m/d; $H_d = 1,25$ m; capacidad adicional de almacenamiento de agua aguas arriba de los filtros = 12 A) (Machado y Di Bernardo, 1996)	51
Figura 28. Variación del nivel de agua, velocidades de filtración y turbiedad del afluente y de los efluentes global y del filtro F_3 ($N = 4$; $U_{med} = 300$ m/d; $H_d = 1,25$ m; capacidad adicional de almacenamiento aguas arriba de los filtros = 20 A) (Machado y Di Bernardo, 1996)	52
Figura 29. Variación del nivel de agua, velocidades de filtración y turbiedad del afluente y de los efluentes global y del filtro F_3 para $N = 4$; $U_{med} = 300$ m/d; $H_d = 1,25$ m; capacidad adicional de almacenamiento aguas arriba de los filtros = 28 A (Machado y Di Bernardo, 1996).....	53
Figura 30. Variación de los niveles de agua y de las velocidades de filtración en una instalación de filtración con velocidad declinante variable sin y con almacenamiento adicional aguas arriba de los filtros (28A) para $N=4$; $H_d=1,25$ m; $U_{med}=300$ m/d (Machado y Di Bernardo, 1996)	54
Figura 31. Variación típica de la pérdida de carga en un filtro de velocidad constante – metodología para prever la duración de la carrera de filtración (Di Bernardo y Teixeira, 1991)	56
Figura 32. Comportamiento del sistema de filtración con velocidad declinante y del filtro con velocidad constante operados simultáneamente - velocidad de filtración de filtro con velocidad constante = velocidad media del sistema de filtración con velocidad declinante = 300 m/d; $H_d = 1,6$ m (Teixeira, 1991).....	58
Figura 33. Comportamiento del sistema de filtración con velocidad declinante y del filtro con velocidad constante operados simultáneamente - velocidad de filtración de filtro con velocidad constante = velocidad máxima en el sistema de filtración con velocidad declinante = 407 m/d ; $H_d = 1,6$ m (Teixeira, 1991)	59
Figura 34. determinación de la duración de la carrera de filtración conforme metodología propuesta - U_{med} en el filtro con velocidad declinante variable = 300 m/d; $H_d = 1,6$ m (Teixeira, 1991).....	59
Figura 35. Niveles de agua en el canal común de alimentación de los filtros y velocidades de filtración – baterías con 4 y 6 filtros	60
Figura 36. Niveles de agua en el canal común de alimentación de los filtros y velocidades de filtración – aumento o disminución de la velocidad media de filtración	61
Figura 37. Niveles de agua en el canal común de alimentación de los filtros y velocidades de filtración – aumento o disminución de la pérdida de carga turbulenta	61
Figura 38. Variación de la velocidad de filtración con el tiempo de funcionamiento - Método de control carga hidráulica disponible constante y resistencia total del filtro variable	62
Figura 39. Esquema de un filtro operando con carga hidráulica disponible constante y resistencia total a la filtración variable – Velocidad de filtración declinante.....	63
Figura 40. Representación de los Niveles en el Canal Común de Alimentación de los Filtros en Función de la Velocidad de Filtración	75
Figura 41. Planta del filtro a nivel de los bloques que conforman el falso fondo y de la proyección de las canaletas de lavado	77
Figura 42. Corte A-A.....	78
Figura 43. Esquema del filtro de la Planta de Tratamiento	79

1. INTRODUCCIÓN

Para facilitar la comprensión del funcionamiento de los filtros rápidos, especialmente cuando la filtración se realiza con velocidad declinante variable, se desarrolló un método de simple comprensión, que se detalla a continuación.

Sean dos cámaras, R_A e R_B , distantes L_{AB} entre sí, debiéndose conducir un caudal constante Q_{AB} de R_A hacia R_B , siendo H_d el desnivel geométrico entre los niveles de agua en ambas cámaras y manteniendo constante el caudal de alimentación a la cámara R_A y los niveles de agua en R_A y R_B , (ver **Figura 1**).

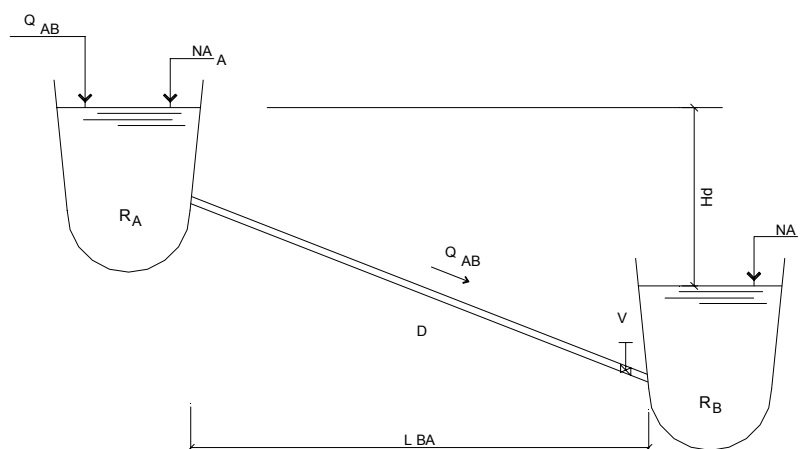


Figura 1. Interconexión de dos cámaras por una cañería de escurrimiento por gravedad de R_A a R_B

Una vez definido el material de la tubería que interconectará R_A y R_B , se determina el diámetro de ésta para conducir el caudal deseado, Q_{AB} , utilizando fórmulas consagradas como la de Hazen-Williams o la Universal, dado que se conoce la carga hidráulica disponible (igual al desnivel geométrico, H_d). En razón de la producción de caños comerciales con diámetros específicos, difícilmente existirá coincidencia del diámetro calculado con el caño comercial disponible y debe adoptarse un diámetro superior al calculado. En estas condiciones la capacidad de conducción el caño comercial utilizado resulta, para la carga hidráulica disponible H_d , superior al caudal deseado. Se debe introducir entonces una pérdida de carga adicional por medio de una válvula V , próxima al reservorio R_B , para que el nivel de agua permanezca constante en R_A .

Con el funcionamiento durante varios años la cañería pierde capacidad de conducción el agua por el aumento del coeficiente de fricción debido al aumento de la rugosidad de su pared interna, lo que hace necesario abrir la válvula V para que el caudal Q_{AB} se mantenga constante. Ese procedimiento se puede adoptar hasta que la válvula V esté completamente abierta, pues de allí en adelante, con el aumento del coeficiente de fricción el caudal disminuirá, desbordando en R_A , ya que la alimentación del mismo es constante y la carga hidráulica disponible H_d , permanece prácticamente inalterada. Sólo

con una limpieza de la cañería mediante una rehabilitación, es posible restablecer la condición inicial.

Guardando las debidas proporciones ese comportamiento puede asemejarse al de los filtros con velocidad y nivel de agua constantes, que poseen dispositivos de control como se verá posteriormente. Por otro lado si no se efectúa la “limpieza” del tubo, una vez abierta totalmente la válvula V , el caudal conducido de R_A a R_B disminuirá con el tiempo, resultando un comportamiento similar al observado en la filtración con velocidad declinante continua.

En la **Figura 2** se muestra otro esquema en el cual existen 4 cañerías con el mismo diámetro, longitud, y material interconectando las cámaras R_A y R_B , instaladas sin embargo en épocas diferentes y presentando coeficientes de fricción diferentes (diferentes grados de envejecimiento). Como la carga hidráulica disponible es la misma, pues las 4 cañerías se encuentran a presión, conducen caudales distintos que sumados deben proveer el caudal total, Q_{AB} .

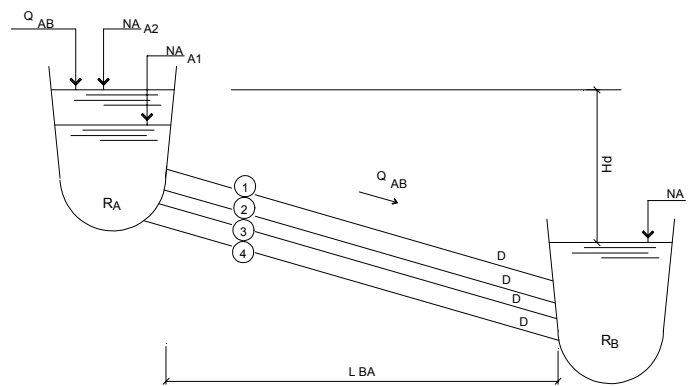


Figura 2. Interconexión entre dos reservorios por cuatro cañerías del mismo diámetro – escurrimiento por gravedad de R_A a R_B

Considérese la situación en determinada época en donde NA_{A1} es el nivel del agua en reservorio R_A , una cañería es nueva (o recién rehabilitada) y las restantes tienen diferentes tiempos de uso (por ejemplo, la segunda con un año, la tercera con dos años y la cuarta, con tres años). Las cañerías continúan con sus coeficientes de fricción aumentando con el paso del tiempo, haciendo que el nivel de agua en el reservorio R_A suba para compensar la pérdida de carga adicional en las cañerías.

Cuando se alcance el nivel de agua NA_{A2} , la cañería que presenta mayor coeficiente de fricción, se deberá limpiar mediante rehabilitación, pues en caso contrario se producirá desborde en el reservorio R_A , ya que el caudal de alimentación es constante. Durante la limpieza de esa cañería se producirá un pequeño aumento del nivel de agua en R_A y luego de su limpieza, la resistencia global al escurrimiento de R_A a R_B disminuirá y el nivel de agua en R_A descenderá hasta un instante en que la suma de los caudales en los caños iguale el caudal de alimentación Q_{AB} .

Como los caños tienen el mismo diámetro, el más rugoso (más tiempo de uso) conducirá el menor caudal y el recién “limpio”, el mayor caudal, pues todos se encuentran a presión y sometidos a la misma carga hidráulica. De esa forma, la carga hidráulica disponible variará desde un valor mínimo cuando una cañería sea nueva o esté rehabilitada y se alcance el nivel de agua NA_{A1} , hasta un valor máximo cuando se alcance el nivel de agua NA_{A2} . Con el paso del tiempo el nivel de agua aumentará en R_A , de forma que el aumento de pérdida de carga resulte igual en las cuatro cañerías hasta el momento en que el nivel de agua NA_{A2} se alcance nuevamente, ocasión en que la cañería más rugosa dentro de las cuatro se rehabilitará y así sucesivamente.

Por otro lado, si los cuatro caños funcionaran simultáneamente y “limpios”, el caudal de escurrimiento en cada uno de ellos sería igual a $Q_{AB}/4$.

A medida que transcurre el tiempo de operación, los cuatro caños presentarían el mismo incremento del coeficiente de fricción original y por ende igual pérdida de carga, cuya sumatoria produciría un incremento paulatino del nivel líquido en el reservorio R_A hasta colmar su capacidad.

Esa situación significaría detener la operación del sistema hasta su rehabilitación. Ese problema operatorio se solucionaría proyectando caños con distintos coeficientes de fricción, lo que produciría la rehabilitación de cada uno de ellos sin detener la operación de los restantes, ya que no se llegaría a colmar la capacidad del reservorio puesto que no se alcanzaría el nivel máximo en un mismo momento.

Otra posibilidad sería que el caudal Q_{AB} se divida equitativamente por medio de vertederos idénticos y con descarga libre a cajas individuales, de las que parten las cañerías independientes. En esas condiciones, si las cuatro cañerías limpias inician el funcionamiento en forma simultánea, con el paso del tiempo presentarían el mismo coeficiente de fricción y el nivel de agua aumentará en las cámaras individuales hasta que todas las cañerías se “limpien”, lo que implicaría la paralización de la aducción de agua de R_A a R_B hasta que la operación de limpieza termine y se reinicie la aducción. Esto también traería complicaciones operacionales al sistema, razón por la cual las cañerías tampoco en este caso deberían presentar idénticas condiciones con respecto al coeficiente de fricción.

Con las necesarias salvedades pueden compararse los comportamientos descritos con los que se producen en los filtros operados con nivel de agua variable (carga hidráulica disponible variable) y velocidad de filtración variable o constante. En la alternativa donde las cañerías de entrada se encuentran a presión y con diferentes coeficientes de fricción, los filtros funcionarían con distinta velocidad de filtración, caracterizando el método conocido como filtración con velocidad declinante variable.

En la otra alternativa donde se tienen vertederos iguales y descarga libre a cajas individuales desde la cual arrancan las cañerías independientes, los filtros funcionarían con velocidad de filtración constante (pues la división de caudal se produce en la entrada) y el nivel de agua variable en el interior de cada cámara (carga hidráulica disponible variable), caracterizando el método conocido como distribución equitativa de caudales. Una variación puede ser tener una válvula en cada cañería, en la llegada de R_B , de forma que el nivel de agua en cada cámara individual permanezca constante, lo cual exigiría ajustes de esa válvula con el paso del tiempo para que no se produzca ahogo del vertedero. De forma semejante, los filtros funcionarían con velocidad de filtración constante y nivel constante.

2. MÉTODOS DE CONTROL DE LOS FILTROS

2.1. CONSIDERACIONES INICIALES

Hay dos velocidades de interés en la filtración:

- 1). Velocidad de aproximación, U_f , igual al caudal afluyente dividido por el área (en planta) del filtro, también denominada velocidad de filtración.
- 2). Velocidad intersticial media, U_{im} , igual a U_f dividida por la porosidad media del medio filtrante.

Durante la filtración las impurezas son retenidas en los espacios intergranulares de cada capa del lecho filtrante, reduciendo el volumen de vacíos y la porosidad local, con el consecuente aumento de la velocidad intersticial y la pérdida de carga en la región del medio filtrante. Durante la filtración el régimen de escurrimiento es laminar y de acuerdo con la ley de Darcy, se tiene:

$$\frac{H_{mf}}{L_{mf}} = K_r U_f \quad (1)$$

donde:

H_{mf} : pérdida de carga (m)

L_{mf} : espesor del medio filtrante (m)

K_r : coeficiente de resistividad (s/m)

U_f : velocidad de filtración (m/s)

El coeficiente de resistividad está relacionado a la resistencia al escurrimiento del agua a través del medio filtrante. Al iniciarse la filtración, cuando el manto filtrante está limpio, se calcula la pérdida de carga H_{mf0} utilizándose la ecuación de Ergun, presentada en el Capítulo 8 y que se comenta a continuación.

El primer término de la ecuación de Ergun (ecuación 2 ó 3) corresponde a la ecuación de Fair-Hatch, aplicable a valores de U_f inferiores a 400 m/d, o sea, cuando el régimen de escurrimiento es laminar.

Para valores mayores de U_f , el escurrimiento deja de ser laminar, resultando de transición o turbulento, en donde la pérdida de carga varía con el cuadrado de la velocidad U_f . En la filtración generalmente se obtienen resultados satisfactorios aplicando la ecuación de Fair-Hatch, (ecuación 2 ó 3), sin el segundo término, siempre que sea respetado el valor máximo de U_f indicado ($400 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$).

$$\frac{H_{mfo}}{L_{mf}} = \frac{150 \mu (1 - \varepsilon_o)^2 U_f}{g \rho_a \varepsilon_o^3 C_e^2} \sum_{i=1} \frac{X_i}{D_{ei}^2} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_o) U_f^2}{C_e \varepsilon_o^3 g} \sum_{i=1} \frac{X_i}{D_{ei}} = \quad (2)$$

= expresión general para lechos filtrantes divididos en subcapas con distintos tamaños equivalentes D_{ei}

ó

$$\frac{H_{mfo}}{L_{mf}} = \frac{150 \mu (1 - \varepsilon_o)^2 U_f}{g \rho_a \varepsilon_o^3 C_e^2} \left(\frac{S_{esp}}{6} \right)^2 + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_o) U_f^2}{C_e \varepsilon_o^3 g} \left(\frac{S_{esp}}{6} \right) = \quad (3)$$

= expresión general para lechos uniformes (con bajo coeficiente de uniformidad C_u)

donde:

H_{mfo} = pérdida de carga en el medio filtrante limpio (m)

L_{mf} = espesor del medio filtrante (m)

μ = viscosidad absoluta del agua (N s /m²)

ρ_a = masa específica del agua a temperatura T° C (Kg/m³)

ε_o = porosidad del medio filtrante limpio

U_f = velocidad o velocidad de filtración (m/s)

g = aceleración de la gravedad (m/s²)

C_e = coeficiente de esfericidad

S_{esp} = superficie específica (m²/m³)

X_i = fracción del material filtrante (en peso) entre dos tamices consecutivos de la serie granulométrica.

D_e = tamaño equivalente de los granos entre dos tamices consecutivos de la serie granulométrica (m); en general igual a la media geométrica de los tamaños de las aberturas de los tamices considerados.

La superficie específica para granos esféricos es igual a $(6/D_e)$ e igual a $6 / (D_e C_e)$ para medios filtrantes constituidos de granos no esféricos, comúnmente encontrados en la práctica.

Si se consideran las velocidades de filtración inferiores a 400 m/d, la ecuación 2 puede ser escrita de la siguiente forma, ya que el valor del segundo término puede ser despreciado en comparación al primero, que es función lineal de la velocidad de filtración U_f :

$$H_{mfo} = K_{ro} U_f \quad (4)$$

siendo:

$$K_{ro} = \frac{150 \mu (1 - \varepsilon_o)^2 L_{mf}}{g \rho_a \varepsilon_0^3 C_e^2} \sum_{i=1} \frac{X_i}{D_{ei}^2} \quad (5)$$

Conociéndose las características del manto filtrante y adoptándose las demás características de los filtros (compuerta de entrada, sistema de drenaje, cañerías y accesorios de salida, etc.), se calcula la pérdida de carga total inicial. El coeficiente de resistividad aumenta con el tiempo, pues se produce la retención de impurezas; la pérdida de carga es laminar en el medio filtrante limpio, lo mismo sucede con la retención de impurezas, si la filtración se realizara con acción de profundidad. La pérdida de carga en el manto soporte (de grava) se calcula utilizando la ecuación 2, desestimando el segundo término, haciendo $X_i = 1$ para cada subcapa.

Sea H_T pérdida de carga total en cualquier momento durante la filtración, la que será igual a la suma de las pérdidas iniciales en: capa soporte (H_s) y medio filtrante limpio (H_{mfo}), cañerías, accesorios, sistema de drenaje, etc. (H_{tu}) y retención de impurezas (H_r).

La suma de las pérdidas de carga en el medio filtrante limpio, capa soporte y retención de impurezas ($H_s + H_{mfo} + H_r$) se denomina pérdida de carga laminar e igual a H_l . La pérdida de carga H_{tu} se denomina pérdida de carga turbulenta.

Todas estas pérdidas se relacionan a la velocidad de filtración U_f y en cualquier momento la resistencia total a la filtración H_T , debe ser igual a la carga hidráulica disponible o máxima de diseño adoptada para tener la velocidad de filtración deseada.

En consecuencia se tiene la siguiente expresión:

$$\text{Velocidad Filtración Proporcional a} \left(\frac{\text{Carga Hidráulica Disponible}}{\text{Resistencia Total del Filtro}} \right)$$

Existen cuatro condiciones básicas para describir el funcionamiento de los filtros:

- Carga hidráulica disponible constante y resistencia total del filtro constante.
- Carga hidráulica disponible variable y resistencia total del filtro variable.
- Carga hidráulica disponible constante y resistencia total del filtro variable.
- Carga hidráulica disponible variable y resistencia total del filtro constante.

Las primeras dos formas de operar son las más usadas y son desarrolladas a continuación con mayor detalle.

2.2. CONSIDERACIONES SOBRE LOS MÉTODOS DE CONTROL

2.2.1. Carga Hidráulica Disponible Constante y Resistencia Total del Filtro Constante “CHDC - RTFC”

El nivel de agua varía poco con este método de control, pudiéndose considerar que la carga hidráulica disponible sea constante. Manteniéndose constante la resistencia total del filtro se tiene en consecuencia, un valor constante de la velocidad de filtración.

En el comienzo de la carrera de filtración, el manto filtrante se encuentra limpio y para que la resistencia total del filtro no se altere se necesita un dispositivo de control que introduzca una pérdida de carga adicional (H_{co}), igual a la diferencia entre la carga hidráulica disponible (H_d) y la suma de las pérdidas de carga iniciales (H_{To}), que se producen en la capa soporte (H_s), en el manto filtrante limpio (H_{mfo}) y en las cañerías, accesorios, sistemas de drenaje, etc. (H_{tu}).

O sea

$$H_{co} = H_d - H_{To} = H_d - (H_s + H_{mfo} + H_{tu})$$

A medida que adelanta la filtración, se produce una pérdida de carga adicional, debida a la retención de impurezas (H_f), que aumenta con el tiempo causando incremento de la resistencia total a la filtración, que pasa de H_{To} a H_T , debiéndose disminuir el valor de H_{co} (pérdida de carga introducida por el controlador) a un valor:

$$H_{co} = H_d - H_T = H_d - (H_s + H_{mfo} + H_f + H_{tu})$$

Cuando el dispositivo de control presente el menor valor posible en relación con la velocidad de filtración fijada, el filtro deberá ser lavado, pues desde ese momento, cualquier aumento de pérdida de carga en el manto filtrante no será compensado por el controlador (ver **Figura 3**).

Si el caudal total afluente a la planta fuese constante, el nivel de agua prefijado en el canal común de alimentación a los filtros y en éstos, permanecerá prácticamente inalterado durante la carrera de un filtro de la batería debido a la acción del controlador y aumentará durante el retiro de un filtro para lavado, si no hubiera un dispositivo adicional para control del nivel de agua en el interior de los filtros. Esto sucede porque los filtros restantes en operación, filtran el caudal del filtro que haya sido retirado de operación para el lavado. Los aumentos de nivel de agua observados en los filtros restantes en operación son proporcionales al número de filtros de la batería y al tiempo requerido para lavados. En cuanto al aumento de la velocidad de filtración en los filtros restantes depende fundamentalmente del número de filtros de la batería.

Si la suma de los caudales efluentes de los filtros no fuese exactamente igual al caudal afluente a la batería de filtración, el nivel del agua en algunas unidades subirá y en otras bajará, cuando la instalación cuente sólo con dispositivo de control de caudal. En este caso, si el operador intentara efectuar manualmente los ajustes necesarios para que el nivel de agua resulte igual en todos los filtros, podría perjudicar seriamente la calidad del agua filtrada, pues tales ajustes son realizados generalmente en forma brusca y no paulatina acompañando al incremento de la pérdida de carga.

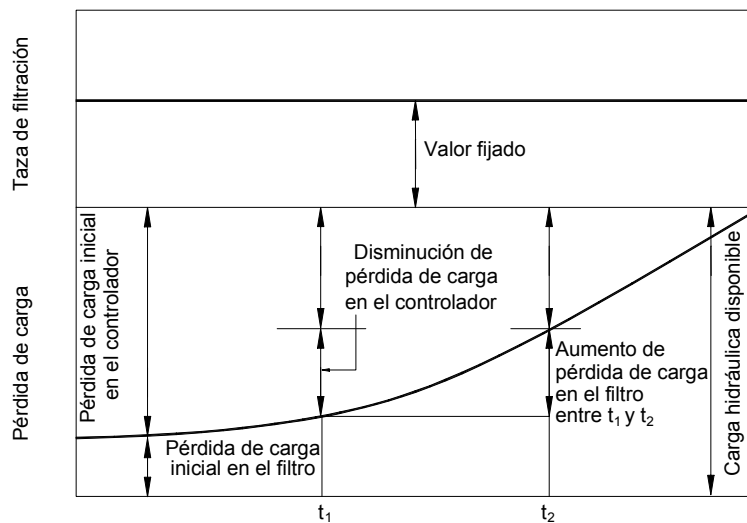


Figura 3. Variación de la resistencia total del filtro y pérdida de carga en el dispositivo de control – método de carga hidráulica disponible constante por resistencia total del filtro constante

Una alternativa que se puede considerar en algunos casos, es la división del caudal total afluente a la planta de tratamiento por medio de vertederos con descarga libre en la entrada a los filtros. El valor de la carga hidráulica disponible H_d se mantiene constante por medio de un flotante ubicado en el interior de cada uno de los filtros que comanda una válvula tipo mariposa ubicada en la cañería de salida del agua filtrada. De esta forma, cuando un filtro se retira de operación para ser lavado y/o siempre que exista una variación en el caudal afluente, el flotante hace que la pérdida de carga introducida por la válvula mariposa varíe para compensar la alteración producida (variación de niveles).

Generalmente los controladores de caudal y nivel empleados en la práctica permiten una variación del nivel de agua relativamente pequeña en el interior de los filtros, de modo que cuando un filtro de la batería se retira de operación para su lavado, el nivel de agua en los filtros restantes en operación subirá haciendo que el controlador de nivel accione el equipo de control, permitiendo que un caudal mayor se filtre. Existe la posibilidad de que esas variaciones sean bruscas y causen daño a la calidad del agua filtrada.

Los controladores de caudal instalados en la cañería de salida del agua filtrada funcionan según el principio de causa-efecto. O sea, no se realiza ninguna corrección a menos que se produzca la variación del parámetro controlado.

Básicamente, los controladores disponen de un medidor de caudal, transmisor, válvula de control y contrapeso para fijar la abertura inicial de la válvula de control. La conexión entre estos elementos puede ser mecánica, neumática, eléctrica, hidráulica o resultante de la combinación de dos o más medios de conexión.

El medidor de caudal puede ser Venturi, boquilla u orificio. Como el caudal en esos medidores es proporcional a la diferencia de presión en dos puntos específicos, la transmisión de la diferencia de presión a la válvula de control permite que el caudal se corrija siempre que el valor medido sea diferente al preestablecido, obtenido con el peso

ubicado en una posición definida en el brazo de la válvula de diafragma, la cual acciona la válvula de control. Además de estos integrantes, los equipos de control de caudal y nivel poseen dispositivos de control de nivel que también pueden accionar la válvula de control.

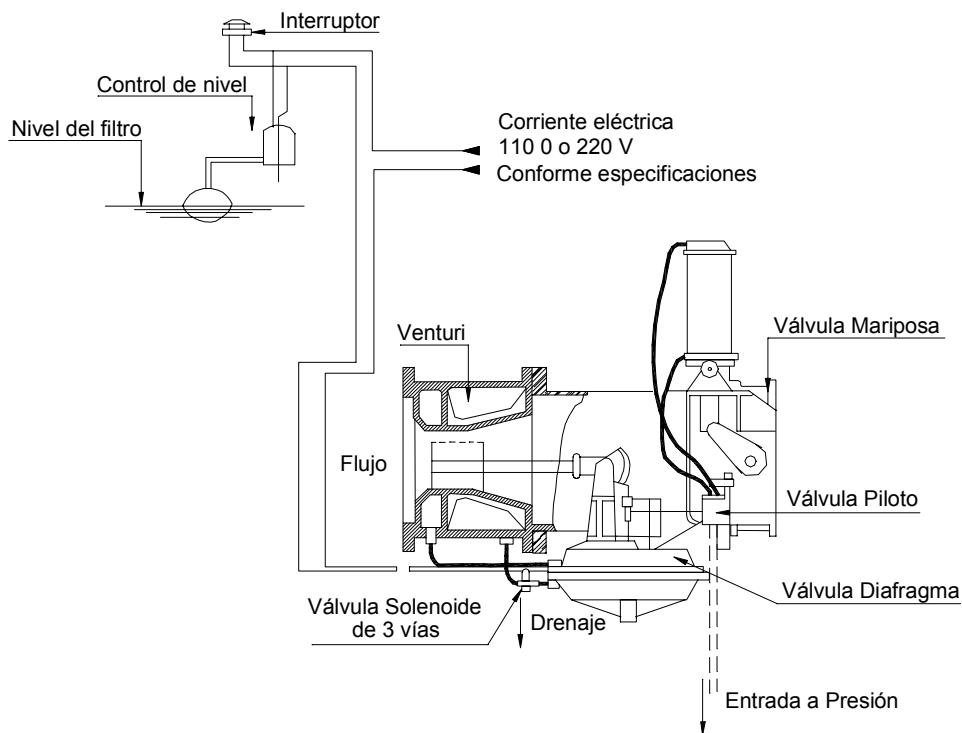


Figura 4. Esquema de dispositivo de control de caudal y nivel utilizado en los filtros de velocidad constante – Método de carga hidráulica disponible constante y resistencia total del filtro constante

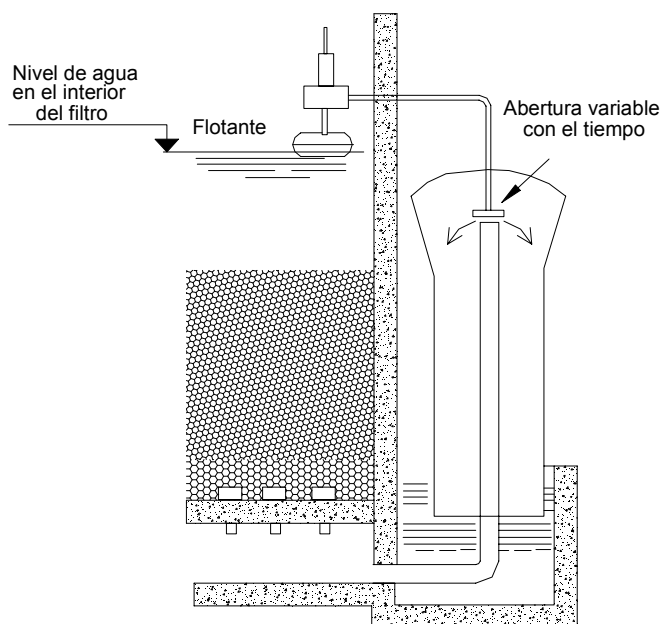


Figura 5. Esquema de sifón parcializador y de control de nivel – Método de carga hidráulica disponible constante y resistencia total del filtro constante

En la **Figura 4** se muestra el esquema de un tipo de equipo de control de nivel y de caudal, en tanto en la **Figura 5** se muestra el esquema de un filtro que posee sifón parcializador. Si el caudal afluente a la planta de tratamiento es constante y los filtros iguales, el control del caudal se efectúa por un flotante ubicado en el interior del filtro que permitirá la entrada de aire en el sifón, compatible con el nivel de agua prefijado en las unidades filtrantes.

La entrada de agua a los filtros con velocidad constante, con controles colocados a la salida se realiza, generalmente, por medio de una compuerta o una cañería provista de válvula, de modo que la velocidad de pasaje no supere 1,5 m/s. La salida se realiza por medio de una cañería dimensionada para el caudal de agua de lavado, de la cual se tiene una derivación, de menor diámetro, en la que se encuentra el equipo de control. De esa cañería se puede tener otra derivación destinada al drenaje del filtro, en ocasión del mantenimiento o de la disminución del nivel de agua en el interior del filtro si el lavado se realiza con aplicación de aire seguido de introducción de agua en sentido ascendente. En la **Figura 6** se muestra el esquema de un filtro de velocidad constante, que posee un dispositivo de control de caudal y nivel.

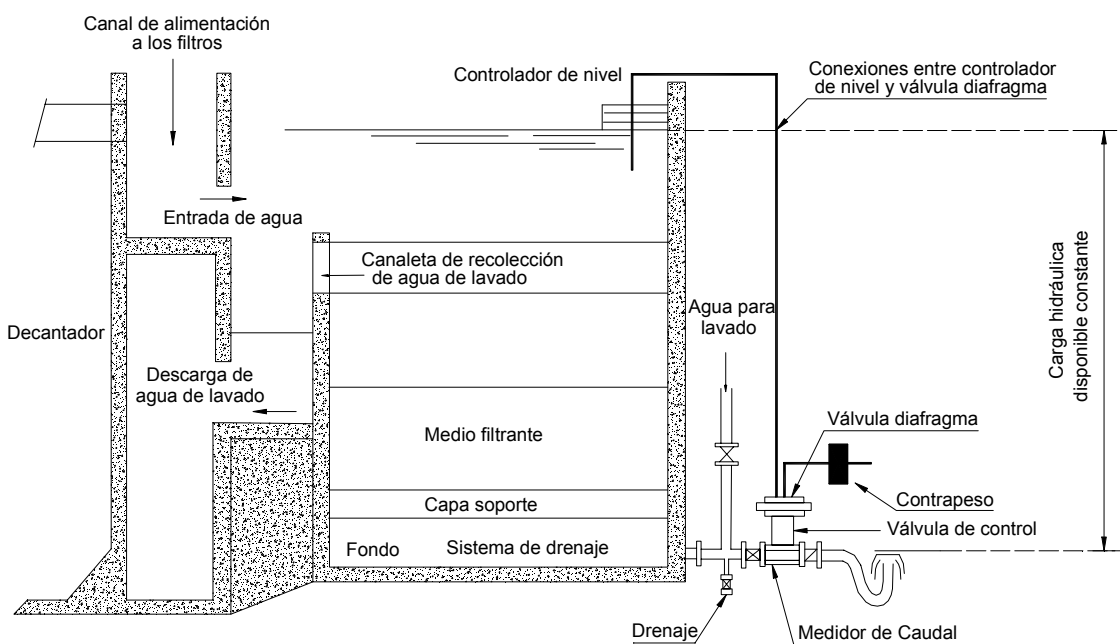


Figura 6. Esquema de un filtro con velocidad constante con control de nivel y de caudal – método de carga hidráulica disponible constante y resistencia total del filtro constante

El agua de lavado de los filtros se descarga a través de una compuerta o de una tubería que posee una válvula, hacia un canal que la conduce al sistema de recuperación o de drenaje general de la planta. El comando de las válvulas, compuertas, etc., se realiza a partir de mesas especiales con accionamiento hidráulico, neumático o electromecánico. Existen casos, generalmente de plantas de pequeña capacidad, en donde el accionamiento es manual.

El gran problema que se observa en los filtros con controladores es la posibilidad de que existan presiones absolutas inferiores a la atmosférica (presión relativa negativa) en el interior del manto filtrante a partir de un cierto tiempo de funcionamiento, pues la salida del agua filtrada se encuentra muy por debajo de la parte superior del manto filtrante.

En la **Figura 7** se muestra un esquema de un filtro con el diagrama de presión siendo constantes el nivel de agua en el interior del filtro y el caudal de agua filtrada.

El diagrama de presión se obtiene con el uso de piezómetros dispuestos a lo largo del manto filtrante. Con el filtro parado, la presión en la base del manto filtrante es igual a la presión estática γH , donde H es la altura del agua hasta esa profundidad y γ es el peso específico del agua. Por lo tanto, la carga hidráulica disponible en esa profundidad es H . Se representa por una recta a 45° a partir del nivel de agua hasta que encuentre la recta horizontal, que debe coincidir con el límite inferior del manto filtrante.

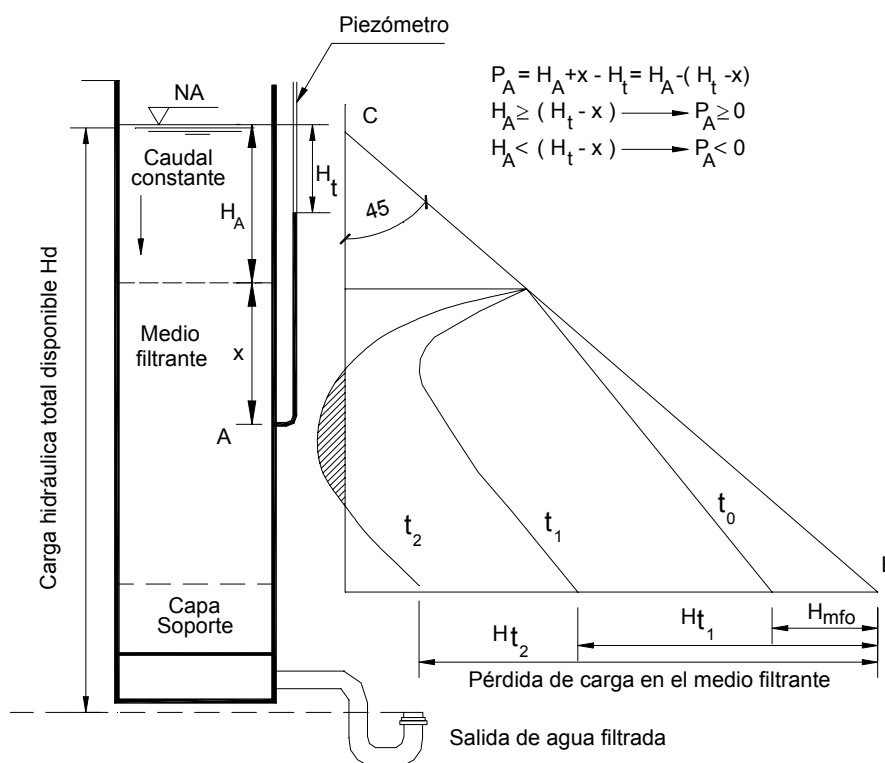


Figura 7. Diagrama de presión en un filtro con velocidad y nivel constantes

En el inicio de la carrera de filtración con U_f constante, resulta la pérdida de carga inicial, H_{mfo} , indicada en el diagrama a partir del punto B, obteniéndose la recta que representa la pérdida de carga a lo largo del manto filtrante limpio. Con el paso del tiempo de funcionamiento, se produce retención de impurezas y aumento de la pérdida de carga en el manto filtrante, obteniéndose las curvas de pérdida de carga a lo largo del manto filtrante correspondientes a los tiempos considerados.

Se considera un piezómetro colocado en el punto A, a una distancia x debajo de la superficie del medio filtrante y H_A a la altura del sobrenadante (altura líquida sobre dicho manto). En un tiempo t cualquiera, la diferencia entre el nivel de agua en el interior del manto filtrante y la observada en el piezómetro corresponderá a la pérdida de carga hasta el punto considerado.

La presión relativa, P_A en un instante t cualquiera, será igual a la altura de agua H_A sumada a la altura x , restada la pérdida de carga H_t . Para $H_A \geq (H_t - x)$ resulta $P_A \geq 0$, mientras que para $H_A < (H_t - x)$ resulta $P_A < 0$.

En la **Figura 7** se muestra que la presión relativa será negativa (área rayada) siempre que la pérdida de carga en el medio filtrante en un punto considerado resulte mayor que la carga hidráulica disponible (en este caso, $H_A + x$).

Considerando la pérdida de carga total en el medio filtrante H_{t2} , se nota que la presión en la base del manto filtrante resulta positiva. Sin embargo en alguna región se producirá presión relativa negativa. Este resultado se observa en los filtros de arena de plantas convencionales que funcionan un tiempo más prolongado que el recomendado.

El funcionamiento de un filtro con presión negativa podrá comprometer su funcionamiento porque liberará el aire disuelto del agua, con formación de burbujas que permanecerán retenidas en los vacíos intragranulares, aumentando la pérdida de carga debida a la disminución de la sección útil para el escurrimiento (disminuyendo la duración de la carrera de filtración), o ser liberadas y escurrir hacia la atmósfera. En el último caso, aparecerán caminos preferenciales en el manto filtrante, a través de los cuales el agua percolará sin que se produzca retención de impurezas. De cualquier forma los filtros no deben en ningún caso, funcionar con presión relativa negativa en cualquier profundidad del manto filtrante.

2.2.2. Carga Hidráulica Disponible Variable y Resistencia Total del Filtro Variable – “CHDV – RTFV”

Dependiendo de las características de entrada y salida de los filtros, la velocidad de filtración podrá permanecer constante o variable (declinante) cuando la carga hidráulica disponible y la resistencia total a la filtración fueren ambas variables.

2.2.2.1. Filtración con Velocidad Constante

Cuando la entrada a los filtros de la batería se realiza de modo que el caudal afluente sea distribuido igualmente entre los filtros, por intermedio de vertederos con descarga libre, el nivel líquido debe ser distinto en cada filtro de la batería para poder efectuar el lavado en forma secuencial, ya que de lo contrario habría que detenerla para limpiar las unidades que se colmatan al mismo tiempo. De este modo, el nivel de agua en cada filtro será diferente y variará independientemente de los demás, resultando constante la velocidad de filtración, pues el aumento de la pérdida de carga debida a la retención de impurezas será acompañada por el aumento del nivel de agua en el interior de los filtros, o sea de la carga hidráulica disponible.

El nivel de agua en un filtro variará desde un valor mínimo, cuando el manto filtrante está limpio hasta un valor máximo cuando está sucio, sin ahogar el vertedero de entrada, momento en que el filtro deberá ser retirado de operación para ser lavado. En el inicio de

la carrera de filtración el medio filtrante se encuentra limpio y para evitar que el nivel mínimo de agua en el interior del filtro se sitúe por debajo de la superficie filtrante, se debe prever una válvula en la cañería o una cámara de salida con vertedero cuyo umbral debe tener cota mayor o igual a la de esa superficie filtrante. El método de filtración en este caso es conocido como de distribución equitativa de caudales.

Como las entradas se realizan por medio de vertederos iguales con descarga libre, los filtros recibirán el mismo caudal, de forma tal que el caudal de salida sea prácticamente igual al caudal de entrada, pues el volumen de agua almacenado en el interior del filtro debido al aumento de nivel desde el mínimo hasta el máximo es relativamente pequeño cuando se lo compara con el volumen de agua producido en ese intervalo de tiempo. En la **Figura 8** se muestra un esquema típico de la disposición de la entrada y salida de los filtros que funcionan con velocidad de filtración constante, según el método “carga hidráulica disponible variable y resistencia total del filtro variable”.

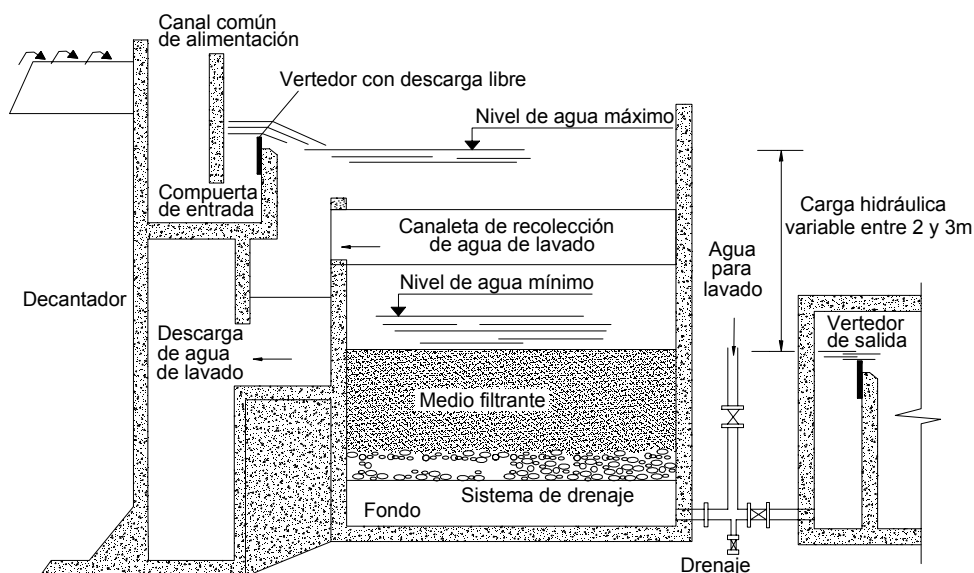


Figura 8. Disposición típica de entrada y salida de filtros con velocidad constante y nivel de agua variable

De acuerdo con Cleasby (1969, 1971), la filtración con velocidad constante según el método de distribución equitativa de caudales, presenta las siguientes ventajas en relación a la de velocidad constante con controlador de caudal y nivel:

- 1). Siendo constante el caudal afluente a la planta de tratamiento, la velocidad de filtración se mantiene inalterada sin el uso de equipo de control.
- 2). El caudal es distribuido igualmente a los filtros de la batería por medio de un dispositivo simple como es el vertedero.
- 3). Cuando un filtro es retirado de operación para ser lavado, el caudal correspondiente al mismo se distribuye igualmente a los filtros restantes en operación, de modo que el nivel de agua aumenta gradualmente en cada uno de

ellos hasta producir la carga hidráulica suficiente para filtrar el nuevo caudal (así, el aumento de caudal o de la velocidad de filtración es gradual, no existiendo perjuicio en la calidad del agua filtrada).

- 4). Luego del inicio de la operación de un filtro recién lavado, la disminución de la velocidad de filtración también es gradual en los filtros que se encuentran en operación.
- 5). La pérdida de carga en un filtro de la batería se puede observar visualmente y la verificación del nivel máximo permitido para que se efectúe el lavado depende solamente del operador.
- 6). La ubicación del coronamiento del vertedero de salida en cota ligeramente por encima de la parte superior del manto filtrante elimina la posibilidad de que se produzca presión absoluta inferior a la atmosférica en el interior del manto filtrante.
- 7). El caudal de cada filtro se puede medir fácilmente en el vertedero de entrada.

Las principales desventajas según Cleasby (1969), son:

- 1). Altura elevada de la caja de los filtros.
- 2). Rotura de flóculos que no sedimentaron debido al salto que se produce en los vertederos a la entrada de los filtros, lo que siempre, según Cleasby, traería un perjuicio potencial para la calidad del agua filtrada (adelante se comenta esta afirmación).

Sin duda, la altura de la caja de este filtro resulta mayor que aquélla con controlador de caudal y nivel, pues además de efectuarse la entrada a través de vertedero con descarga libre, hay que considerar la colocación de la cresta del vertedero de salida en cota próxima a la del coronamiento del manto filtrante. Sin embargo, el costo adicional proveniente del aumento de la altura del filtro resulta inferior al de adquisición del equipo de control y de su mantenimiento.

En relación al salto de agua en la entrada, se debe resaltar que la recolección de agua decantada por medio de canaletas, como generalmente se realiza en la práctica, ya implica un salto del agua con rotura de los flóculos que no sedimentaron, a pesar de que este salto no es tan elevado como en el caso de los filtros que se analizan a continuación.

Di Bernardo y Freire (1984) estudiaron en una instalación piloto el posible deterioro en la calidad del agua filtrada producido por el salto del agua a la entrada de los filtros. Además del filtro con nivel de agua variable en su interior, la instalación piloto contaba con otro filtro operado en paralelo al primero, lo cual simulaba el funcionamiento de un filtro con control de caudal y de nivel (este filtro funcionaba bajo presión y poseía cámara de salida con nivel constante, provista de flotante y con descarga libre).

De esta forma se tuvieron los filtros denominados “velocidad constante y nivel variable” y “velocidad y nivel constantes”, los que se estudiaron con velocidades de filtración comprendidas entre 200 y 500 m/d. Ambos poseían manto filtrante constituido de antracita y arena (el material filtrante se colocó aleatoriamente en las dos unidades y posteriormente para cinco velocidades de filtración utilizando agua tratada, los filtros funcionaron en serie para verificar las pérdidas de carga resultantes en los mantos filtrantes, luego de haber verificado esa condición, se iniciaron los ensayos con agua decantada).

En base al trabajo realizado, Di Bernardo y Freire (1984) concluyeron que la duración de la carrera de filtración en el filtro de velocidad constante y nivel variable, era por lo menos igual a la que se obtenía en el filtro de velocidad y nivel constante y algunas veces, resultaba cerca del 10 al 30% más prolongada, pues era más profunda la penetración de impurezas provenientes probablemente de la misma rotura de flóculos. Los autores también verificaron que la calidad del agua filtrada era prácticamente igual en los dos filtros. Adicionalmente los autores efectuaron simulaciones de lavados en los dos filtros, suponiendo la existencia de baterías con 4 ó 6 filtros de los dos tipos.

Por ejemplo, para una batería hipotética de 6 filtros y velocidad de filtración igual a 300 m/d, sacar un filtro de funcionamiento para lavado traería un aumento del 20% en la velocidad de filtración en los filtros restantes, o sea, la velocidad de filtración aumentaría a 360 m/d.

Para simular lo que se produce en los filtros con control de caudal y nivel encontrados en la práctica, la válvula de salida de la cámara de nivel constante se abría en una posición previamente establecida en un tiempo inferior a 10 s.

El filtro de velocidad constante y nivel variable poseía un rotámetro en la cañería de entrada y válvula para ajuste del caudal deseado.

Las simulaciones, en el caso de la batería hipotética de 6 filtros se efectuaron en base a la curva de incremento de la pérdida de carga de cada filtro, obtenidas en los ensayos con la velocidad de 300 m/d sin simulaciones, pues la calidad del agua decantada afluente a la instalación piloto, permaneció prácticamente inalterada durante la investigación experimental.

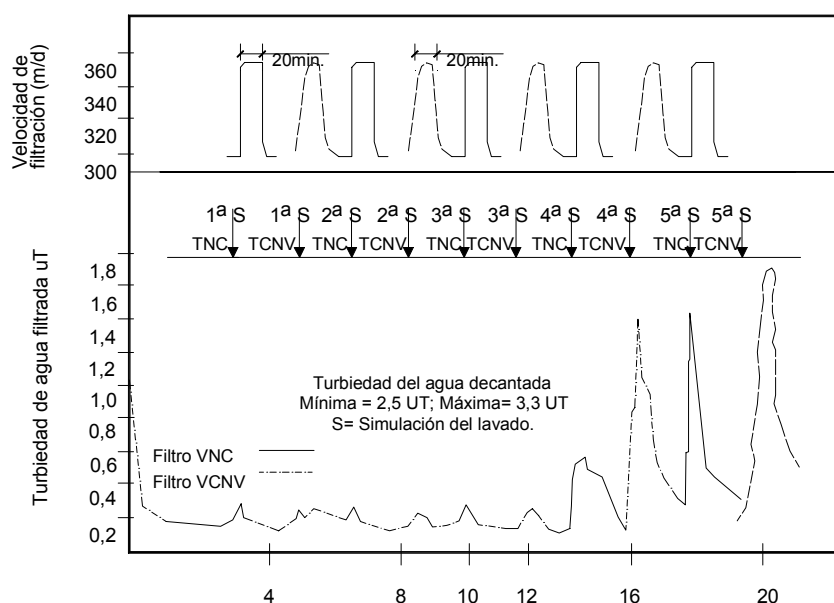


Figura 9. Resultados de simulaciones de lavados en filtro con velocidad y nivel constantes y en filtro con velocidad constante y nivel variable (Di Bernardo y Freire, 1984)

De la carga hidráulica total disponible igual a 2,4 m, se restaba la pérdida de carga inicial (medio filtrante limpio, capa soporte, sistema de drenaje, cañerías, accesorios, etc.), resultando la carga hidráulica disponible para retención de impurezas, la cual se dividía por 6, obteniéndose los incrementos de pérdida de carga entre simulaciones sucesivas en las dos unidades.

En una simulación los filtros permanecían fuera de operación durante 20 minutos. (Figura 9).

En esa figura se observa que contrariamente a lo afirmado por Cleasby (1969), en las simulaciones se producían picos de turbiedad en el agua filtrada de los dos filtros a pesar de haberse alcanzado más rápidamente la velocidad de filtración correspondiente al lavado de un filtro en el filtro de velocidad y nivel constante (VNC) que en el filtro de velocidad constante y nivel variable (VCNV).

Otro resultado interesante en los dos filtros, fue que cuanto más sucios se hallaban los filtros, más significativos fueron los picos de turbiedad al producirse las simulaciones de lavado, lo que era de esperar conforme había sido constatado por Cleasby y otros (1963). Por lo tanto, no corresponde una de las restricciones a la filtración con velocidad constante y nivel de agua variable, siendo recomendado tal método de control siempre que la capacidad de la planta fuese pequeña y el número de filtros menor que 4 (Di Bernardo y Freire, 1984).

2.2.2.2. Filtración con Velocidad Declinante

Consideraciones generales

Los trabajos pioneros respecto de la operación de filtros rápidos por gravedad, sin el uso de equipos de control de caudal y de nivel en la cañería de salida, con el fin de reducir o eliminar el efecto negativo de las variaciones de presión en el manto filtrante, para la calidad del agua filtrada fueron realizados por Hudson (1959), Baylis (1959) y Tuepker (1965).

Esos trabajos proporcionaron antecedentes para que Cleasby (1969, 1972) efectuase adaptaciones en los filtros de algunas plantas de tratamiento en China y en los Estados Unidos retirando los equipos de control existentes y permitiendo que funcionasen como vasos comunicantes. Aunque ese autor destacó el uso de un dispositivo limitador de caudal en la cañería de salida de los filtros, poco tiempo después Arboleda (1974) se refirió a la existencia de algunas plantas de tratamiento de agua en América del Sur, en donde tal dispositivo se había eliminado.

En los trabajos experimentales de Di Bernardo y Cleasby (1980) y Hilmoe y Cleasby (1986), se observó que tanto para el agua decantada como para el agua coagulada como afluente a la batería de filtros, la filtración con velocidad declinante resultaba superior a la filtración con velocidad constante, pues además de que la calidad del agua filtrada era mejor o como mínimo igual, la carga hidráulica necesaria en la velocidad declinante era menor para que la duración de la carrera de filtración resultase igual en los dos tipos de operación.

Cleasby y Di Bernardo (1980) discutieron en detalle las características hidráulicas del sistema de filtración con velocidad declinante y mostraron cualitativamente la influencia del número de filtros, de la variación del caudal afluente a la planta y de la carga

hidráulica disponible, en la duración de la carrera de filtración. Además propusieron un método para estimar la variación del nivel de agua entre lavados sucesivos en base a la carga hidráulica necesaria en un filtro de velocidad constante con la misma velocidad media del sistema con velocidad declinante variable, de tal forma que la duración de las carreras de filtración fuesen iguales.

Posteriormente, Cleasby (1989) demostró que tal método no era válido, pues para velocidad mínima de filtración del sistema con velocidad declinante, en el momento en que el filtro sucio se retiraba de operación para lavado, la pérdida de carga debida a la retención de impurezas debería ser equivalente a la correspondiente al filtro con velocidad constante, lo que no se producía con el método propuesto por Cleasby y Di Bernardo (1980). Como se indica más adelante existe una forma racional para calcular las variaciones de nivel y las velocidades de filtración.

En la década del 80 Di Bernardo (1985, 1986) y Arboleda y otros (1985) propusieron algunos criterios de proyecto de sistemas de filtración con velocidad declinante, más consistentes que aquel basado en el índice de aumento de turbiedad sugerido por Hudson (1959).

A partir del comienzo de la década del 90, Di Bernardo y Souza (1991), Di Bernardo y Texeira (1991), y Di Bernardo y Machado (1996), realizaron investigaciones para estudiar la ubicación del umbral del vertedero de salida, la duración de la carrera de filtración y la influencia de la capacidad de almacenamiento aguas arriba de los filtros en la variación de los niveles de agua y en las velocidades de filtración. Trabajando en planta piloto sobre diferentes condiciones de operación, Machado (1995) obtuvo resultados que sirvieron de base para complementar la modelación matemática anteriormente propuesta por Di Bernardo (1985, 1986), teniendo en cuenta el almacenamiento aguas arriba de los filtros.

Funcionamiento de los filtros con velocidad declinante

Como se ha indicado algunas modificaciones introducidas por Cleasby (1969, 1972) en el filtro de velocidad constante y nivel variable, que se muestran en el esquema de la **Figura 10**, dieron origen al sistema de filtración que puede ser denominado de “velocidad declinante” o en forma más descriptiva de “velocidad declinante variable”, ya que la velocidad en cada filtro disminuye por tramos durante la carrera y es afectada por el lavado de los otros filtros de la misma batería, como se indica más adelante.

Las modificaciones realizadas por Cleasby se refieren especialmente a la compuerta de entrada, la cual debe ser ahogada de modo que los filtros funcionen como vasos comunicantes. La alimentación de los filtros se realiza por medio de una cañería o canal con dimensiones relativamente grandes para no restringir el escurrimiento, pues el caudal en un tramo cualquiera se modifica en función del número de filtros y de la secuencia de lavado.

Es preferible la conducción del agua por medio de un canal en lugar de cañería, pues permite observar el nivel de agua. Además al ser relativamente baja la pérdida de carga en el canal, todos los filtros son sometidos a la misma carga hidráulica disponible. La entrada a cada filtro se realiza por medio de una compuerta o cañería provista de válvula, por debajo del nivel de agua en el interior de los filtros.

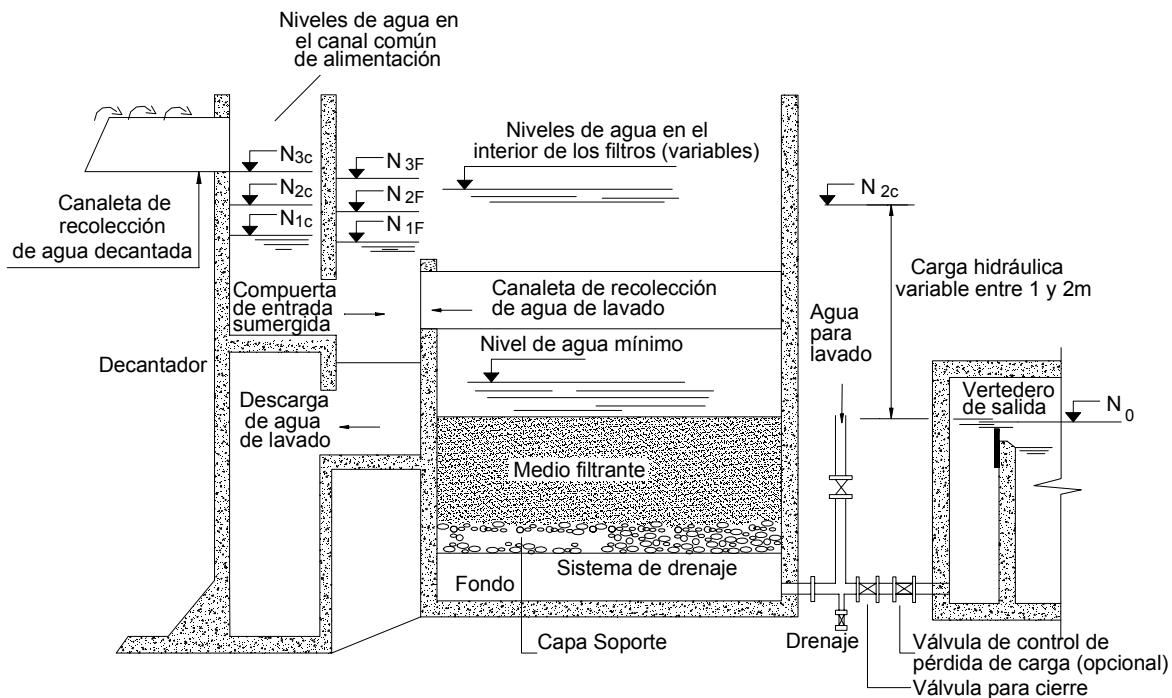


Figura 10. Disposición típica de filtros con velocidad declinante variable

Considerando una batería de filtros iguales según la disposición típica indicada en la **Figura 10**, se adoptan las siguientes definiciones:

- Nivel N_0 : nivel del coronamiento del vertedero general de salida (o de los vertederos individuales).
- Nivel N_{1c} : nivel mínimo del agua en el canal común de alimentación de los filtros, el cual se produce luego que el filtro recién lavado ha sido colocado en operación y la suma de los caudales de salida igualan el caudal afluente a la planta. El filtro más limpio de la batería recién lavado, funcionará con la velocidad máxima de filtración.
- Nivel N_{2c} : nivel del agua en el canal común de alimentación de los filtros, cuando el filtro más sucio de la batería debe retirarse de operación para ser lavado. Este filtro se encuentra funcionando con la velocidad mínima de filtración.
- Nivel N_{3c} : nivel de agua en el canal común de alimentación de los filtros al final del lavado de un filtro de la batería, inmediatamente antes de que el filtro recién lavado sea puesto en funcionamiento.
- Niveles N_{1F} , N_{2F} y N_{3F} : dependiendo de la pérdida de carga en la compuerta de entrada de los filtros, los niveles de agua en el interior de los mismos podrán resultar muy diferentes; la diferencia $N_{1c} - N_{1F}$ representa la pérdida de carga en el filtro "j" de la batería. Se debe prestar especial atención al filtro recién lavado, pues en éste se tiene la mayor diferencia $N_{1c} + N_{1F}$ por la mayor pérdida de carga en la compuerta de entrada debido a que el filtro está operando con la velocidad de filtración máxima y el nivel de agua en el filtro no puede situarse por debajo del coronamiento de las canaletas de recolección del agua de lavado.
- $N_{2c} - N_0$: carga hidráulica disponible para la filtración.

- $N_{2c} - N_{1c}$: aumento del nivel del agua en el canal común de alimentación a los filtros, entre lavados sucesivos.
- $N_{3c} - N_{2c}$: aumento del nivel en el canal común de alimentación a filtros entre el inicio y el final del lavado de un filtro de la batería.
- Situación repetitiva: es la condición para la cual la velocidad de filtración en cualquier filtro de la batería permanece aproximadamente constante entre lavados sucesivos y decrece en forma gradual, luego de que un filtro recién lavado sea puesto en funcionamiento y la suma de los caudales de salida igualen el caudal afluente a la planta.

Generalmente, la carga hidráulica disponible para la filtración H_d , es fijada por el proyectista de tal forma que la velocidad máxima no supere 1,5 veces la velocidad media; en esas condiciones el filtro más sucio de la batería se retira de operación cuando se alcance el nivel N_{2c} .

Durante el lavado de un filtro, operación realizada con agua derivada desde el tanque elevado o del bombeo directo, el nivel líquido en el canal común de alimentación a la batería de filtros sube hasta alcanzar el nivel N_{3c} (máximo). Este nivel se produce para que la suma de los caudales de salida de las restantes unidades que siguen operando iguale al caudal afluente a la batería, siempre que no haya almacenamiento en el sistema anterior a los filtros, como se indica más adelante.

Cuando el agua para el lavado de un filtro proviene del caudal filtrado por las restantes unidades de la batería en operación, la disminución del tirante líquido sobre el umbral del vertedero general de descarga del agua filtrada de la batería, puede superar el aumento que habría entre los niveles líquidos N_{2c} y N_{3c} en el referido canal de alimentación. Como consecuencia el incremento del nivel líquido N_{2c} a N_{3c} puede no producirse y en algunos casos, llega a disminuir el nivel N_{2c} en el canal común de alimentación de la batería de filtros.

El tiempo necesario para que se tenga la igualdad de los caudales de entrada y salida durante el lavado de un filtro cualquiera de la batería, generalmente es inferior a 30 minutos cuando no se tiene almacenamiento antes del filtro.

En cambio cuando hay almacenamiento, especialmente en los canales que vinculan al canal común de alimentación a la batería con el proceso de floculación en el sistema de filtración directa descendente (con ese proceso las variaciones de niveles líquidos en las unidades de la batería, se transfieren a esos canales situados aguas arriba de la misma). Como consecuencia para estimar el nivel líquido N_{3c} hay que considerar cuando se produce la igualdad de caudales de ingreso y salida de la batería.

Cuando el filtro recién lavado se pone en funcionamiento, se produce una disminución rápida del nivel de agua en el canal de alimentación a los filtros debido a la transferencia de agua de los filtros restantes y del canal común de alimentación a los filtros, pues el nivel de agua en el filtro recién lavado se sitúa próximo al del coronamiento de las canaletas de recolección de agua de lavado. El descenso del nivel es proporcional al número de filtros, al área del canal común de alimentación a los filtros y a las unidades de floculación (en el caso de sistemas de filtración directa descendente).

Por ejemplo, se considera la filtración de agua decantada proveniente de decantadores con descarga libre en el canal común de alimentación de la batería compuesta por 6 filtros. Cada filtro tiene un área total A (incluye el canal interior de descarga de las

canaletas colectoras del agua de lavado) y ese canal común un área igual a $2A$. La altura entre el nivel líquido durante el lavado de una unidad N_{3c} en el canal común de la batería y el correspondiente al coronamiento de las canaletas colectoras N_L , es $N_{3c} - N_L = 2,00$ m. Finalmente el descenso rápido del nivel líquido en el canal común de alimentación a la batería, es $X = 0,25$ m, según se indica en la **Figura 11**. En realidad ese valor de x resulta ligeramente diferente del calculado, pues se asume que todos los filtros poseen el mismo nivel líquido e igual al del canal común de alimentación a la batería.

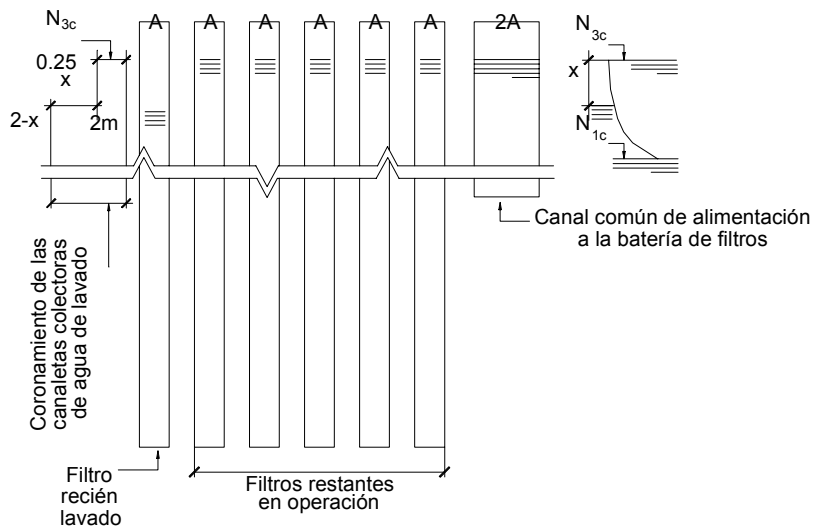


Figura 11. Esquema ilustrativo del descenso del nivel de agua que se produce inmediatamente después que un filtro recién lavado es puesto en operación

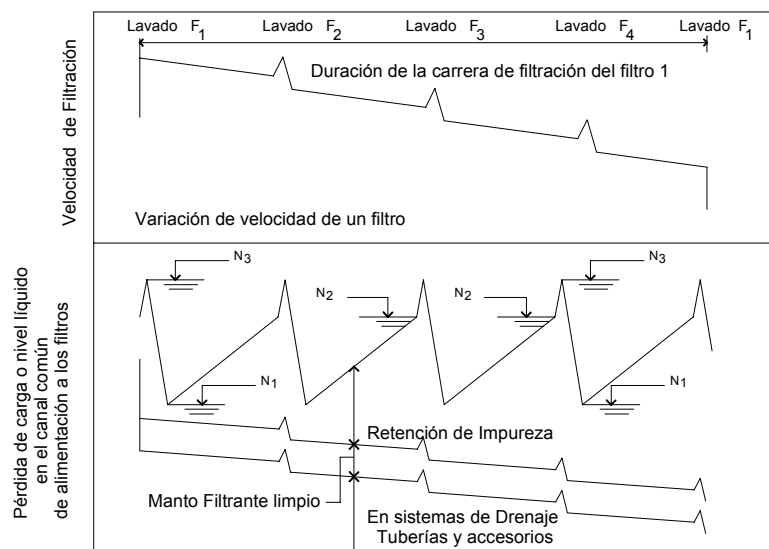


Figura 12. Variación de la velocidad de filtración y de la pérdida de carga en un filtro de una batería con velocidad declinante variable, según Cleasby (1969, 1972)

Luego de esa disminución rápida del nivel líquido, la suma de los caudales todavía resulta mayor que el caudal afluente a la batería y por lo tanto el nivel líquido continúa disminuyendo hasta que es alcanzado el nivel N_{1c} . A partir de ese momento comienza nuevamente a subir hasta alcanzar el nivel N_{2c} , ocasión para que otro filtro deba ser lavado.

Durante la década del 70, luego que Cleasby (1969, 1972) divulgó ese método de operación, surgieron algunas dudas, pues estableció que la velocidad de filtración en todos los filtros disminuía con el tiempo según se ilustra en la **Figura 12** para el filtro recién lavado.

En ese filtro recién lavado, se tiene la variación de la velocidad de filtración durante la carrera de filtración de una batería compuesta de cuatro unidades, la variación del nivel líquido en el canal común de alimentación, la pérdida de carga turbulenta y las pérdidas de carga laminar y la debida a retención de impurezas en el medio filtrante. Esa disminución gradual de la velocidad de filtración entre lavados sucesivos no fue observada posteriormente por Di Bernardo y Cleasby (1980) en la instalación piloto operada con diferentes velocidades medias de filtración ni tampoco en plantas de tratamiento en escala real (ver **Figura 13** y **Figura 14**).

Los resultados del funcionamiento de la planta piloto (**Figura 13**) y del prototipo (**Figura 14**) corresponden a baterías de 4 filtros con velocidad de filtración prácticamente iguales ($7 \text{ gpm/min pe}^2 = 293 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ en la piloto y $300 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ en el prototipo). Se ve que la variación del nivel de agua es semejante a la mostrada en la **Figura 12**, por lo tanto, las velocidades de filtración permanecen prácticamente constantes entre sucesivos lavados, salvo en el período transcurrido luego que el filtro recién lavado entre en operación y se alcance el nivel de agua N_{1c} .

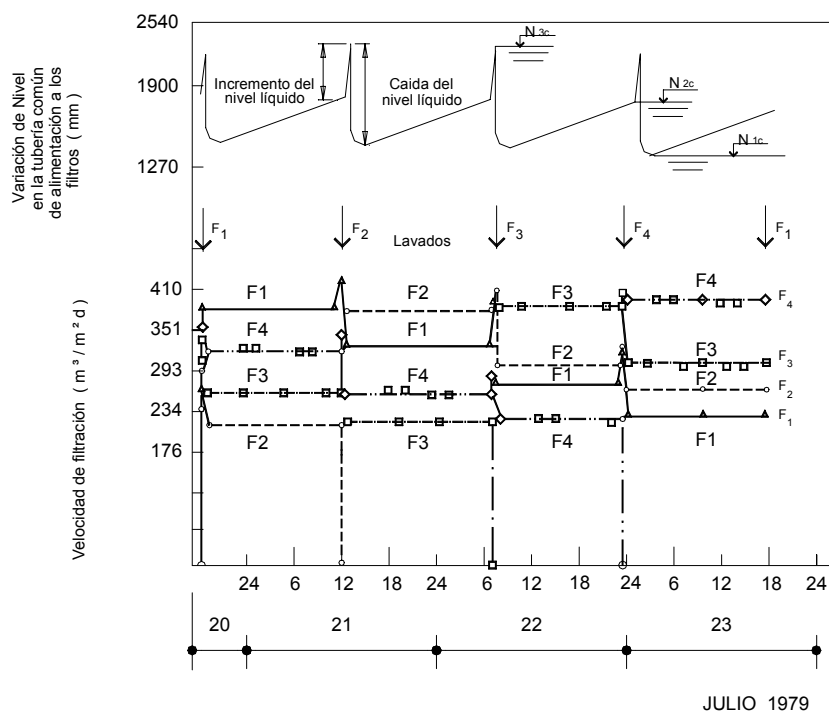


Figura 13. Resultados de la operación en la planta piloto de filtración con velocidad declinante (Di Bernardo y Cleasby, 1980)

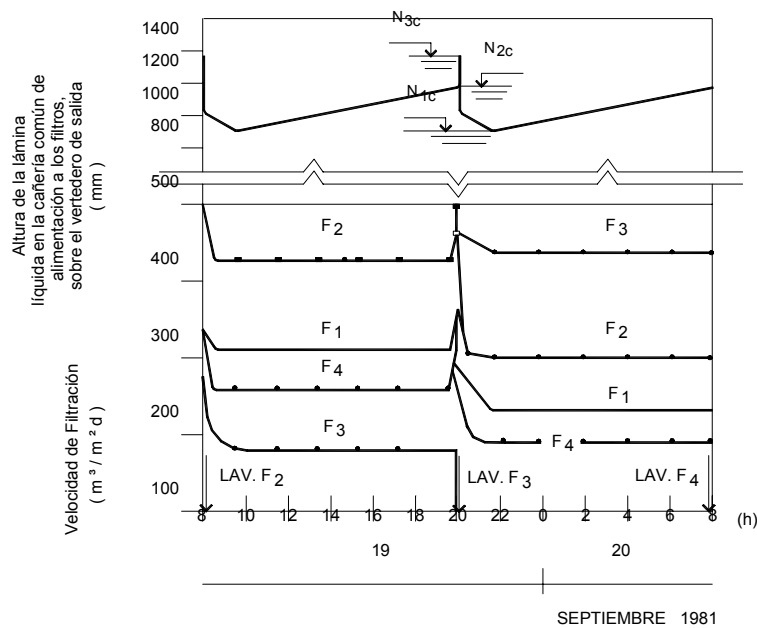


Figura 14. Variación del nivel de agua en el canal común de alimentación a filtros y velocidades de filtración observadas en la planta de tratamiento de agua (Di Bernardo, 1989)

Observando la **Figura 13** y la **Figura 14**, se ve que en la primera el tiempo para que se alcance el nivel N_{1c} resultó menor que el verificado en la **Figura 14**, debido a la existencia de capacidad de almacenamiento aguas arriba y en los propios filtros (canal de dimensiones relativamente grandes), mientras que en la instalación piloto había solamente una cañería. Por otra parte mientras en el prototipo el tiempo necesario para que el nivel de agua descienda de N_{3c} a N_{1c} fue del orden de 2 h, en la instalación piloto ese tiempo resultó inferior a 40 min, hecho observado en la **Figura 15** cuando las velocidades de filtración se hacen constantes.

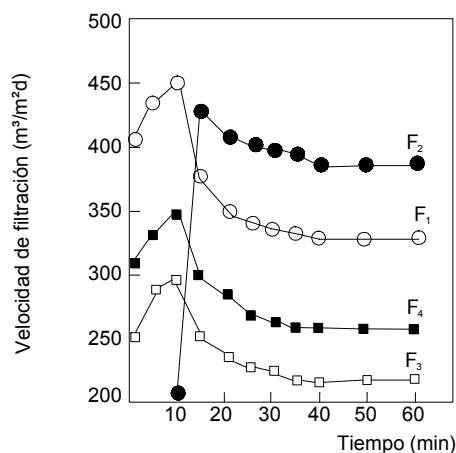


Figura 15. Variación del nivel de agua y de las velocidades de filtración durante el lavado de un filtro y luego de haber sido puesto en funcionamiento (Di Bernardo y Cleasby, 1980)

En esas condiciones, solamente durante el período de transición (disminución de N_{3c} a N_{1c}) las velocidades de filtración disminuyeron en el tiempo, permaneciendo prácticamente constantes durante el aumento del nivel de agua de N_{1c} a N_{2c} , contrariando totalmente lo imaginado por Cleasby en 1969 y 1972.

Comparación de la filtración con velocidad constante con la filtración con velocidad declinante variable

Según Cleasby (1969, 1972) la filtración con velocidad declinante presenta las siguientes ventajas sobre la de velocidad constante:

- Cuando un filtro es retirado de operación para que se efectúe su lavado, el nivel de agua sube gradualmente en los demás y consecuentemente, las variaciones en las velocidades de filtración son graduales.
- La pérdida de carga de la batería de filtros es apreciada por el operador por observación del nivel de agua en el canal común de alimentación a los filtros.
- El volumen de agua producido es mayor por unidad de pérdida de carga debida a la retención de impurezas en el manto filtrante.
- La carga hidráulica necesaria para la filtración es menor para carreras de filtración de la misma duración.
- La calidad del agua filtrada es mejor, pues la velocidad de filtración disminuye del inicio hacia el final de la carrera, de forma que no se producen los aumentos de turbiedad en el efluente del filtro.

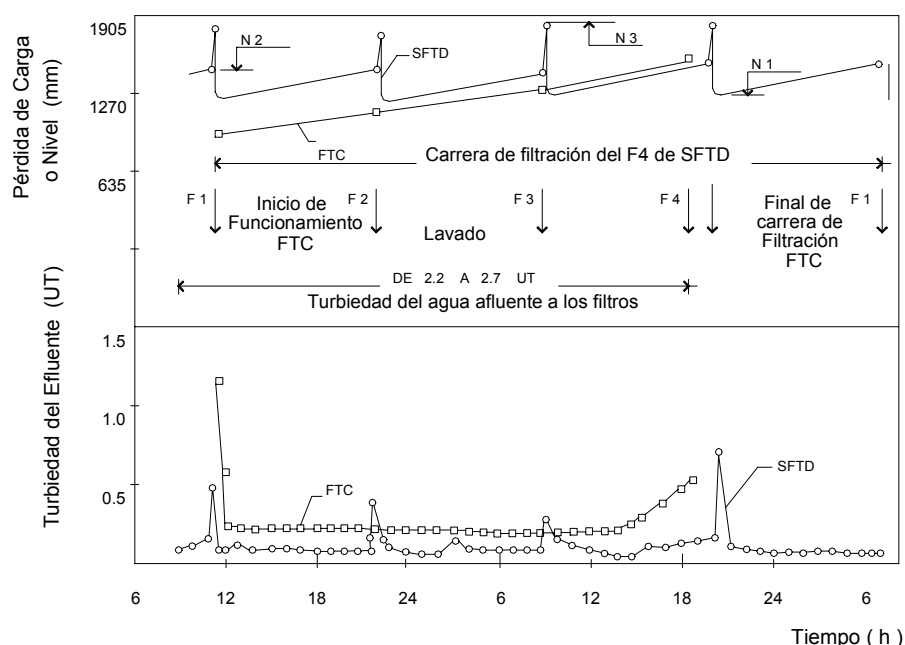


Figura 16. Variación de la pérdida de carga y de la turbiedad de los efluentes de instalaciones piloto con velocidad (SFUD) y con velocidad constante (FUC) para una velocidad media de filtración igual a 293 m/d (Di Bernardo y Cleasby, 1980)

En la **Figura 16** y la **Figura 17** se presentan los resultados de la operación en una instalación piloto de filtración con velocidad declinante, con cuatro unidades filtrantes y velocidad media de filtración de $293 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, respectivamente para agua decantada de una planta de ablandamiento de agua cruda proveniente de una fuente superficial y para agua coagulada (filtración directa descendente) de agua cruda proveniente del lago. En ambos casos, un filtro piloto con velocidad constante se operó en paralelo y con velocidad de filtración igual a la media de la filtración con velocidad declinante.

En la **Figura 16** se observa que con la misma carga hidráulica disponible para retención de impurezas, la duración de la carrera de filtración en la instalación de filtración con velocidad declinante fue más prolongada que la de filtración con velocidad constante. Con excepción de los momentos cuando un filtro de la filtración con velocidad declinante se retiraba de operación para el lavado, el efluente global del sistema de filtración con velocidad declinante presentaba turbiedad menor que la del agua filtrada con velocidad constante. Se debe recordar que solamente existía un filtro de velocidad constante, razón por la cual no surgieron picos de turbiedad en su afluente.

En la **Figura 17**, reproducida del trabajo de Hilmoe y Cleasby (1986), la turbiedad del efluente global del filtro con velocidad declinante resultó prácticamente igual a la del agua filtrada con velocidad constante. Sin embargo, la turbiedad del efluente de un filtro con velocidad declinante medida continuamente, resultó menor que la del efluente del filtro con velocidad constante durante un tiempo y posteriormente resultó mayor con el transcurso del tiempo. Esta situación sorprende pues a medida que disminuye la velocidad de filtración debería mejorar la calidad del agua filtrada en el filtro monitoreado, sin que los autores encontrasen razón posible para tal situación. No se efectuaron simulaciones de lavados en el filtro con velocidad constante que causarían perjuicio a la calidad del efluente global como se vio anteriormente.

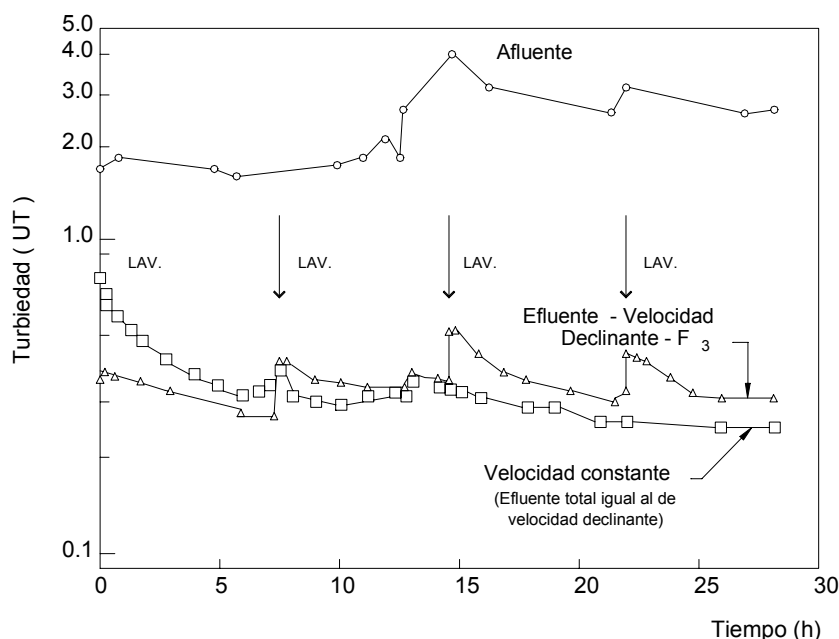


Figura 17. Turbiedad del afluente y de los efluentes de instalaciones piloto con velocidad declinante y con velocidad constante para una velocidad media de filtración igual a $293 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ – filtración directa en línea (Hilmoe y Cleasby, 1986)

Siempre que sea posible la construcción de por lo menos cuatro filtros en la batería, la filtración con velocidad declinante será más apropiada que la filtración con velocidad constante, con o sin el empleo de equipos de control de caudal y nivel.

Criterios de proyecto de sistemas de filtración con velocidad declinante variable

La elaboración del proyecto de un sistema de filtración con velocidad declinante requiere conocer algunos parámetros y la preparación de un anteproyecto para obtener las ecuaciones de pérdida de carga desde el canal común de alimentación a los filtros hasta el vertedero de salida. A continuación se discuten y presentan los criterios para cada una de las partes que constituyen el sistema de filtración con velocidad declinante.

a) Posición de la cresta del vertedero de salida

El umbral del vertedero de salida, individual o general, debe estar situado en una cota apropiada para que los filtros funcionen como vasos comunicantes. Además las entradas a los filtros deben estar ahogadas y las canaletas de recolección del agua de lavado deben estar siempre sumergidas para que no se produzca una caída libre del líquido que ingresa al filtro, ya que puede deteriorar el manto filtrante.

Es importante considerar que en estos filtros la cresta de los vertederos individuales de salida del agua filtrada esté colocada a una cota algunos centímetros superior a la de la superficie del manto filtrante, a fin de evitar que en éste aparezcan presiones relativas negativas.

Cuando el caudal afluente es el nominal o próximo al de la batería, las canaletas de lavado permanecen sumergidas y en consecuencia no existe caída directa del agua que ingresa por las canaletas sobre el manto filtrante.

Cuando el caudal afluente a la batería de filtros disminuye en una proporción tal que las canaletas de lavado (y consecuentemente las compuertas de ingreso) quedaran no sumergidas, se tendrá filtración igualmente repartida, o sea las unidades en ese momento trabajarán con iguales caudales y velocidades de filtración (con distintas pérdidas de carga).

Cuando posteriormente vuelve a aumentar el caudal hasta producir la sumergencia de las compuertas de entrada y las canaletas colectoras, se ocasiona un rápido incremento de las velocidades de filtración de acuerdo con el grado de retención de impurezas que presentaba cada filtro (debido a la mayor carga). Como resultado se produce agua filtrada no satisfactoria.

Para evitar problemas semejantes a los mencionados, se puede colocar una válvula ajustable en la cañería de salida, de forma que la pérdida de carga introducida por esa válvula se programe en función del caudal afluente a la planta, para que las canaletas de recolección del agua de lavado permanezcan siempre ahogadas independientemente del nivel de agua en los filtros.

Aunque es posible ubicar la cresta del vertedero de salida por debajo de la cota superior del manto filtrante, conforme a lo investigado en la instalación piloto por Di Bernardo y Souza (1991), es esencial que exista una válvula mariposa que se accione siempre que cambie el caudal afluente a la planta de tratamiento.

A continuación se describe el método desarrollado por estos autores, considerando constante el caudal que ingresa en la instalación:

- Se construyó una planta piloto con el mismo número de filtros de la batería existente o prevista en la planta de tratamiento.
- Se operó la planta piloto con la misma velocidad media prevista ubicando la cresta del vertedero de salida a la misma cota que la superficie del manto filtrante y se midió la pérdida de carga a lo largo del manto filtrante por medio de piezómetros.
- Se trazaron las curvas de evolución de la pérdida de carga para un filtro de la batería durante su carrera de filtración (para confirmar los resultados se repitió el procedimiento a más de un filtro de la batería).
- En base a la curva que mostraba las pérdidas al final de la carrera de filtración, se evaluó lo que dicha curva podía desplazarse sin que se produjera una presión inferior a la atmosférica en el manto filtrante.

En la **Figura 18**, la “Condición 1” corresponde cuando el nivel del umbral del vertedero de salida del agua filtrada se ubica igual al de la superficie del lecho filtrante. La “Condición 2” es cuando el vertedero de salida se trasladó a una altura “x” debajo de la correspondiente a la “Condición 1”.

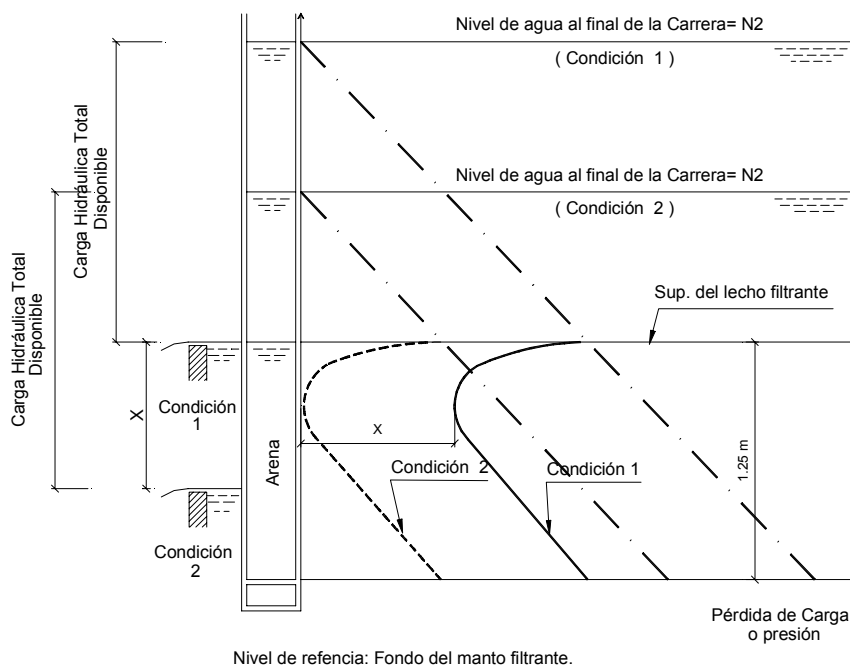


Figura 18. Estudio teórico para determinar la cota del umbral del vertedero de salida de los filtros de sistemas de filtración con velocidad declinante (Di Bernardo y Souza, 1991)

En la misma **Figura 18** se planteó en forma teórica el análisis de la operación efectuada en una instalación piloto de filtración declinante, mostrando las curvas de presiones dentro del lecho filtrante al final de la carrera (nivel líquido al final de la carrera N_{f2} para el filtro más sucio de la batería), de ambas Condiciones. Se demostró que la distancia mínima que se podría desplazar el umbral del vertedero de salida, debajo del nivel de la

superficie del lecho filtrante, es “x” para no tener presiones negativas, o sea para no producir presión (absoluta) inferior a la atmosférica dentro del manto filtrante.

Esta situación indica que se podría reducir la altura de la caja del filtro en un valor “x”. También sería muy importante en la consideración de una reforma a batería de filtros existentes donde se procura aumentar el caudal filtrado sin aumentar el número de unidades.

Se resalta la necesidad de una válvula en la cañería de salida para aumentar la pérdida de carga turbulenta cuando disminuya el caudal afluente a la planta.

En la **Figura 19** se presentan los diagramas de presión en el manto filtrante de uno de los cuatro filtros de una instalación piloto de filtración con velocidad declinante operada con una velocidad media de $300 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ y con el umbral del vertedero de salida ubicada a la misma cota de la superficie del manto filtrante.

En la **Figura 19a** se muestran las curvas de presión relativas al nivel de agua N_{1c} , mientras que en la **Figura 19b** se ven las curvas de presión correspondientes al nivel de agua N_{2c} .

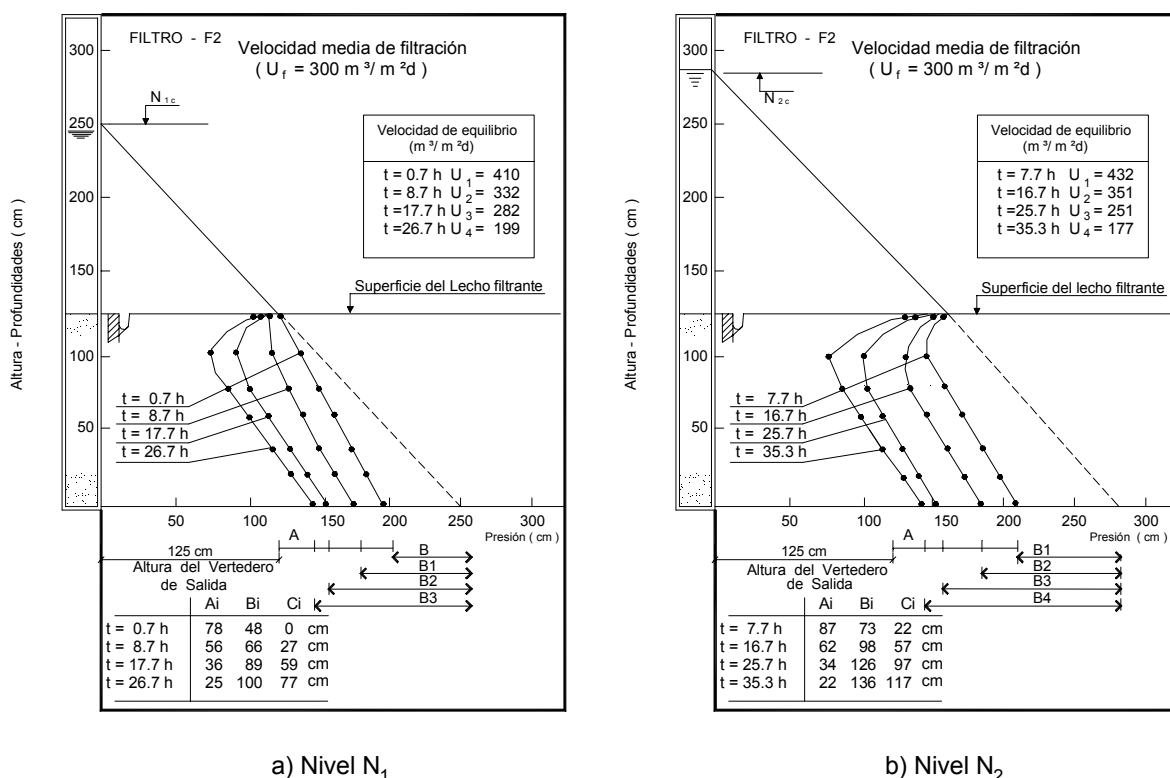


Figura 19. Curvas de presión en el manto filtrante durante la carrera de filtración del filtro F_2 de una batería de 4 filtros de velocidad declinante con el umbral del vertedero de salida ubicado a la misma cota de la superficie del manto filtrante (Di Bernardo y Souza, 1991)

En la **Figura 20** se presentan las curvas de presión semejantes, tanto en el nivel N_{1c} como en el nivel N_{2c} , ambas disminuidas en 0,65 m.

Se concluye que si el caudal a filtrar en la batería no variara, se podría reducir la altura de la caja de las unidades, en este caso 0,65 m.

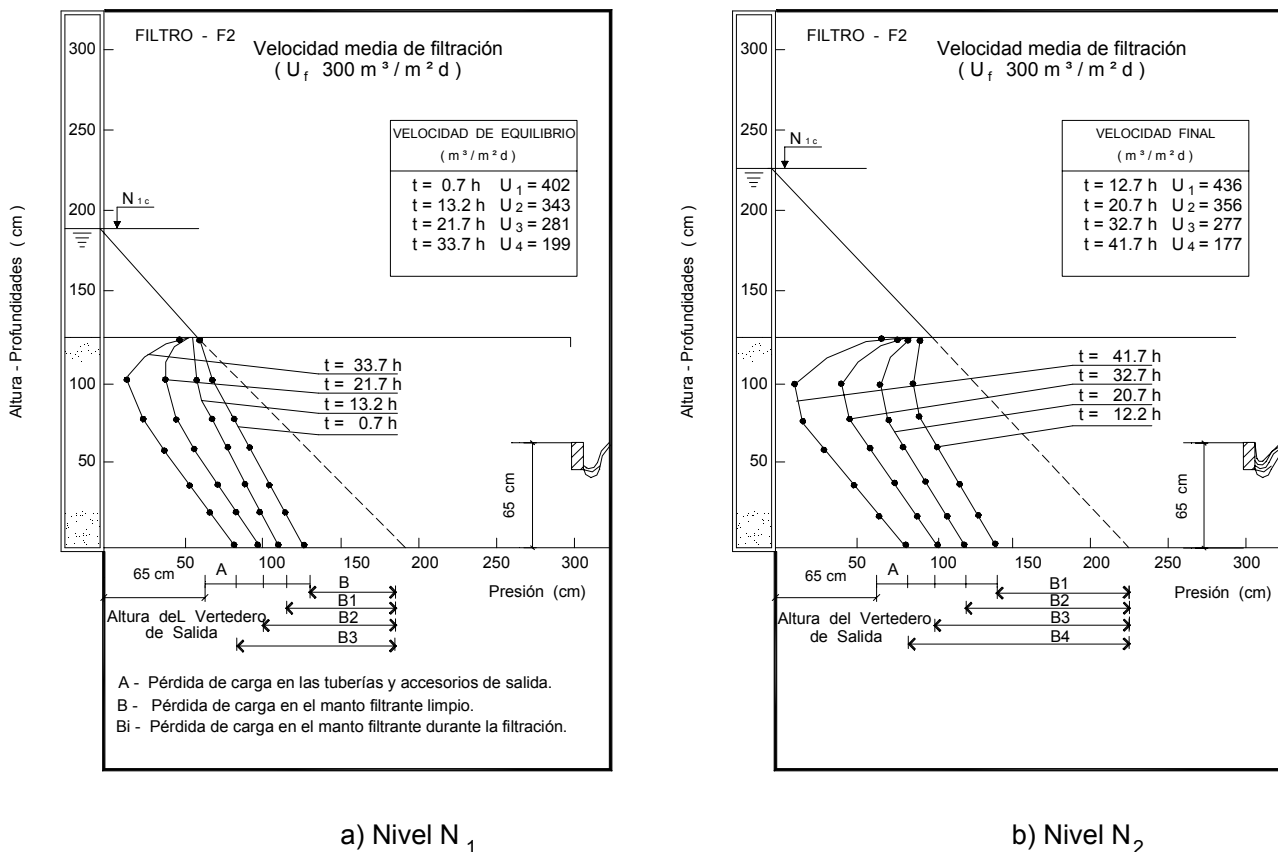


Figura 20. Curvas de presión en el medio filtrante durante la carrera de filtración del filtro F_2 de una batería de 4 filtros de velocidad declinante con el umbral del vertedero de salida situado 0,65 m debajo de la cota de la superficie del manto filtrante (Di Bernardo y Souza, 1991)

b) Entrada y salida de los filtros

La entrada a los filtros se puede efectuar por medio de una cañería provista de válvulas, o compuertas. El accionamiento de esos dispositivos puede ser manual o automatizado, dependiendo del tamaño de la planta y de la eficiencia del mantenimiento. Cuando se utilizan cañerías individuales de alimentación a los filtros, éstas pueden derivarse de una cañería o de un canal común.

Si no existe posibilidad de un canal se puede utilizar una cañería común de alimentación a los filtros, siempre que se tomen precauciones en relación a la pérdida de carga entre la primera y la última derivación, pues si fuese significativa, los filtros estarán sometidos a cargas hidráulicas diferentes, lo que no es deseable.

La salida de los filtros depende fundamentalmente del tipo de sistema de aplicación del agua para lavado. Si el agua para lavado proviene de los otros filtros de la batería se utilizan canales y compuertas de pared. Cuando el agua para lavado se bombea directamente o proviene de un tanque elevado, comúnmente se utilizan cañerías con válvulas. Se debe prever en cualquier caso, un vertedero general o cámaras con vertederos individuales para asegurar el nivel mínimo de agua deseado en el interior de los filtros.

Las cámaras individuales con un vertedero tienen la ventaja de la medición del caudal por medio de un dispositivo simple, el cual permite determinar la velocidad de filtración en cada filtro y realizar ajustes si es necesario, respecto al aumento o disminución de la carga hidráulica disponible.

Otra opción sería el uso de cañerías individuales con un medidor de caudal, conectadas a un canal general de agua filtrada.

No es recomendable utilizar placas orificio o dispositivos complejos para aumentar o disminuir la pérdida de carga turbulenta.

Cuando existen variaciones en el caudal afluente a la instalación es preferible instalar válvulas mariposa en las cañerías individuales, con accionamiento automático y programado para cada caudal previsto. Aunque las salidas no permitan la medición del caudal de cada filtro, existe la posibilidad de conocer los caudales de los filtros si las pérdidas de carga en las entradas pueden medirse con cierta precisión.

Ejemplo

El caudal afluente a una planta de tratamiento de agua, medida en la canaleta Parshall resultó de 500 L/s. La filtración se realiza en una batería de 6 filtros que funcionan con velocidad declinante con una velocidad media de filtración de $300 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$. En un determinado momento, las pérdidas de carga en las compuertas de entrada, obtenidas a partir de las diferencias en los niveles de agua en el canal común de alimentación y en el interior de los filtros eran: F_1 ($h_1 = 0,035 \text{ m}$); F_2 (0,05 m); F_3 (0,06 m); F_4 (0,025 m); F_5 (0,03 m); F_6 (0,08 m). Se desea saber:

- 1). el filtro más sucio y el más limpio de la batería;
 - 2). las velocidades de filtración en cada uno de ellos, sabiéndose que son de igual superficie.
-
- 1). El filtro más sucio y el más limpio de la batería

Como todos los filtros son iguales, el filtro F_6 es el más limpio pues presenta la mayor pérdida de carga en la compuerta de entrada (0,08), por mayor caudal filtrado que pasa por la compuerta. En cuanto el filtro F_4 es el más sucio, ya que presenta la menor pérdida de carga en la compuerta de entrada (0,025 m) o sea con menor caudal filtrado de pasaje. Es interesante observar los niveles de agua en el interior de los filtros pues ello puede ayudar al operador en el momento del lavado de un filtro si no hubiese registro de operación y medidor de caudal en las salidas.

2). Velocidades de filtración

La pérdida de carga en las compuertas de entrada se puede calcular con una expresión del tipo $h_{co} = K_{co} \times U^2$,

donde:

h_{co} = la pérdida de carga en m,

K_{co} = el coeficiente de la compuerta en d^2/m , y

U = la velocidad de filtración en $m^3/m^2.d$.

Aplicando esa ecuación para los seis filtros se tiene:

$$\text{Filtro } F_1 \rightarrow h_{co1} = K_{co} (U_1)^2 \rightarrow 0,035 = K_{co} (U_1)^2$$

$$\text{Filtro } F_2 \rightarrow h_{co2} = K_{co} (U_2)^2 \rightarrow 0,05 = K_{co} (U_2)^2$$

$$\text{Filtro } F_3 \rightarrow h_{co3} = K_{co} (U_3)^2 \rightarrow 0,06 = K_{co} (U_3)^2$$

$$\text{Filtro } F_4 \rightarrow h_{co4} = K_{co} (U_4)^2 \rightarrow 0,025 = K_{co} (U_4)^2$$

$$\text{Filtro } F_5 \rightarrow h_{co5} = K_{co} (U_5)^2 \rightarrow 0,03 = K_{co} (U_5)^2$$

$$\text{Filtro } F_6 \rightarrow h_{co6} = K_{co} (U_6)^2 \rightarrow 0,08 = K_{co} (U_6)^2$$

O sea:

$$U_2 = 1,195 U_1; U_3 = 1,309 U_1; U_4 = 0,845 U_1; U_5 = 0,926 U_1; U_6 = 1,512 U_1$$

La suma de las velocidades de filtración dividida por el número de filtros de la batería es igual a la velocidad media de filtración. En consecuencia se tiene:

$$U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6 = 6 U_{med} = 1800$$

Sustituyendo los valores de U_2 , U_3 , U_4 , U_5 y U_6 en esta ecuación, se obtiene el valor de U_1 :

$$U_1 + 1,195 U_1 + 1,309 U_1 + 0,845 U_1 + 0,926 U_1 + 1,512 U_1 = 6,787 U_1 = 1800$$

De allí:

$$U_1 = 1800/6,787 = 265,21 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot d$$

$$U_2 = 1,195 \cdot 265,21 = 316,93 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot d$$

$$U_3 = 1,309 \cdot 265,21 = 347,16 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot d$$

$$U_4 = 0,845 \cdot 265,21 = 224,10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot d$$

$$U_5 = 0,926 \cdot 265,21 = 245,59 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot d$$

$$U_6 = 1,512 \cdot 265,21 = 401,00 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot d$$

$$U_{med} = \Sigma U/6 = 300 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot d = \text{velocidad media de diseño}$$

c) Modelación matemática

En la literatura se encuentran modelos para obtener las velocidades de filtración y las variaciones del nivel de agua en los filtros. Estos modelos están basados en algún tipo de ecuación que requiere determinar los coeficientes empíricos, lo que dificulta sobremanera su aplicación en la práctica.

Di Bernardo (1985, 1986) desarrolló un modelo que no recurre a ecuaciones empíricas y no posee parámetros de difícil determinación. El dimensionamiento del sistema se obtiene fácilmente y permite verificar los efectos de la velocidad media de filtración, de la variación del número de filtros, de la carga hidráulica disponible y de la pérdida de carga turbulenta en el desempeño del sistema.

El modelo no prevé sin embargo el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo, lo que no implica un defecto, pues difícilmente el afluente al sistema de filtración presenta una calidad constante. Además los modelos que consideran el efecto de la retención de impurezas en el interior del medio filtrante se desarrollaron a partir de la filtración de suspensiones de caolinita con concentración constante, presentando una situación completamente diferente a la que normalmente se encuentra en la práctica.

Por lo tanto, debido a la simplicidad de aplicación del modelo propuesto por Di Bernardo (1985, 1986), el mismo se detallará a continuación y posteriormente será complementado por el modelo desarrollado por Machado y Di Bernardo (1996), que contempla el almacenamiento de agua aguas arriba de los filtros. Conviene destacar que los modelos matemáticos, tanto el inicial de Di Bernardo como el posterior de Machado y Di Bernardo, han sido utilizados con éxito en Brasil y en muchos otros países.

Para la modelación, Di Bernardo (1985, 1986) consideró una batería de 4 filtros trabajando en situación repetitiva (ver **Figura 21**).

Al inicio del funcionamiento todos los filtros de la batería se encuentran limpios y, por lo tanto funcionan con la velocidad media de filtración U_{med} . El nivel de agua en el canal común de alimentación de los filtros está inicialmente en N_{oc} igual a la cota del umbral del vertedero de salida más las pérdidas de carga en los filtros. Por esta razón será necesario comenzar a lavar los filtros de la batería en un intervalo de tiempo $\Delta U'$ prefijado entre el lavado de un filtro y el lavado de otro filtro para que todos los filtros se laven una vez en un período de 24 horas (se recomienda: 4 filtros, $\Delta T' = 24/4 = 6,0$ h; 6 filtros, $\Delta T' = 24/6 = 4,0$ h; 8 filtros, $\Delta T' = 24/8 = 3,0$ h; 10 filtros, $\Delta T' = 24/10 = 2,4$ h).

Luego que cada filtro de una batería se lavara una vez en una carrera, el filtro más sucio será lavado solamente cuando se produzca el nivel N_{c2} y así sucesivamente con los restantes.

Si en la batería con filtros idénticos, la calidad del agua y el caudal afluente se mantuvieran inalterados, se debería tener una situación repetitiva en donde las velocidades de filtración disminuyen en forma escalonada cada vez que un filtro recién lavado entre manualmente en operación.

En la **Figura 21**, en la situación repetitiva, el filtro F_4 luego de ser lavado y puesto en funcionamiento pasa a funcionar con la velocidad máxima de filtración, el filtro F_1 , con la velocidad de filtración U_a , el filtro F_2 con la velocidad U_b y el filtro F_3 con la velocidad U_{min} .

Luego de otro ciclo de funcionamiento (período de tiempo entre sucesivos lavados), se lava el filtro F_3 y se lo pone en funcionamiento y pasa a funcionar con la velocidad de filtración máxima, el filtro F_4 , con velocidad de filtración U_a , el filtro F_1 con velocidad U_b y el filtro F_2 con velocidad U_{\min} , y así en adelante.

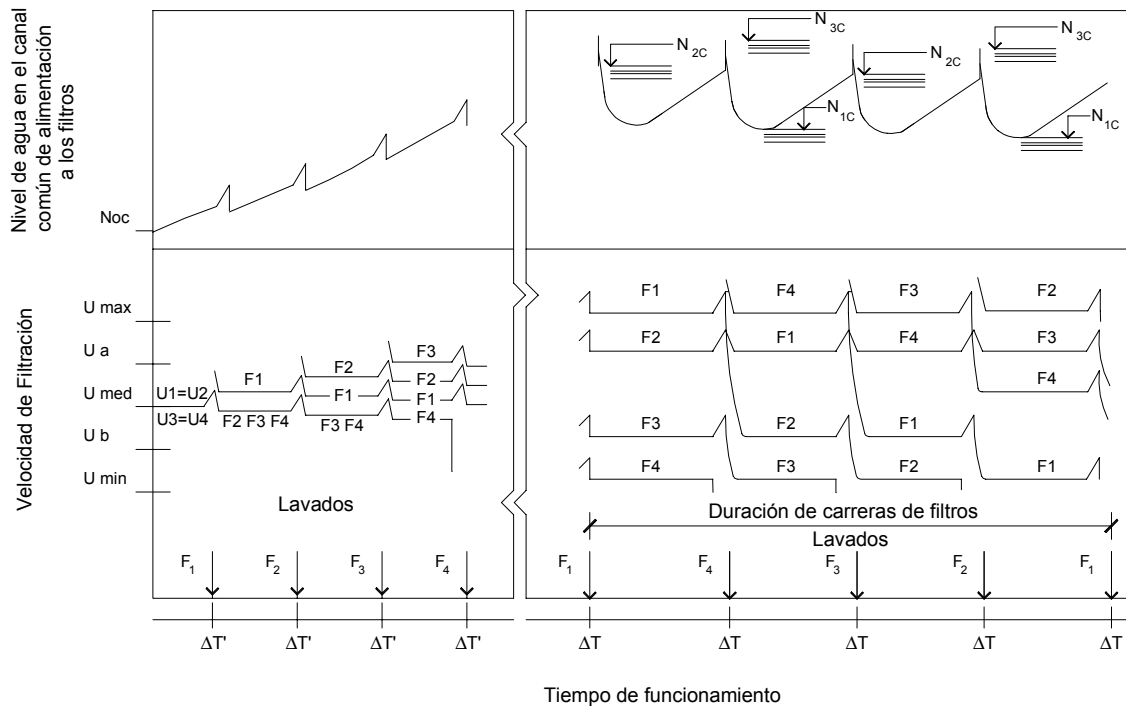


Figura 21. Configuración típica de la variación del nivel de agua en el canal común de alimentación de los filtros y velocidades de filtración en un sistema de filtración con velocidad declinante, incluyendo el inicio de la operación (Di Bernardo, 1985, 1986)

En la **Figura 22** se presentan las curvas de pérdida de carga en el medio filtrante limpio (pérdida de carga laminar H_L) y en la compuerta de entrada, el sistema de drenaje, las cañerías y accesorios, el vertedero de salida, etc. (pérdida de carga turbulenta H_{tu}) y la suma de las dos H , en función de la velocidad de filtración. También se observan, las pérdidas de carga correspondientes a las velocidades de filtración consideradas, U_{\max} , U_a , U_b y U_{\min} . Las pérdidas de carga están referidas a la cota de la cresta de los vertederos individuales de salida (en el caso de un vertedero general de salida se tiene un valor constante de lámina líquida), a partir del cual se inician las curvas de pérdida de carga laminar, turbulenta y la suma de las dos.

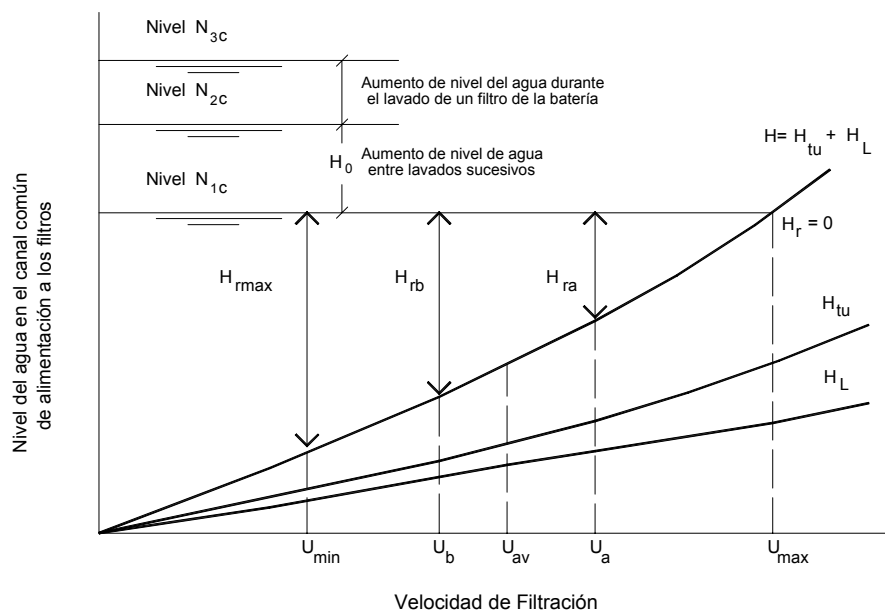


Figura 22. Variación del nivel de agua en el canal común de alimentación de los filtros en función de la velocidad de filtración y de las pérdidas de carga turbulenta y laminar (Di Bernardo, 1985, 1986)

Considerando la mencionada situación repetitiva, los filtros funcionan según una sucesión de estadios en cada ciclo. Por ejemplo el filtro F_1 recién lavado pasa a funcionar con los siguientes valores de velocidad de filtración durante la carrera de filtración: inicial con velocidad de filtración $U_{m\acute{a}x}$ en el nivel N_{1c} , la cual disminuye hacia U_a luego que el filtro F_4 recién lavado entra en operación, hacia U_b luego que el filtro F_3 recién lavado entra en operación y para $U_{m\acute{i}n}$ luego que el filtro F_2 ha sido lavado y puesto en funcionamiento. Por lo tanto, el filtro F_1 presentará las siguientes pérdidas de carga debidas a la retención de impurezas (H_r):

$H_r = 0$	en el nivel N_{1c}
$H_r = H_0$	en el nivel N_{2c}
$H_r = H_{ra}$	en el nivel N_{1c} (luego que el filtro F_4 , recién lavado entre en operación)
$H_r = H_{ra} + H_0$	en el nivel N_{2c}
$H_r = H_{rb}$	en el nivel N_{1c} (luego que el filtro F_3 , recién lavado entre en operación)
$H_r = H_{rb} + H_0$	en el nivel N_{2c}
$H_r = H_{r\acute{m}\acute{a}x}$	en el nivel N_{1c} (luego que el filtro F_2 , recién lavado entre en funcionamiento)
$H_r = H_{r\acute{m}\acute{a}x} + H_0$	en el nivel N_{2c} (término de la carrera de filtración del filtro F_1)

El modelo matemático propuesto por Di Bernardo (1985, 1986) se basa en la hipótesis de que durante el período de transición entre el retiro de un filtro para su lavado (nivel N_{2c}) y hasta que el filtro recién lavado se haya puesto en funcionamiento y se alcance el nivel N_{1c} , los coeficientes de resistividad debido a la retención de impurezas permanecerían constantes en los filtros restantes en operación. O sea que la distribución de las impurezas retenidas en el interior del manto filtrante de cada filtro, no se modifican durante el período de tiempo en que el filtro a ser lavado se encuentra fuera de operación.

A pesar de la simplificación, esta hipótesis hizo posible el cálculo de las pérdidas de carga de un filtro durante su carrera de filtración y determinar las variaciones de nivel en el canal común de alimentación y las velocidades de filtración de operación del filtro.

En realidad, si la capacidad de almacenamiento aguas arriba de los filtros no fuese significativa como se verá posteriormente, los filtros restantes en operación presentan picos de turbiedad durante el lavado de un filtro de la batería debido al aumento de la velocidad con una salida de parte de las impurezas y se tiene una retención de las impurezas hasta que el agua alcance el nivel N_{1c} en el canal común de alimentación de los filtros, existiendo en cierta forma una compensación.

El modelo se ha constituido en una herramienta bastante útil para el proyecto y el análisis de los sistemas de filtración con velocidad declinante. Con su empleo, es posible determinar las velocidades de filtración y las variaciones de nivel de agua en los filtros, tanto durante la operación como en el período cuando uno de los filtros se retira para lavado. Además permite el análisis entre otros factores, la influencia de la velocidad media de filtración, el número de unidades en la batería, la pérdida de carga turbulenta total y la carga hidráulica disponible en el funcionamiento del sistema de filtración.

La curva de las pérdidas de carga totales turbulenta y laminar (ver **Figura 22**) puede representarse por la siguiente ecuación genérica:

$$H = k_{ro} \cdot U + k_t \cdot U^y \quad (6)$$

donde:

H : pérdida de carga total con el medio filtrante limpio (m)

K_{ro} : coeficiente de pérdida de carga laminar inicial (d)

K_t : coeficiente de pérdida de carga turbulenta (d^y)

U : velocidad de filtración (m/d)

En el modelo se considera que el escurrimiento a través del medio filtrante es laminar, permaneciendo laminar en las etapas de elevada colmatación. Siendo así, la pérdida de carga debida a la retención de impurezas es una función lineal de la velocidad de filtración, pudiendo ser expresada por:

$$H_r = K_r U \quad (7)$$

Nivel	Filtro	Condición	U	K _r	H _r	Ecuaciones para el Filtro F ₁
N _{1c}	F ₁	Inicio	U _{máx}	cero	cero	$H_0 = 0$
N _{2c}	F ₂		U _a	K _{r0}	H _{ra}	
	F ₃		U _b	K _{ra}	H _{rb}	
	F ₄		U _{mín}	K _{rb}	H _{rmáx}	
N _{2c}	F ₁	antes del lavado de F ₄	U _{máx}	K _{r0}	H ₀	$H_0 = K_{r0} U_{máx}$ (8)
	F ₂		U _a	K _{ra}	H _{ra} + H ₀	
	F ₃		U _b	K _{rb}	H _{rb} + H ₀	
	F ₄		U _{mín}	K _{máx}	H _{rmáx} + H ₀	
N _{1c}	F ₄	Luego de F ₄ entrar en operación	U _{máx}	cero	cero	$\frac{H_0}{U_{máx}} = \frac{H_{ra}}{U_a} \Rightarrow H_{ra} = H_0 \frac{U_a}{U_{máx}}$ (9)
	F ₁		U _a	K _{r0}	H _a	
	F ₂		U _b	K _{ra}	H _b	
	F ₃		U _{mín}	K _{rb}	H _{rmáx}	
N _{2c}	F ₄	antes del lavado de F ₃	U _{máx}	K _{r0}	H ₀	$H_{ra} + H_0 = K_{ra} U_a$ (10)
	F ₁		U _a	K _{ra}	H _{ra} + H ₀	
	F ₂		U _b	K _{rb}	H _{rb} + H ₀	
	F ₃		U _{mín}	K _{máx}	H _{rmáx} + H ₀	
N _{1c}	F ₃	Luego de F ₃ entrar en operación	U _{máx}	cero	cero	$H_{rb} = k_{ra} \cdot U_b$ (11)
	F ₄		U _a	K _{r0}	H _{ra}	
	F ₁		U _b	K _{ra}	H _b	$\frac{H_{ra} + H_0}{U_a} = \frac{H_{rb}}{U_b} \Rightarrow H_{rb} = (H_0 + H_{ra}) \frac{U_b}{U_a}$ (12)
	F ₂		U _{mín}	K _{rb}	H _{rmáx}	
N _{2c}	F ₃	antes del lavado de F ₂	U _{máx}	K _{r0}	H ₀	$H_{rb} + H_0 = k_{rb} \cdot U_b$ (13)
	F ₄		U _a	K _{ra}	H _{ra} + H ₀	
	F ₁		U _b	K _{rb}	H _{rb} + H ₀	
	F ₂		U _{mín}	K _{máx}	H _{rmáx} + H ₀	
N _{1c}	F ₂	Luego de F ₂ entrar en operación	U _{máx}	cero	cero	$H_{r máx} = k_{rb} \cdot U_{mín} \cdot$ (14)
	F ₃		U _a	K _{r0}	H _{ra}	
	F ₄		U _b	K _{ra}	H _{rb}	$\frac{H_{rb} + H_0}{U_b} = \frac{H_{r máx}}{U_{mín}} \Rightarrow H_{r máx} = (H_{rb} + H_{r0}) \frac{U_{mín}}{U_b}$ (15)
	F ₁		U _{mín}	K _{rb}	H _{rmáx}	
N _{2c}	F ₂	Antes del lavado de F ₁	U _{máx}	K _{r0}	H ₀	
	F ₃		U _a	K _{ra}	H _{ra} + H ₀	
	F ₄		U _b	K _{rb}	H _{rb} + H ₀	$(H_{r máx} + H_0) = k_{r máx} \cdot U_{mín} \cdot$ (16)
	F ₁		U _{mín}	K _{máx}	H _{rmáx} + H ₀	
N _{1c}	F ₁	Luego de F ₁ entrar en operación	U _{máx}	cero	cero	
	F ₂		U _a	K _{r0}	H _{ra}	
	F ₃		U _b	K _{ra}	H _{rb}	
	F ₄		U _{mín}	K _{rb}	H _{rmáx}	

Tabla 1. Velocidades de filtración, pérdidas de carga, coeficientes de resistividad y ecuaciones básicas del modelo de Di Bernardo (1985, 1986)

donde:

H_r : pérdida de carga debida a retención de impurezas (m)

K_r : coeficiente de resistividad debido a retención de impurezas (d)

U : velocidad de filtración (m/d)

Los valores de H_0 (aumento del nivel de agua entre N_{1c} y N_{2c}) y de H_{ra} (pérdida de carga debida a la retención de impurezas en el segundo filtro más limpio de la batería en el nivel N_{1c}), H_{rb} (pérdida de carga debida a la retención de impurezas en el tercer filtro más limpio de la batería en el nivel N_{1c}) y $H_{rmáx}$ (pérdida de carga debida a la retención de impurezas en el tercer filtro más sucio de la batería en el nivel N_{1c}) se representan como función de la respectiva velocidad de filtración según una ecuación semejante a la 7.

Es interesante utilizar la **Figura 21** para acompañar a la **Tabla 1**, en donde se muestra el desarrollo de la modelación matemática propuesta por Di Bernardo.

Si N_{2c} fuera conocido (carga hidráulica disponible conocida) es posible iniciar un cálculo para determinar las velocidades de filtración y las pérdidas de carga involucradas. La secuencia de pasos para la obtención de las mismas se describe a continuación:

- Fijar la carga hidráulica o sea el nivel N_{2c} de modo que la relación entre las velocidades máxima y media de filtración resulten comprendidas entre 1,3 y 1,5.
- Igualar la ecuación de pérdida de carga total $H = k_{r0} \cdot U + k_t \cdot U^y$ (ecuación 6), a la carga hidráulica disponible, sustituyendo U por U_0 y H por H_d . Resultará un valor de la velocidad de filtración U_0 , en el nivel N_{2c} (sin retención de impurezas), por lo tanto, luego que un filtro recién lavado entre en operación, la resistencia total a la filtración será menor, de forma que el nivel de agua en el canal común de alimentación de los filtros no será N_{2c} . Para el inicio del cálculo se utiliza un valor de velocidad menor que U_0 , por ejemplo (0,8 a 0,85) U_0 . La ecuación 6 puede ser reescrita para una velocidad menor que U_0 , o sea:

$$H_d - H_0 = k_0 U_{máx} + k_t (U_{máx})^y \quad (17)$$

Determinar H_0 utilizando la ecuación 17 y, con la ecuación 9, $H_{ra} = H_0 \cdot U_a / U_{máx}$, calcular U_a , en el nivel N_{1c} , pues se tienen dos ecuaciones (ecuación 9 y 18) y dos incógnitas, U_a y H_{ra} .

$$H_d - H_0 - H_{ra} = k_0 U_a + k_t (U_a)^y \quad (18)$$

Utilizar, de la misma forma, las demás ecuaciones de la **Tabla 1** y determinar los otros pares de valores, U_b y H_{rb} , $U_{mín}$ y $H_{rmáx}$.

Obtener la velocidad media, U_{med} , así calculada, dividiendo la suma $U_{máx}$, U_a , U_b y $U_{mín}$ por el número de filtros 4 y comparar ese valor con la velocidad media real. Si no resulta igualdad entre ambos valores de U_{med} , se debe reiterar el cálculo hasta que eso suceda. Como resulta muy laborioso no se recomienda efectuar el cálculo manualmente.

El mismo procedimiento se puede aplicar para determinar el nivel N_{3c} y de las velocidades de filtración en los filtros restantes en operación.

En instalaciones piloto, Di Bernardo y Cleasby (1980), Di Bernardo y Souza (1991), Di Bernardo y Teixeira (1991) y Di Bernardo y Machado (1996) observaron que sin capacidad de almacenamiento sustancial de aguas arriba de los filtros (área adicional aguas arriba de los filtros en la cual tienen lugar las variaciones de nivel), el caudal total efluente se aproxima al caudal afluente en el final del lavado de un filtro de la batería. En tanto en escala real, esa condición muchas veces no sucede pues el tiempo para que los caudales se igualen es generalmente superior a 30 minutos, comúnmente mayor que el tiempo en que el filtro permanece fuera de operación. Adicionalmente existe cierta capacidad de almacenamiento de agua en el canal común de alimentación de los filtros así como en las plantas de tratamiento con decantadores.

Suponiendo batería con cuatro filtros en los cuales los coeficientes de resistividad permanecen constantes durante el lavado de un filtro de la batería, se preparó la **Tabla 2** en donde se tienen las ecuaciones necesarias para el cálculo de las velocidades de filtración al final del lavado y el aumento de nivel ($N_{3c} - N_{2c}$).

Nivel	Condición	Ecuación
N_{2c}	antes de F_4 ser retirado de operación para lavado	$k_t (U_{m\acute{a}x})^y + (k_{r0} + k_0) U_{m\acute{a}x} = H_d$ (19)
		$k_t (U_a)^y + (k_{ra} + k_0) U_a = H_d$ (20)
		$k_t (U_b)^y + (k_{rb} + k_0) U_b = H_d$ (21)
		$k_t (U_{m\acute{i}n})^y + (k_{r\acute{m}ax} + k_0) U_{m\acute{i}n} = H_d$ (22)
		$U_{m\acute{a}x} + U_a + U_b + U_{m\acute{i}n} = 4U_{med}$ (23)
N_{3c}	Caudal afluente igual al caudal total efluente	$k_t (U_{m\acute{a}x}^*)^y + (k_0 + k_{r0}) U_{m\acute{a}x}^* = H_d + \Delta h$ (24)
		$k_t (U_a^*)^y + (k_0 + k_{ra}) U_a^* = H_d + \Delta h$ (25)
		$k_t (U_b^*)^y + (k_0 + k_{rb}) U_b^* = H_d + \Delta h$ (26)
		$U_{m\acute{a}x}^* + U_a^* + U_b^* = 3U_{med}^*$ (27)
		$U_{med}^* = 4/3 \cdot U_{med}$ (28)

Observación: el asterisco en las ecuaciones 24, 25, 26, 27 y 28 se refiere a la condición del lavado

Tabla 2. Nivel N_{3c} y velocidades de filtración en los filtros restantes al final del lavado de uno de ellos (Di Bernardo, 1986)

El método de dimensionamiento propuesto para cuatro filtros se puede generalizar para cualquier número de filtros N , como se muestra a continuación:

Parámetros Conocidos : K_t , K_o , y , H_d , U_m y N

Durante la filtración

$$U_{m\acute{a}x} = F U_o \quad (29)$$

F : asumir entre 0,8 y 0,9 para iniciar los cálculos

$$Kr_o = \frac{H_o + H_i}{2 U_{m\acute{a}x}} \quad \text{para } i = 0 \quad (30)$$

$$H = K_t (U_i)^y + K_o U_i + H_o + H_i \quad \text{para: } 1 \leq i \leq (N - 1) \quad (31)$$

$$H_i = kr_{i-1} \cdot U_i \quad (32)$$

$$Kr_i = \frac{H_o + H_i}{U_i} \quad \text{para } i = 0 \quad (33)$$

$$\sum_{i=0}^N U_i = N U_{med} \quad (34)$$

Durante el lavado

$$K_t (U_i)^y + K_o U_i + k_{ri} U_i = H_d \quad \text{para: } 1 \leq i \leq N \quad (35)$$

$$\sum_{i=1}^N U_i = N U_{med} \quad (36)$$

$$K_t (U_i^*)^y + K_o U_i^* + Kr_i U_i^* = H_d + \Delta h \quad \text{para: } 1 \leq i \leq (N - 1) \quad (37)$$

$$\sum_{i=1}^{N-1} U_i^* = (N - 1) U_{med}^* \quad (38)$$

$$\frac{N U_{med}}{(N - 1)} = U_{med}^* \quad (39)$$

Machado y Di Bernardo (1996) complementaron el modelo de Di Bernardo, considerando la capacidad de almacenamiento de aguas arriba de los filtros en sistemas de filtración con velocidad declinante. Los autores estudiaron el comportamiento de la filtración con velocidad declinante con y sin almacenamiento adicional de aguas arriba de los filtros. Se utilizó una instalación piloto interconectada a tanques de almacenamiento en la entrada, simulando lo que posiblemente se produce en las plantas de tratamiento de agua en escala real, en especial las de filtración directa descendente con floculación.

Para el desarrollo de la investigación experimental, Machado y Di Bernardo utilizaron una instalación piloto de 6 filtros con medio filtrante de antracita y arena, funcionando con velocidad declinante. El afluente a la instalación piloto era el agua decantada en una planta de tratamiento de agua convencional, bombeando inicialmente a una cámara de nivel constante de la cual partía la cañería de alimentación de los filtros, la cual se interconectaba a tres tanques cilíndricos con áreas (en planta) iguales a 4, 8 y 16 veces el área de uno de los filtros de la batería. La investigación experimental se dividió en cinco etapas.

1ª. Etapa: determinación de las pérdidas de carga en el medio filtrante limpio (laminar) y en las válvulas, cañerías y accesorios de entrada y salida de cada filtro, sistema de drenaje, etc. (turbulenta), para diferentes velocidades de filtración. Basándose en las medidas efectuadas, se introdujo una pérdida de carga adicional por medio de una válvula de esfera localizada en la cañería de salida de cada filtro para que la pérdida de carga turbulenta resultara igual en todas las unidades.

2ª. Etapa: a partir de las ecuaciones de pérdida de carga obtenidas en la 1ª. Etapa, se definieron las cargas hidráulicas disponibles de 1,25 y 1,80 m, respectivamente, para velocidades medias de filtración de 300 y 405 m³/m².d, utilizando el modelo propuesto por Di Bernardo (1985, 1986).

3ª. Etapa: ejecución de ensayos con agua decantada en la planta de tratamiento como afluente a la instalación piloto, habiéndose estudiado cuatro capacidades adicionales de almacenamiento de agua aguas arriba de los filtros (4 A_F, 12 A_F, 20 A_F y 28 A_F, siendo A_F el área de un filtro, en planta). Además se realizaron ensayos sin almacenamiento adicional en agua aguas arriba de los filtros, para las velocidades medias de filtración de 300 y 405 m³/m². d y baterías con 4 y 6 filtros.

4ª Etapa: ejecución de ensayos con agua tratada en la planta como afluente, con baterías de 4 y 6 filtros y velocidad media de filtración igual a 300 m³/m².d, para las siguientes condiciones:

- 1). Durante el lavado de un filtro (20 min) y hasta que el nivel N_{1c} se alcance luego que el filtro recién lavado haya entrado en operación.
- 2). Durante el lavado de un filtro de la batería (hasta que se produzca igualdad del caudal afluente con el caudal total efluente y se alcance el nivel N_{1c} después que el filtro recién lavado haya entrado en operación).

Para ambas condiciones se realizaron ensayos con y sin capacidad adicional de almacenamiento de aguas arriba de los filtros.

5ª. Etapa: propuesta de metodología y ejecución de ensayos para determinar el nivel mínimo de operación (N_{1c}).

Según Machado y Di Bernardo (1996) en los sistemas con capacidad importante de almacenamiento de aguas arriba de los filtros, el tiempo transcurrido entre el momento en que un filtro recién lavado se pone en operación y aquél para el cual el caudal total efluente se iguala al afluente (período de transición) puede ser prolongado.

Así, una cantidad de partículas estará retenida en el manto filtrante del filtro más limpio de la batería cuando el nivel mínimo dinámico se alcance. De esta forma, el nivel N_{1c} no estará en la curva de pérdida de carga total con el manto filtrante limpio, correspondiente a la velocidad de filtración máxima, sino ligeramente por arriba.

Esa elevación del nivel mínimo dinámico (N_{1c}) corresponde a la pérdida de carga debida a la retención de impurezas que se producen durante el período de transición y será mayor cuanto mayor sea la capacidad adicional de almacenamiento de agua aguas arriba de los filtros.

Nivel	Filtro	Condición	Velocidad de Filtración	K _r	H _r	Ecuaciones para el Filtro F ₁
N _{1c}	F ₁ F ₂ F ₃ F ₄	Inicio	U _{máx} U _a U _b U _{mín}	cero K _{r0} K _{ra} K _{rb}	cero H _{ra} H _{rb} H _{rmáx}	$\Delta H_0 = 0 \quad y \quad H_1 = 0$
N _{2c}	F ₁ F ₂ F ₃ F ₄	antes del lavado de F ₄	U _{máx} U _a U _b U _{mín}	K _{r0} K _{ra} K _{rb} K _{máx}	$\Delta H_0 + H_1$ H _a + $\Delta H_0 + H_1$ H _{rb} + $\Delta H_0 + H_1$ h _{máx} + $\Delta h_0 + h_1$	$\Delta H_0 + H_1 = k_{r0} \cdot U_{máx}$ (40)
N _{1c}	F ₄ F ₁ F ₂ F ₃	Luego que F ₄ entre en operación	U _{máx} U _a U _b U _{mín}	cero K _{r0} K _{ra} K _{rb}	cero H _{ra} H _{rb} H _{rmáx}	$H_{ra} = K_{r0} \cdot U_a$ (41) $\frac{\Delta H_0 + H_1}{U_{máx}} = \frac{H_{ra}}{U_a} \Rightarrow H_{ra} = (\Delta H_0 + H_1) \frac{U_a}{U_{máx}}$ (42)
N _{2c}	F ₄ F ₁ F ₂ F ₃	antes del lavado de F ₃	U _{máx} U _a U _b U _{mín}	K _{r0} K _{ra} K _{rb} K _{máx}	$\Delta H_0 + H_1$ H _{ra} + $\Delta H_0 + H_1$ H _{rb} + $\Delta H_0 + H_1$ H _{rmáx} + $\Delta H_0 + H_1$	$H_{ra} + \Delta H_0 + H_1 = K_{ra} \cdot U_a$ (43)
N _{1c}	F ₃ F ₄ F ₁ F ₂	Luego que F ₃ entre en operación	U _{máx} U _a U _b U _{mín}	cero K _{r0} K _{ra} K _{rb}	cero H _{ra} H _{rb} H _{rmáx}	$H_{rb} = k_{ra} \cdot U_b$ (44) $\frac{H_{ra} + \Delta H_0 + H_1}{U_a} = \frac{H_{rb}}{U_b} \Rightarrow H_{rb} = (\Delta H_0 + H_1 + H_{ra}) \frac{U_b}{U_a}$ (45)
N _{2c}	F ₃ F ₄ F ₁ F ₂	antes del lavado de F ₂	U _{máx} U _a U _b U _{mín}	K _{r0} K _{ra} K _{rb} K _{máx}	$\Delta H_0 + H_1$ H _{ra} + $\Delta H_0 + H_1$ H _{rb} + $\Delta H_0 + H_1$ H _{rmáx} + $\Delta H_0 + H_1$	$H_{rb} + \Delta H_0 + H_1 = k_{rb} \cdot U_b$ (46)
N _{1c}	F ₂ F ₃ F ₄ F ₁	Luego que F ₂ entre en operación	U _{máx} U _a U _b U _{mín}	cero K _{r0} K _{ra} K _{rb}	Cero H _{ra} H _{rb} H _{rmáx}	$H_{rmáx} = k_{rb} \cdot U_{mín}$ (47) $\frac{H_{rb} + \Delta H_0 + H_1}{U_b} = \frac{H_{rmáx}}{U_{mín}} \Rightarrow H_{rmáx} = (H_{rb} + \Delta H_0 + H_1) \frac{U_{mín}}{U_b}$ (48)
N _{2c}	F ₂ F ₃ F ₄ F ₁	antes del lavado de F ₁	U _{máx} U _a U _b U _{mín}	K _{r0} K _{ra} K _{rb} K _{máx}	$\Delta H_0 + H_1$ H _{ra} + $\Delta H_0 + H_1$ H _{rb} + $\Delta H_0 + H_1$ H _{rmáx} + $\Delta H_0 + H_1$	$H_{rmáx} + \Delta H_0 + H_1 = k_{trax} \cdot U_{mín}$ (49)

Tabla 3. Velocidades de filtración, pérdidas de carga, coeficientes de resistividad y ecuaciones del modelo de Machado y Di Bernardo (1996) – filtro F₁

Los autores denominaron esa elevación de nivel N_{1c} como ΔH_0 y a la diferencia de $(N_{2c} - N_{1c})$ como H_1 . En la **Figura 23** se muestra la variación típica de las pérdidas de carga y de los niveles de operación en función de las velocidades de filtración de un sistema de filtración directa con velocidad declinante variable y con capacidad sustancial de almacenamiento en agua aguas arriba de los filtros.

Los autores admitieron un nivel N_{1c} teórico, correspondiente al nivel establecido por la velocidad de filtración máxima ($U_{m\acute{a}x}$) obtenida con el modelo de Di Bernardo (1985, 1986), la cual se alcanzaría en un tiempo relativamente rápido, como en los sistemas sin almacenamiento adicional en agua aguas arriba de los filtros.

El valor del coeficiente de resistividad debido a la retención de impurezas, se supuso constante durante este período de transición. En la **Tabla 3** se presentan las ecuaciones correspondientes a la modelación propuesta por los autores. Se recomienda seguir la **Figura 23** para acompañar las ecuaciones presentadas en la **Tabla 3**.

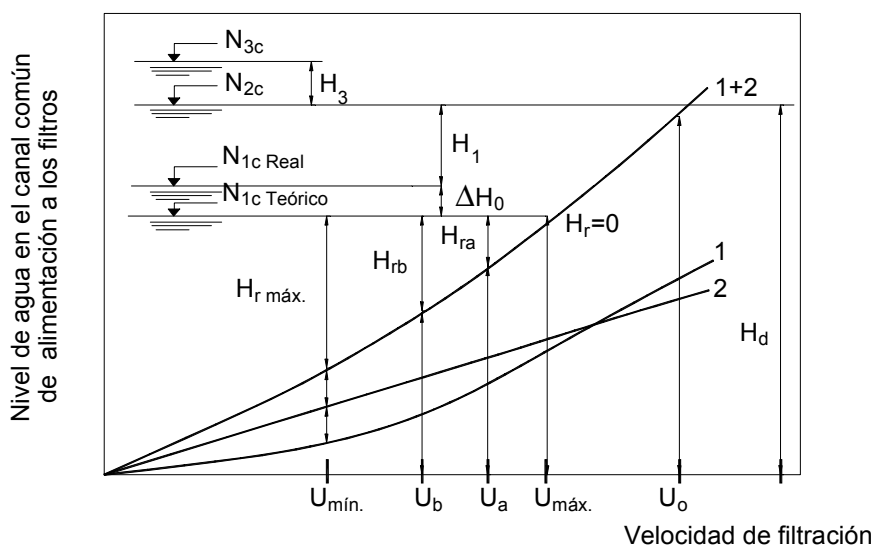


Figura 23. Pérdida de carga y niveles de operación en función de la velocidad de filtración – sistema de filtración con velocidad declinante y capacidad adicional de almacenamiento de agua aguas arriba de los filtros (Machado y Di Bernardo, 1996)

Fijando la carga hidráulica disponible, H_d , se tiene el nivel N_{2c} , y es posible iniciar el cálculo que permite determinar las velocidades de filtración y las pérdidas de carga involucradas, siguiendo los mismos pasos del modelo de Di Bernardo (1985, 1986) desarrollados anteriormente. Reescribiendo la ecuación 17, para la situación con almacenamiento, se obtiene:

$$H_d - (\Delta H_0 + H_1) = k_{r0} U_{m\acute{a}x} + k_t (U_{m\acute{a}x})^y \quad (50)$$

El valor de ΔH_0 fue calculado por Machado y Di Bernardo (1996) para 4 y 6 filtros en una batería de filtros con velocidad declinante, con velocidades medias de filtración de 300 y

405 m/d y diferentes capacidades de almacenamiento de agua aguas arriba de los filtros. El afluente de la instalación era agua decantada de la planta convencional que trataba agua cruda proveniente de una fuente superficial, coagulada con sulfato de aluminio.

- 4 filtros en la batería

$$\Delta H_{0(4)} = 1,94 \cdot 10^{-2} \cdot A_T^{0,558} \quad (51)$$

- 6 filtros en la batería

$$\Delta H_{0(6)} = 2,529 \cdot 10^{-2} \cdot A_T^{0,364} \quad (52)$$

En las ecuaciones 51 y 52, A_T representa el área de almacenamiento aguas arriba de los filtros, [obtenida por la suma: área de los filtros + área del canal + área de floculación (en el caso de filtración directa descendente)] dividida por el área de 1 filtro resultando el valor de ΔH_0 en metros.

Como ΔH_0 representa la pérdida de carga debida a la retención de impurezas que se produce en el período de transición (disminución del nivel de agua de N_{c3} a N_{1c}), su valor depende por lo tanto de la capacidad de almacenamiento del agua aguas arriba de los filtros, de la velocidad media de filtración y evidentemente de la calidad del agua a ser filtrada, de forma que es necesario operar un filtro piloto para obtener el valor de ΔH_0 para cada caso.

Si ΔH_0 fuese conocido, se obtiene, utilizando la ecuación 50, el valor de H_1 y, con la ecuación 40, el valor de K_{r0} . Utilizando la ecuación 41, se relaciona H_{ra} con U_a . La ecuación 50 aplicada para la velocidad de filtración U_a produce otra ecuación que relaciona H_{ra} con U_a , o sea:

$$H_d - (\Delta H_0 + H_1) - H_a = k_{r0} U_a + k_t (U_a)^y \quad (53)$$

Por lo tanto se determinan los valores de U_a y de H_a y, adoptando el procedimiento utilizado para el caso del modelo de Di Bernardo (1985, 1986), se determinan todas las velocidades de filtración y las variaciones de nivel de agua durante la filtración.

Si $(U_{m\acute{a}x} + U_a + U_b + U_{m\acute{i}n})$ resulta igual a $4 U_{med}$ (en el caso de 4 filtros), el valor de $U_{m\acute{a}x}$ asumido inicialmente estaba correcto. En caso contrario, otro valor de $U_{m\acute{a}x}$ debe suponerse y así sucesivamente hasta que se obtenga igualdad, lo cual debe realizarse por medio de cálculo electrónico.

Para la determinación del nivel N_{3c} y de las velocidades de filtración en los filtros restantes en operación al final del lavado de un filtro, Machado y Di Bernardo (1996) consideraron al contrario del modelo de Di Bernardo (1985, 1986), que la suma de los caudales efluentes no se iguala al caudal afluente cuando existe almacenamiento adicional aguas arriba de los filtros.

Los datos experimentales obtenidos por los autores comprobaron que, sin capacidad adicional de almacenamiento aguas arriba de los filtros, el caudal total efluente es prácticamente igual al caudal afluente al final del lavado de un filtro de la batería, para una duración de lavado de 20 minutos.

Cuando existe almacenamiento adicional aguas arriba de los filtros, el intervalo de tiempo para que se produzca esta igualdad de los caudales es superior, siendo mayor cuanto mayor es el almacenamiento adicional y generalmente superior al tiempo cuando un filtro permanece fuera de operación. Evidentemente otros factores, tales cuando el filtro a ser lavado permanece fuera de operación y el número de filtros en la batería también interfieren en aquel intervalo de tiempo mencionado.

Suponiendo que los coeficientes de resistividad en los filtros restantes permanezcan constantes durante el lavado del filtro más sucio de la batería, se obtienen las ecuaciones presentadas en la **Tabla 4** para una batería de 4 filtros.

Nivel de Agua en el Canal Común de Alimentación	Condición	Ecuación
N_{2c}	Antes que F4 sea retirado de operación para lavado	$k_t(U_{m\acute{a}x})^y + (k_{r0} + k_0)U_{m\acute{a}x} = H_d$ (54)
		$k_t(U_a)^y + (k_{ra} + k_0)U_a = H_d$ (55)
		$k_t(U_b)^y + (k_{rb} + k_0)U_b = H_d$ (56)
		$k_t(U_{min})^y + (k_{rm\acute{a}x} + k_0)U_{min} = H_d$ (57)
		$U_{m\acute{a}x} + U_a + U_b + U_{min} = U_{med}$ (58)
N_{3c}	Caudal afluente Diferente del caudal total efluente	$k_t(U_{m\acute{a}x}^*)^y + (k_0 + k_{r0})U_{m\acute{a}x}^* = H_d + H_3$ (59)
		$k_t(U_a^*)^y + (k_0 + k_{ra})U_a^* = H_d + H_3$ (60)
		$k_t(U_b^*)^y + (k_0 + k_{rb})U_b^* = H_d + H_3$ (61)
		$U_{m\acute{a}x}^* + U_a^* + U_b^* = 4U_{med} - \frac{dH}{dt} \frac{Aa}{A}$ (62)
		$U_{med}^* = 4/3 \cdot U_{med}$ (63)
		$U_{med\ alm}^* = \alpha \cdot U_{med}^*$ (64)
		$U_{m\acute{a}x}^* + U_a^* + U_b^* = 3U_{med\ alm}^*$ (65)

Observación: $\alpha \leq 1$

Tabla 4. Ecuaciones para determinar el nivel N_3 y de las velocidades de filtración en los filtros restantes durante el lavado de un filtro de la batería (Machado y Di Bernardo, 1996)

En la **Tabla 4** se adoptó la siguiente nomenclatura:

U_{max}^* , U_a^* y U_b^* : velocidades de filtración que se producen en los filtros restantes al final del lavado de un filtro (m/día).

$U_{med\ alm}^*$: velocidad media de filtración durante el final del lavado con almacenamiento adicional de agua aguas arriba de los filtros (m/día).

U_{med}^* : velocidad media de filtración al final del lavado sin almacenamiento adicional aguas arriba de los filtros (caudal afluente igual al caudal total efluente) (m/día).

U_{med} : velocidad media de filtración con todos los filtros en operación (m/día).

ΔH_0 : variación del nivel de agua observada al final del lavado, igual a $[N_{3c} - N_{2c}]$ (m).

Δt : duración del lavado (día).

H_3 : diferencia de nivel entre N_{3c} y N_{2c} (m).

A_a : área adicional de almacenamiento aguas arriba de los filtros (m^2).

A : área de un filtro de la batería (m^2).

α : coeficiente (determinado experimentalmente).

El coeficiente α , que relaciona las velocidades medias de filtración al final del lavado de un filtro, con y sin almacenamiento adicional aguas arriba de la batería de filtros, fue determinado por Machado y Di Bernardo (1996) para una velocidad media de filtración de $300 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$, con 4 y 6 filtros en la batería y duración de lavado igual a 20 minutos. Las ecuaciones obtenidas por los autores para expresar las velocidades de filtración en el final del lavado en función del almacenamiento para 4 filtros y la generalizada a partir de los datos experimentales, son:

- para 4 filtros en la batería

$$U_{med,alm4F}^* = 1,0159 (AT - N)^{-0,0508} \frac{4U_{med}}{3} \quad (\text{para 4 filtros}) \quad (66)$$

$$\alpha = 1,0159 (AT - N)^{-0,0508} \quad (\text{para 4 filtros}) \quad (67)$$

En las ecuaciones 66, 67 y 68, AT representa el área total de almacenamiento aguas arriba de los filtros, incluyendo canales, floculadores, los propios filtros, etc. y se expresa como el número de veces del área de 1 filtro incluyendo, canales floculadores y los propios filtros, etc. y se expresa como N (número de veces del área de un filtro). Es importante resaltar que el cálculo de α a partir de la ecuación generalizada para un número cualquiera de filtros, puede resultar un valor mayor que 1, razón por la cual este parámetro es adoptado igual a 1 siempre que esto suceda, es decir, $\alpha \leq 1$. A partir de las ecuaciones 66 y 67, el modelo propuesto por Machado y Di Bernardo (1996) se generalizó para el cálculo de la velocidad media al final del lavado de un filtro, considerando el almacenamiento adicional aguas arriba de los filtros, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$U_{med,almNF}^* = \frac{U_{med,alm}^* (l+3)}{(AT - N)^{-0,0116}} \frac{(l+4)(l+2)}{(l+3)^2} \quad [\text{para } l \text{ variando de } 1 \text{ a } (N - 4)] \quad (68)$$

La generalización del modelo global propuesto por Machado y Di Bernardo (1996), se presenta en las ecuaciones siguientes, para cualquier número de filtros en el sistema.

Parámetros conocidos: K_t , K_{r0} , y , H_d , U_{med} , y N

El valor de ΔH_0 puede ser obtenido a partir de las ecuaciones propuestas por Machado y Di Bernardo (1996), correspondiente a 4 filtros y la generalizada, reproducidas a continuación, pero hay que considerar que sería deseable su obtención experimental, pues estos autores trabajan con agua decantada y con un medio filtrante de antracita y arena. Se considera, que el valor de ΔH_0 también sea conocido.

Durante la filtración

$$H_{04F} = 1,759 \cdot 10^{-2} A_T^{0,5677} \quad \text{para 4 filtros en la batería} \quad (69)$$

$$H_{ON} = \frac{1,0182 \Delta H_{0(N-1)}}{A_T^{0,097}} \quad \text{para } N > 4 \quad (70)$$

$$U_{m\acute{a}x} = F U_0 \quad (71)$$

(F entre 0,7 y 0,9)

$$K_{r0} = \frac{(\Delta H_0 + H_1) + H_i}{2 U_{m\acute{a}x}} \quad \text{para } i = 0 \quad (72)$$

$$H_d = (\Delta H_0 + H_1) + H_i + K_{r0} U_i + k_t (U_i)^y \quad \text{para: } 1 \leq i \leq (N - 1) \quad (73)$$

$$H_i = K_{r(i-1)} U_i \quad (74)$$

$$K_{ri} = \frac{(\Delta H_0 + H_1) + H_i}{U_i} \quad \text{para } i \neq 0 \quad (75)$$

$$\sum_{i=1}^N U_i = N U_{med} \quad (76)$$

Durante el lavado

$$H_d = K_{ri} U_i + K_{ro} U_i + k_t (U_i)^y \quad \text{para: } 1 \leq i \leq N \quad (77)$$

$$\sum_{i=1}^N U_i = N U_{med} \quad (78)$$

$$H_d + H_3 = K_{ri} U_i^* + K_{ro} U_i^* + k_t (U_i^*)^y \quad \text{para: } 1 \leq i \leq (N - 1) \quad (79)$$

$$\sum_{i=1}^{N-1} U_i^* = N U_{med} - \frac{dH}{dt} \frac{A_a}{A} \quad (80)$$

$$U_{med}^* = \frac{N U_{med}}{N - 1} \quad (81)$$

$$U_{medalm4F}^* = 1,003 A_a^{-0,0465} U_{med}^* \quad \text{para } N = 4 \quad (82)$$

$$U_{medalmNF}^* = 1,004 \frac{U_{medalm(N-1)F}^*}{A_a^{-0,0083}} \frac{N(N-1)}{(n-1)^2} \quad \text{para } N > 4 \quad (83)$$

De acuerdo a lo mencionado anteriormente se recomienda la determinación experimental de ΔH_0 , habiendo los autores sugerido la siguiente metodología, cuando se dispone de agua decantada, agua coagulada o floculada, en el caso de plantas de tratamiento de agua existentes. Tratándose de plantas nuevas la instalación deberá contar con unidades semejantes a aquéllas previstas en el modelo con almacenamiento.

- Establecer las ecuaciones de pérdida de carga turbulenta y laminar (manto filtrante limpio).
- Fijar la carga hidráulica disponible y calcular $U_{m\acute{a}x}$, utilizando el modelo de Di Bernardo.
- Calcular el valor de x (disminución rápida del nivel de agua debido a la colocación de un filtro recién lavado en operación), en base al esquema de la **Figura 11** y suponiendo el nivel N_{3c} igual al resultante del uso del modelo de Di Bernardo, multiplicado por la relación A_{NF}/A_T (A_{NF} : área de los filtros; A_T : área total igual a $A_a + A_{NF}$).
- Montar 1 filtro piloto interconectado a un tanque con área superficial igual a la suma de las siguientes áreas: A_a (adicional prevista aguas arriba, función del área de 1 filtro, A) y A_{N-1} [igual a $(N-1) A$].
- Iniciar la operación del filtro piloto con $U_{m\acute{a}x}$ y el nivel de agua en la tubería de alimentación al filtro (interconectado al tanque de almacenamiento) igual al nivel $[(A_{NF}/A_T) N_{3c} - x]$ estimado anteriormente y medir el nivel de agua hasta que resulte constante; la diferencia entre los dos niveles de agua será aproximadamente igual al valor de ΔH_0 .

En la **Figura 24** se muestra el esquema de instalación piloto, en el cual Machado y Di Bernardo (1996) estudiaron el efecto del almacenamiento de agua aguas arriba de los filtros, en las velocidades de filtración y en las variaciones de los niveles de agua.

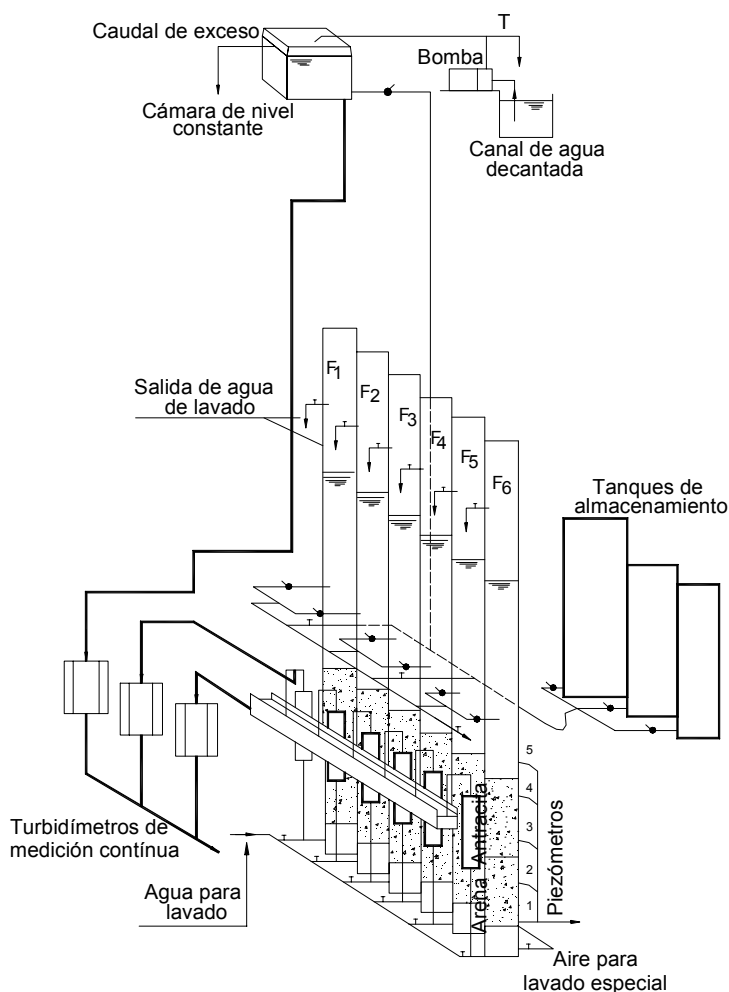


Figura 24. Esquema de la instalación piloto de filtración con velocidad declinante variable con almacenamiento adicional de agua aguas arriba de los filtros (Machado y Di Bernardo, 1996)

En la **Tabla 5** se presenta un resumen de los resultados de operación de la instalación piloto operando en las siguientes condiciones: $N = 4$, $H_d = 1,25$ m, $U_{med} = 300$ m/d. Los resultados obtenidos para las demás condiciones de operación se presentan en la **Tabla 5**.

En las Figuras que siguen se presentan los resultados de operación de la instalación piloto. En esas figuras, los índices e y p significan respectivamente, experimental y previsto por el modelo de Machado y Di Bernardo.

Capacidad Adicional de Almacenamiento Aguas Arriba de los Filtros - CAAMF	Tiempo para que el nivel de agua baje de N _{3c} a N _{1c} (min)	Velocidad de Filtración entre sucesivos lavados (m ³ /m ² d)				Velocidades de Filtración al final del lavado de 1 filtro (m ³ /m ² d)				N _{3c} (cm)	N _{1c} (cm)	N _{2c} - N _{1c} (cm)	N _{3c} - N _{2c} (cm)	N _{3c} – N _{1c} (cm)
		U _{máx}	U _a	U _b	U _{min}	U _{máx} [*]	U _a [*]	U _b [*]	U _{med} [*]					
Sin capacidad adicional de almacenamiento	25	405	326	262	209	476	394	326	399	152,7	98,3	26,7	27,7	54,4
Experimental		413	327	258	202	494	394	311	400	152,9	100,2	24,8	27,9	52,7
Modelo de Di Bernardo														
Capacidad adicional de almacenamiento = 4 A	45	402	328	264	208	446	378	306	376	147,4	102,2	22,8	22,4	44,8
Experimental		413	327	258	202	469	373	294	378	147,2	102,1	22,9	22,2	45,1
Modelo de Machado y Di Bernardo														
Capacidad adicional de almacenamiento = 12 A	75	405	329	261	207	435	353	285	358	139,5	103,3	21,7	14,5	36,2
Experimental		413	327	258	202	444	353	278	358	139,5	104,8	20,2	14,5	34,7
Modelo de Machado y Di Bernardo														
Capacidad adicional de almacenamiento = 20 A	95	402	328	261	207	421	346	276	348	135,7	106,0	19,0	10,7	29,7
Experimental		413	327	258	202	432	344	271	349	135,6	107,0	18,0	10,6	28,6
Modelo de Machado y Di Bernardo														
Capacidad adicional de almacenamiento = 28 A	110	405	327	259	208	419	340	274	344	133,4	107,1	17,9	8,4	26,3
Experimental		413	327	258	202	426	338	266	343	133,4	108,9	16,1	8,4	24,5
Modelo de Machado y Di Bernardo														

Observación : tiempo de lavado de 20 min.

Tabla 5. Resumen de los resultados de operación en la instalación piloto (Machado y Di Bernardo, 1996)

($N = 4$, $U_{med} = 300 m^3/m^2d$, $H_d = 1,25 m$)

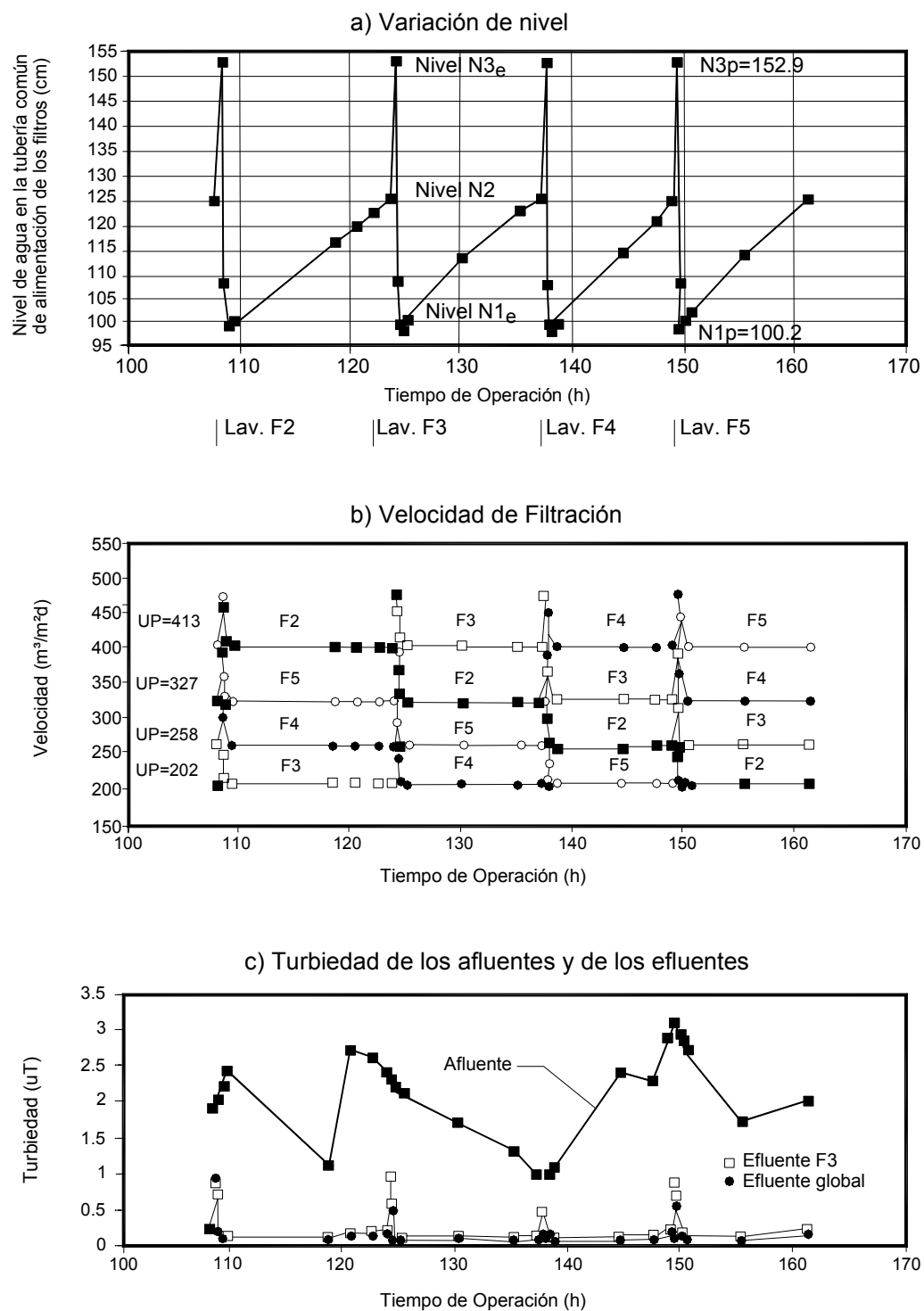


Figura 25. Variación del nivel de agua, velocidades de filtración y turbiedad del afluente y de los efluentes global y del filtro F₃ (N = 4; $U_{\text{med}} = 300 \text{ m/d}$; $H_d = 1,25 \text{ m}$; sin capacidad adicional de almacenamiento aguas arriba de los filtros) (Machado y Di Bernardo, 1996)

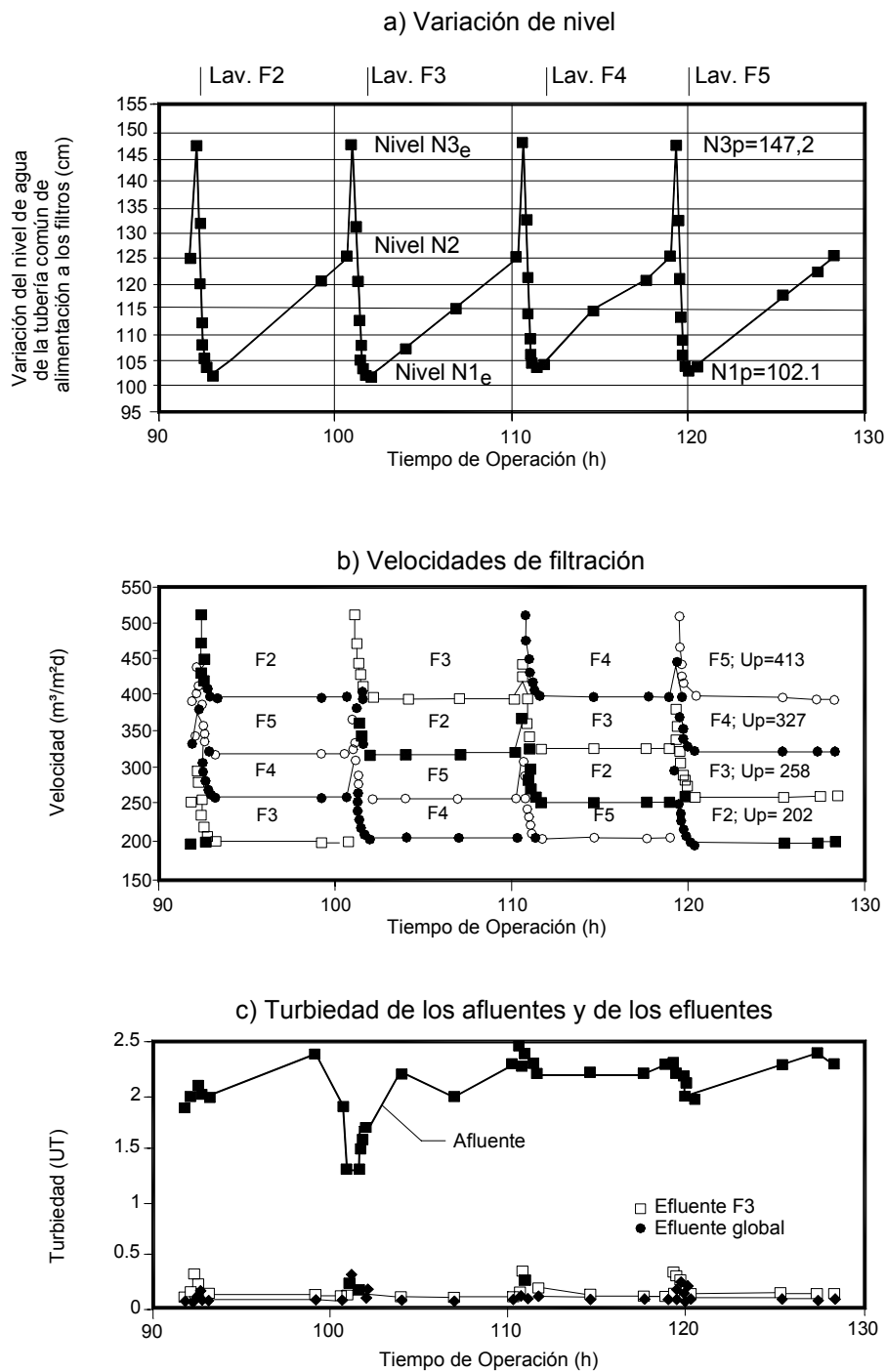


Figura 26. Variación del nivel de agua, velocidades de filtración y turbiedad del afluente y de los efluentes global y del filtro F_3 ($N = 4$; $U_{med} = 300 \text{ m/d}$; $H_d = 1,25 \text{ m}$; capacidad adicional de almacenamiento aguas arriba de los filtros = 4 A) (Machado y Di Bernardo, 1996)

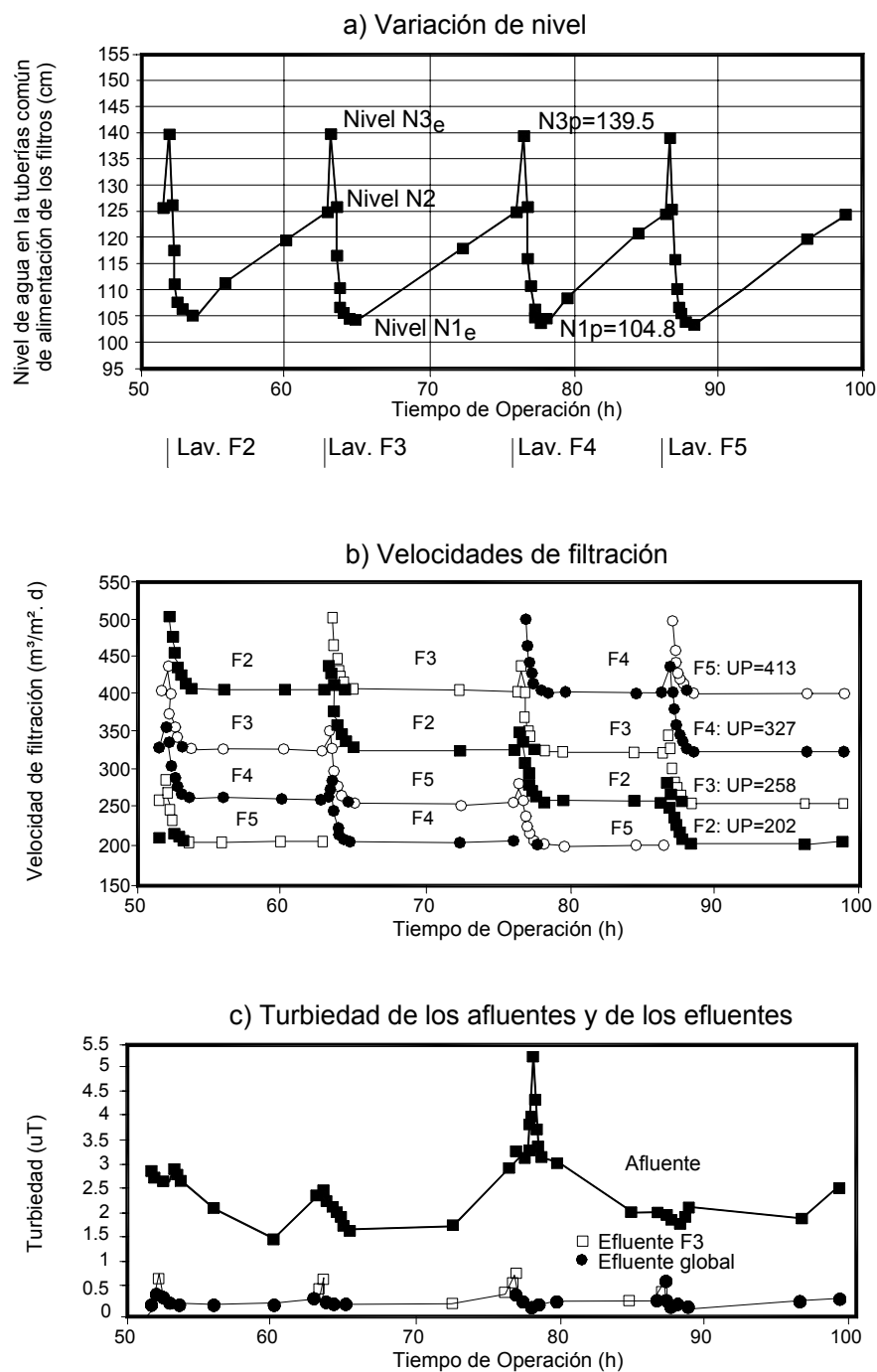


Figura 27. Variación del nivel de agua, velocidades de filtración y turbiedad del afluente y de los efluentes global y del filtro F_3 ($N = 4$; $U_{med} = 300 \text{ m/d}$; $H_d = 1,25 \text{ m}$; capacidad adicional de almacenamiento de agua aguas arriba de los filtros = 12 A) (Machado y Di Bernardo, 1996)

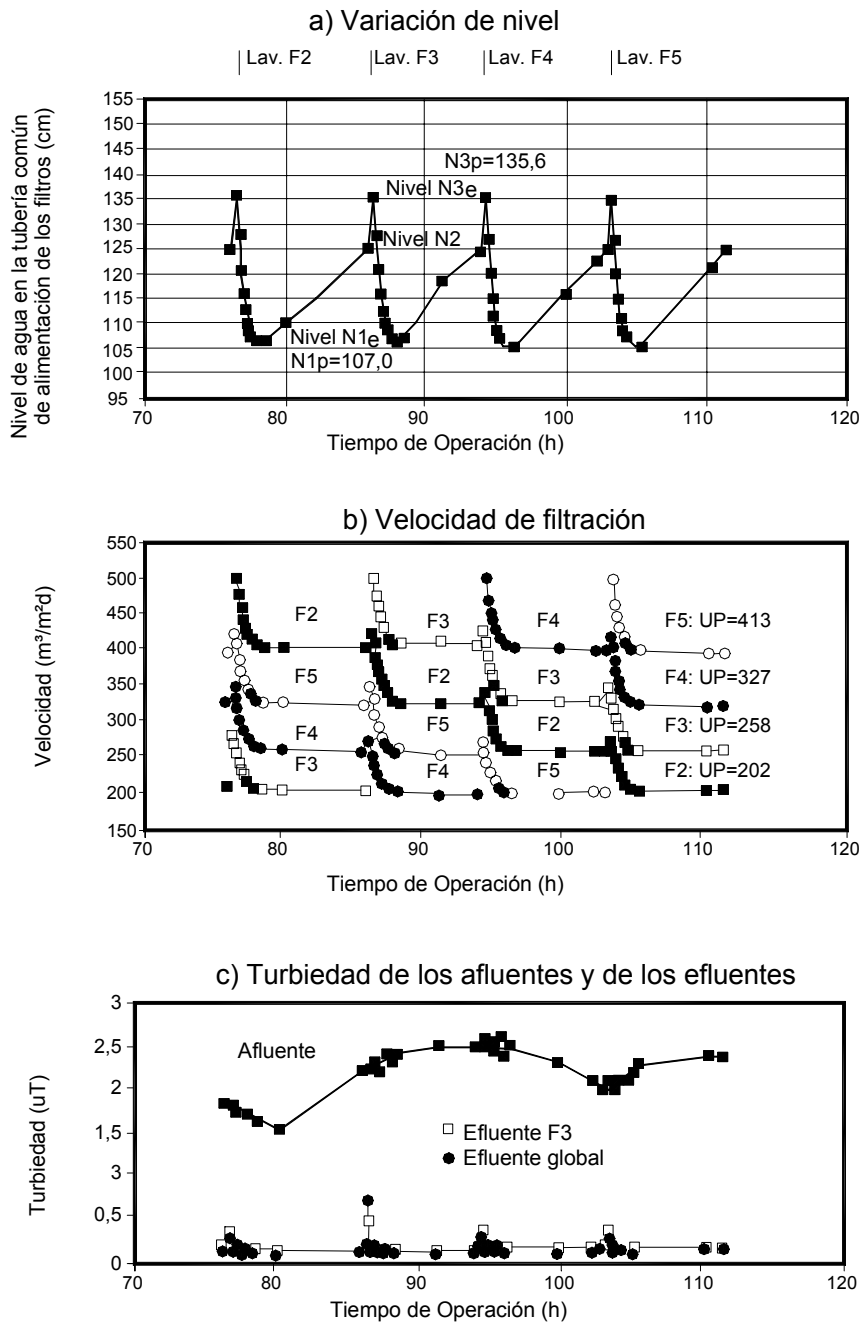


Figura 28. Variación del nivel de agua, velocidades de filtración y turbiedad del afluente y de los efluentes global y del filtro F_3 ($N = 4$; $U_{\text{med}} = 300 \text{ m/d}$; $H_d = 1,25 \text{ m}$; capacidad adicional de almacenamiento aguas arriba de los filtros = 20 A) (Machado y Di Bernardo, 1996)

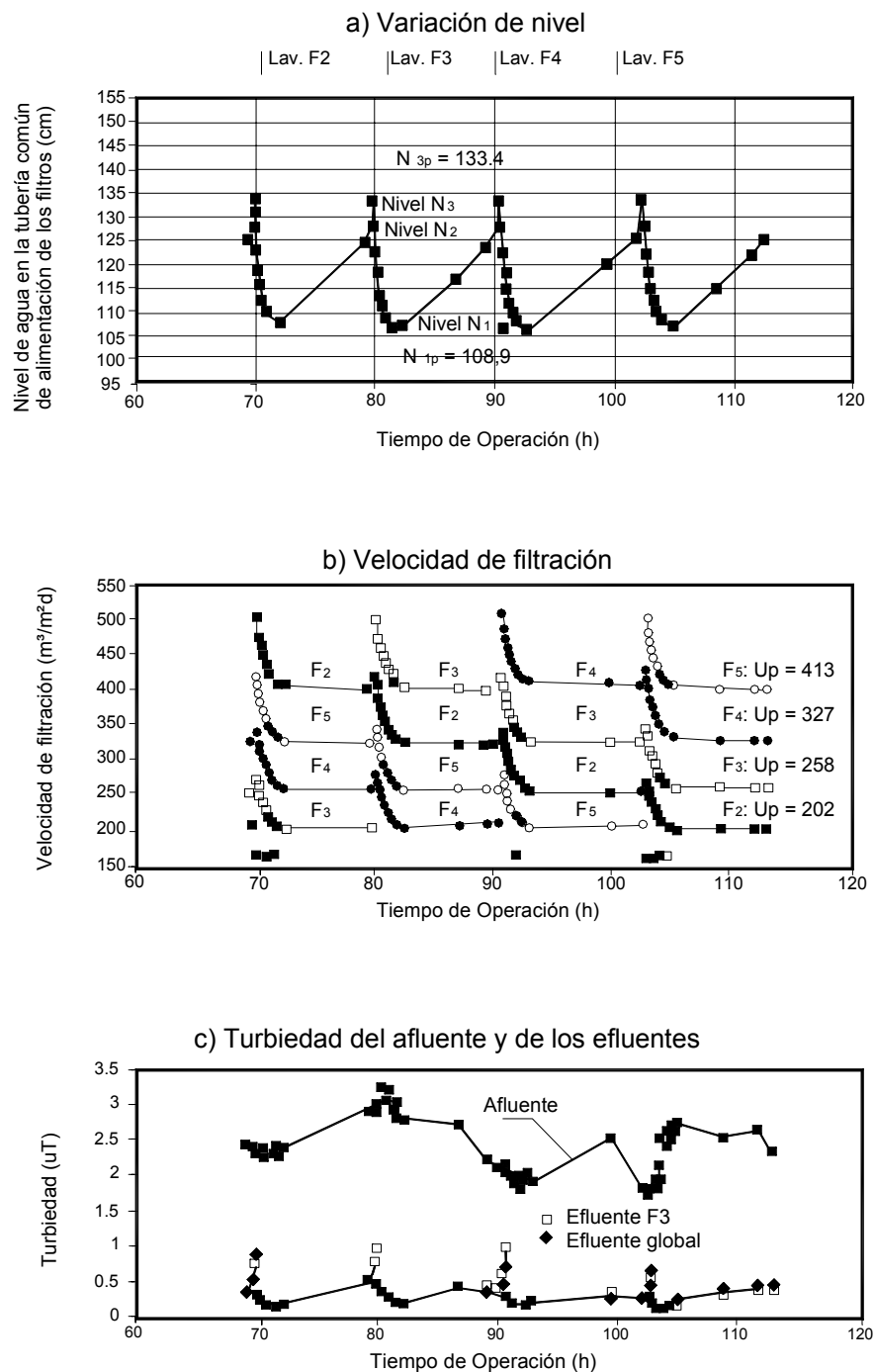


Figura 29. Variación del nivel de agua, velocidades de filtración y turbiedad del afluente y de los efluentes global y del filtro F₃ para N = 4; $U_{med} = 300 \text{ m/d}$; $H_d = 1,25 \text{ m}$; capacidad adicional de almacenamiento aguas arriba de los filtros = 28 A (Machado y Di Bernardo, 1996)

En la **Figura 30** se muestran las variaciones de los niveles de agua y de las velocidades de filtración en una batería operada con $N = 4$, $H_d = 1,25$ m y $U_{med} = 300$ m/d, sin y con almacenamiento adicional de agua aguas arriba de los filtros (28 A), en la cual se observa la gran influencia que ejerce la capacidad adicional de almacenamiento aguas arriba de los filtros en esos parámetros de operación de los filtros.

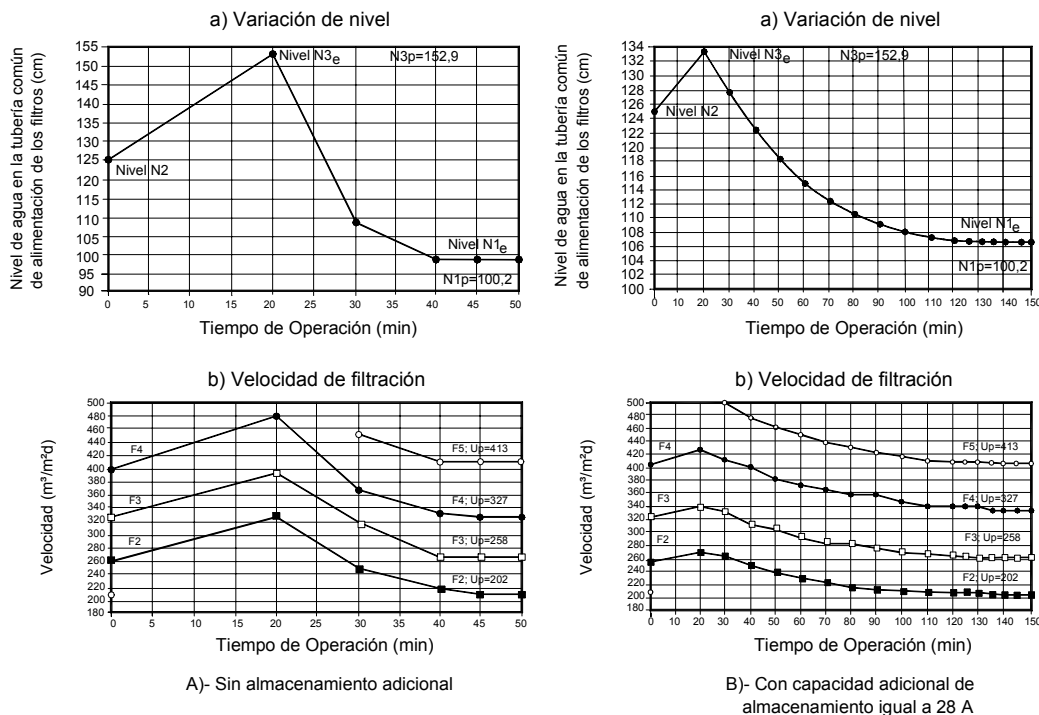


Figura 30. Variación de los niveles de agua y de las velocidades de filtración en una instalación de filtración con velocidad declinante variable sin y con almacenamiento adicional aguas arriba de los filtros (28A) para $N=4$; $H_d=1,25$ m; $U_{med}=300$ m/d (Machado y Di Bernardo, 1996)

Las principales conclusiones del trabajo de Machado y Di Bernardo (1996) son las siguientes:

- Las velocidades de filtración resultaron similares a las observadas en plantas prototipos con sistemas de filtración con velocidad declinante, con el filtro recién lavado trabajando con la máxima velocidad y el más sucio con la mínima.
- Las velocidades de filtración y las variaciones del nivel de agua resultaron muy próximas a los valores previstos por el modelo de Di Bernardo (1985, 1986) sin capacidad adicional de almacenamiento aguas arriba de los filtros.
- Durante el período de tiempo cuando el nivel de agua desciende de N_{3c} a N_{1c} las velocidades de filtración disminuyen exponencialmente hasta que la suma de las velocidades de filtración igualan N veces la velocidad media, permaneciendo prácticamente constantes luego de alcanzada esa condición.

- Las velocidades de filtración entre lavados sucesivos no fueron afectadas por la capacidad de almacenamiento aguas arriba de los filtros. O sea las velocidades de filtración en el nivel N_{1c} resultaron prácticamente las mismas y permanecieron constantes hasta que el nivel N_{2c} fue alcanzado, independientemente de la capacidad adicional de almacenamiento aguas arriba de los filtros.
- Cuanto mayor fue la capacidad adicional de almacenamiento de agua aguas arriba de los filtros, más prolongado resultó el tiempo para que el nivel de agua disminuya de N_{3c} a N_{1c} .
- El nivel N_{3c} disminuyó y el nivel N_{1c} aumentó con el aumento de la capacidad adicional de almacenamiento aguas arriba de los filtros.
- El nivel N_{1c} fue modificado sólo por el hecho de que el filtro recién lavado retiene impurezas durante el tiempo cuando el nivel de agua disminuye de N_{3c} a N_{1c} y cuanto mayor es la capacidad adicional de almacenamiento aguas arriba de los filtros más prolongado fue ese tiempo (y se retuvo mayor cantidad de partículas) y más elevado el nivel N_{1c} .
- Cuanto mayor es la capacidad adicional de almacenamiento aguas arriba de los filtros, menor resultó el pico de turbiedad en el efluente global y en un filtro de la batería.

d) Previsión de la duración de la carrera de filtración

Siempre que sea posible, el proyecto del sistema de filtración de una planta de tratamiento de agua se debe basar en estudios realizados en una instalación piloto. En el caso de la filtración con velocidad declinante, la ejecución de una instalación piloto con un número relativamente grande de filtros puede ser inviable. En razón de ello, Di Bernardo y Teixeira (1991) desarrollaron una metodología basada en la operación de un único filtro piloto con velocidad constante, igual a la máxima velocidad de filtración prevista por la modelación matemática, que permite prever la duración de la carrera de filtración de un sistema con cualquier número de filtros.

Si se utilizan más filtros pilotos en paralelo, se puede estudiar el efecto de la carga hidráulica disponible, del medio filtrante, de la velocidad media de filtración, etc. El proyectista elaborará un anteproyecto de los filtros para que se determinen sus características hidráulicas, las cuales deberán ser las mismas que las de los filtros pilotos. A continuación se describen los pasos a realizar para prever la duración de la carrera de filtración:

- Predimensionar el sistema de filtración de la planta de tratamiento en escala real, calcular las pérdidas de carga en el medio filtrante limpio, capa soporte, sistema de drenaje, cañerías, compuertas, accesorios, etc., obteniéndose las ecuaciones de pérdida de carga laminar (medio filtrante limpio) y turbulenta.
- Aplicar el modelo de Machado y Di Bernardo (1996) para condiciones preestablecidas, tales como la velocidad media de filtración, la carga hidráulica disponible y el número de filtros, obteniendo las velocidades de filtración y la variación de nivel ($N_{2c} - N_{1c}$).
- Construir un filtro piloto (puede ser más de uno si se estudiaran otros medios filtrantes) para funcionar con velocidad de filtración constante e igual a la máxima obtenida con el uso del modelo.

- Operar el filtro piloto midiendo la pérdida de carga debida a la retención de impurezas por medio de piezómetros y relacionarla con el tiempo de funcionamiento, tal como se muestra en la **Figura 31**.
- A partir del nivel N_{1c} determinar el valor de la variación ($N_{2c} - N_{1c}$) obtenida con el uso de la modelación matemática y obtener el intervalo de tiempo resultante ΔT .
- Multiplicar el intervalo de tiempo ΔT por el número de filtros de la batería, obteniéndose la duración de la carrera de filtración.

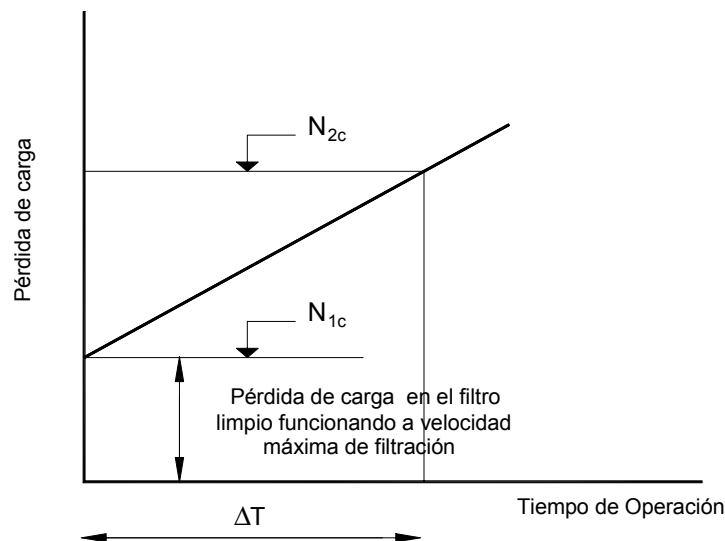


Figura 31. Variación típica de la pérdida de carga en un filtro de velocidad constante – metodología para prever la duración de la carrera de filtración (Di Bernardo y Teixeira, 1991)

Dependiendo de la duración de la carrera de filtración obtenida se puede variar el número de filtros en la batería o la carga hidráulica disponible, aplicar la modelación matemática y operar el filtro piloto para la velocidad máxima de filtración y la variación de nivel ($N_{2c} - N_{1c}$) resultantes y obtener nuevos valores de duración de la carrera de filtración.

Esa metodología se verificó experimentalmente por Teixeira (1991) operando una instalación piloto integrada por cuatro filtros con velocidad declinante y de un filtro con velocidad constante con las mismas características de los filtros del sistema con velocidad declinante.

Los ensayos con velocidad declinante se realizaron para las velocidades medias de 250, 300 e $350 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ y cargas hidráulicas de 1,2, 1,61 y 1,61 m respectivamente. En sus investigaciones, el filtro con velocidad constante fue operado en paralelo con el sistema de filtración con velocidad declinante.

La velocidad de filtración en el filtro con velocidad constante al principio fue igual a la velocidad media del sistema de filtración con velocidad declinante. Posteriormente pasó a ser igual a la velocidad máxima prevista para comprobar realmente, que no es la

velocidad media de filtración la que se debe usar en el filtro con velocidad constante como la recomendada por Cleasby y Di Bernardo (1980).

Teixeira (1991) observó que entre lavados sucesivos la velocidad máxima de filtración aumentaba en tanto que la mínima disminuía, permaneciendo prácticamente constantes las velocidades intermedias. Según el autor, ese comportamiento provenía del hecho que el manto filtrante estaba constituido únicamente por arena, con coeficiente de uniformidad igual a 1,5, causando retención sustancial de impurezas en la parte superior, de modo que luego de un cierto tiempo de operación, la curva de pérdida de carga variaba exponencialmente con el tiempo.

En la **Figura 32** se muestran las pérdidas de carga en el sistema de filtración con velocidad declinante y filtro con velocidad constante, las velocidades de filtración, previstas por el modelo de Di Bernardo (1985, 1986) y la turbiedad del afluente y efluentes del sistema de filtración con velocidad declinante y del filtro con velocidad constante obtenidas por Teixeira (1991), cuando el filtro con velocidad constante funcionó con velocidad de filtración igual a la medida de las velocidades del sistema de filtración con velocidad declinante.

El autor observó que la inclinación de las rectas correspondientes a las pérdidas de carga no son iguales cuando se tomaba como referencia el filtro F_1 del sistema de filtración con velocidad declinante, observándose el mismo comportamiento para los demás filtros del sistema de filtración con velocidad declinante. Los resultados fueron obtenidos cuando el filtro con velocidad constante funcionó en paralelo con el sistema de filtración con velocidad declinante, por lo tanto con velocidad máxima prevista por el modelo de Di Bernardo (1985, 1986), como se muestra en la **Figura 33**. La inclinación de las rectas de pérdida de carga en esa figura resultó prácticamente igual en los diferentes ciclos, obteniéndose carreras con duración de aproximadamente 41 horas para el filtro F_3 del sistema de filtración con velocidad declinante.

Los resultados obtenidos por Teixeira (1991) presentados en la **Figura 34**, muestran la variación de la pérdida de carga en el filtro con velocidad constante durante cada ciclo del sistema de filtración con velocidad declinante, operado en paralelo y con la velocidad máxima de filtración del sistema de filtración con velocidad declinante.

Para la variación de $N_{2c} - N_{1c} = 32$ cm, la duración del ciclo resultó aproximadamente igual a 10 h. Por lo tanto ese tiempo multiplicado por el número de filtros (cuatro filtros) provee 40 h, valor muy próximo al de la duración de la carrera de un filtro de sistema de filtración con velocidad declinante. Ese comportamiento también se observó para las demás velocidades medias de filtración, comprobando la metodología propuesta.

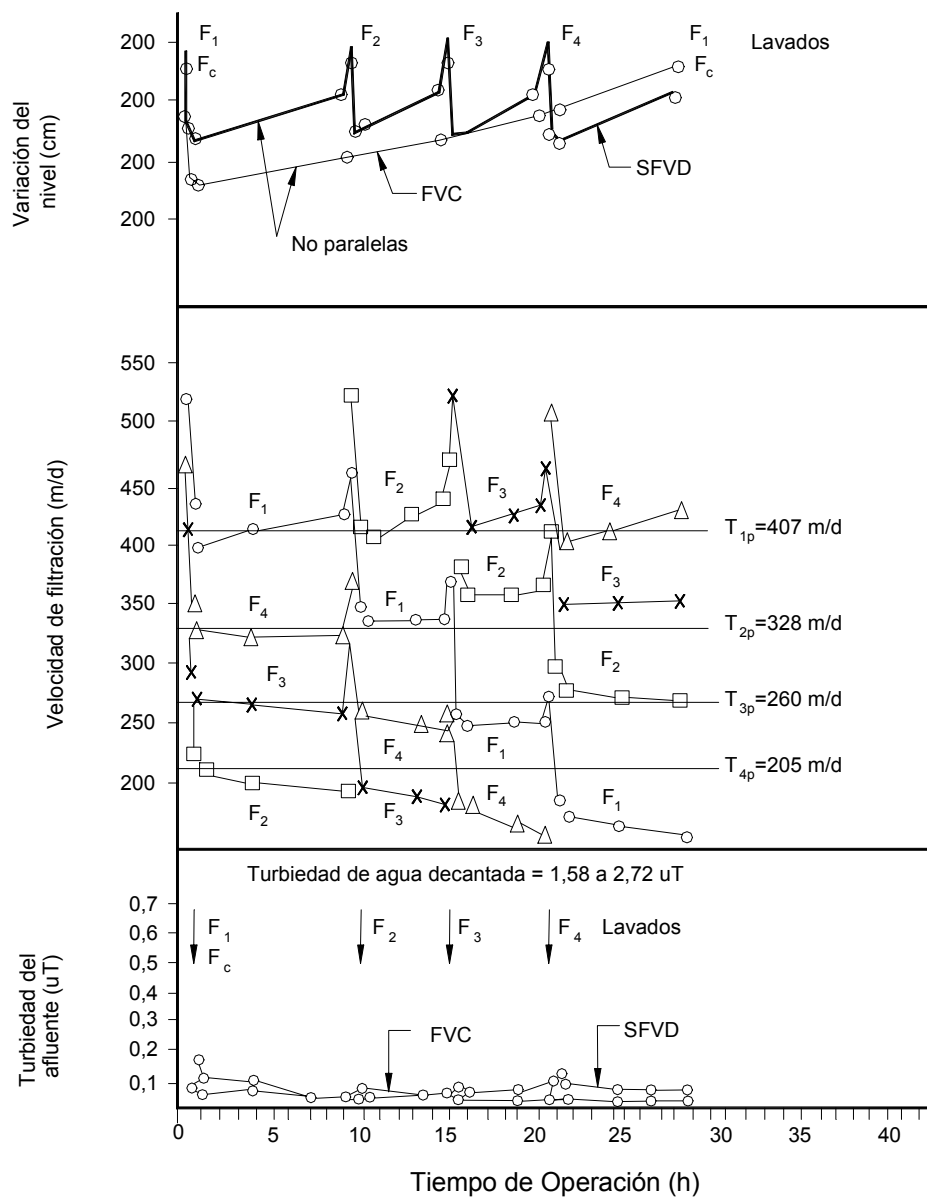


Figura 32. Comportamiento del sistema de filtración con velocidad declinante y del filtro con velocidad constante operados simultáneamente - velocidad de filtración de filtro con velocidad constante = velocidad media del sistema de filtración con velocidad declinante = 300 m/d; $H_d = 1,6$ m (Teixeira, 1991)

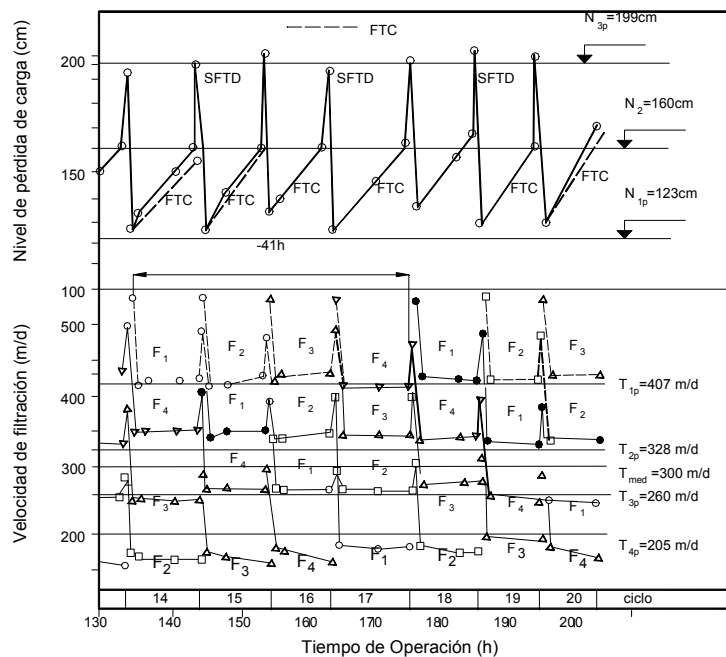


Figura 33. Comportamiento del sistema de filtración con velocidad declinante y del filtro con velocidad constante operados simultáneamente - velocidad de filtración de filtro con velocidad constante = velocidad máxima en el sistema de filtración con velocidad declinante = 407 m/d ; $H_d = 1,6\text{ m}$ (Teixeira, 1991)

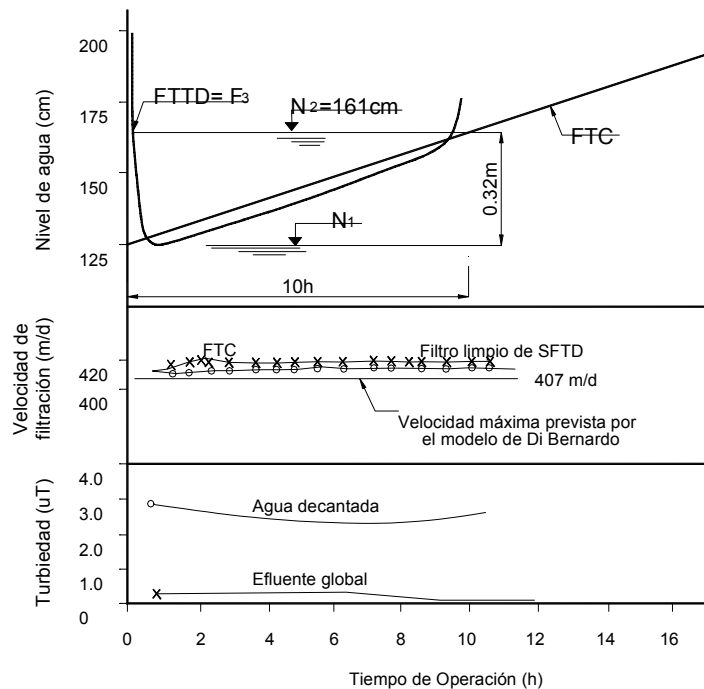


Figura 34. determinación de la duración de la carrera de filtración conforme metodología propuesta - U_{med} en el filtro con velocidad declinante variable = 300 m/d; $H_d = 1,6\text{ m}$ (Teixeira, 1991)

e) Influencia del número de filtros en el comportamiento de la filtración con velocidad declinante

El número mínimo de filtros deseable es igual a cuatro. Si el número de filtros se aumentase a seis, por ejemplo, manteniendo constantes H_d , U_{med} , N_{2c} y la ecuación general de pérdida de carga, sucede lo que se indica en la **Figura 35** donde se ve que: $U_{máx6} < U_{máx4}$, $U_{mín6} < U_{mín4}$, $(N_{2c} - N_{1c6}) < (N_{2c} - N_{1c4})$. La duración de la carrera será más prolongada en el sistema con seis filtros, pues es mayor la pérdida de carga debida a la retención de impurezas y menor la velocidad mínima de filtración.

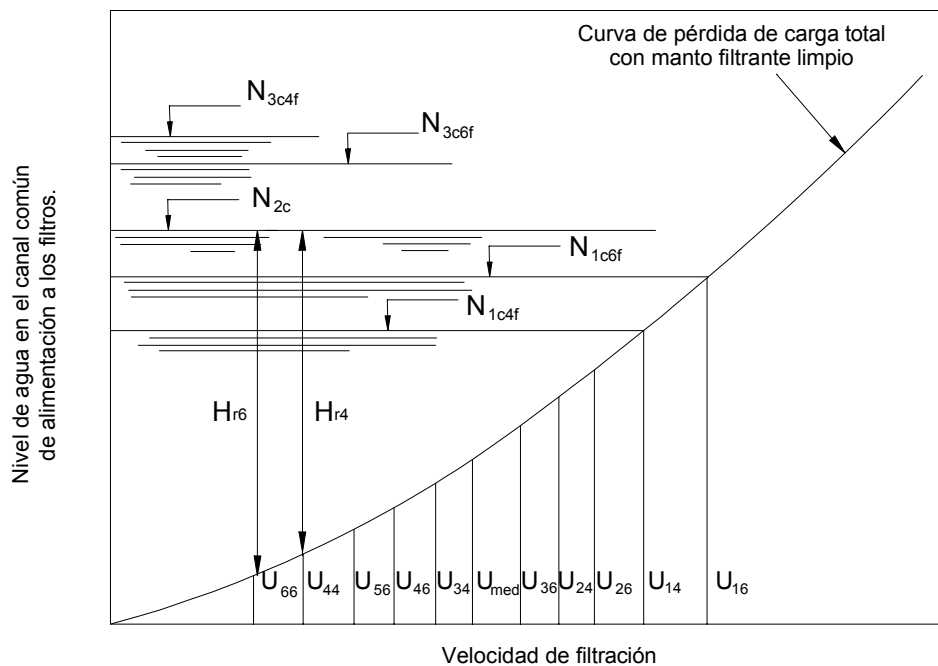


Figura 35. Niveles de agua en el canal común de alimentación de los filtros y velocidades de filtración – baterías con 4 y 6 filtros

f) Influencia de la velocidad media de filtración en el comportamiento de la filtración con velocidad declinante

Manteniendo inalterados el nivel N_{2c} , H_d , N y las curvas de pérdida de carga, ocurre lo siguiente: cuando la velocidad media de filtración aumenta de U_{meda} a U_{medb} : en la **Figura 36** se ve que con U_{medb} , hay aumento de las velocidades de filtración, disminución de $(N_{2c} - N_{1c})$, aumento de $(N_{3c} - N_{2c})$. Como $H_{rb} < H_{ra}$, la duración de la carrera de filtración disminuye.

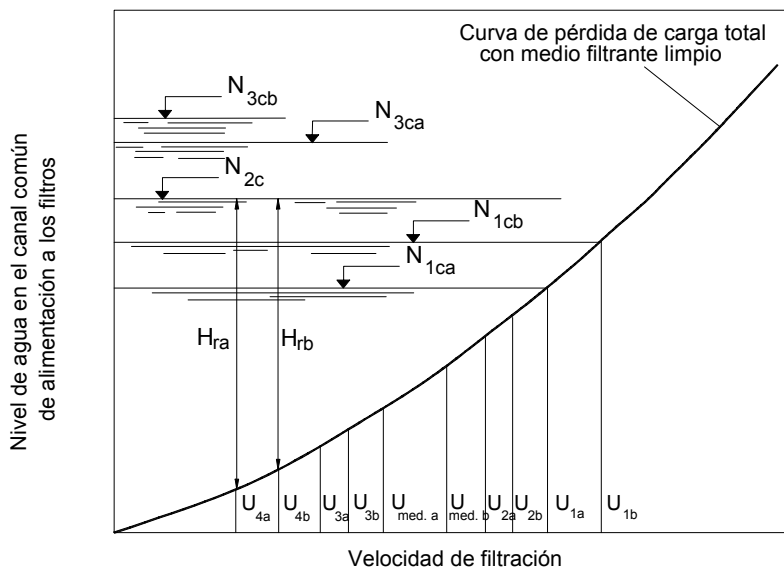


Figura 36. Niveles de agua en el canal común de alimentación de los filtros y velocidades de filtración – aumento o disminución de la velocidad media de filtración

g) Influencia de la pérdida de carga turbulenta en el comportamiento de filtros con velocidad declinante

Manteniendo constante el nivel N_{2c} , H_d , N y U_{med} , ocurre lo siguiente: si se aumenta la pérdida de carga turbulenta, conforme las curvas a y b de la **Figura 37**, se percibe que $U_{máx}$ disminuye, $U_{mín}$ aumenta, $(N_{2c} - N_{1c})$ disminuye y aumenta $(N_{3c} - N_{2c})$. Como $H_{rb} < H_{ra}$, la duración de la carrera de filtración disminuye.

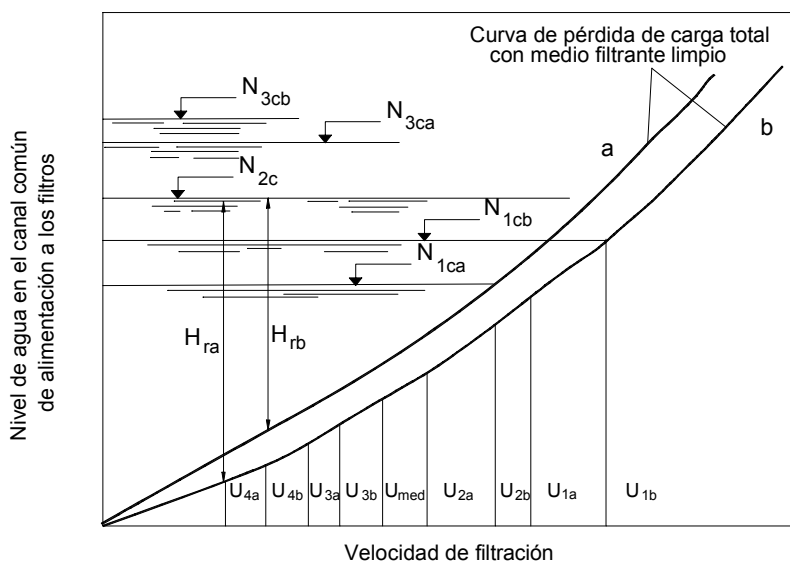


Figura 37. Niveles de agua en el canal común de alimentación de los filtros y velocidades de filtración – aumento o disminución de la pérdida de carga turbulenta

2.2.3. Carga Hidráulica Disponible Constante y Resistencia Total del Filtro Variable – “CHDC y RTFV”

Para poder aplicar este método de control debe regularse el caudal en la entrada del filtro en función del nivel de agua en el filtro.

El método puede denominarse como “velocidad variable con carga constante” o “de velocidad declinante continua”. En efecto si la velocidad de filtración va disminuyendo a medida que el filtro se va ensuciando y si la carga hidráulica disponible se mantiene constante en cada filtro por separado, resulta una velocidad de filtración máxima inicial en el medio filtrante limpio. Con el paso del tiempo aumenta la resistencia al escurrimiento, pues existe retención de impurezas en el manto filtrante y consecuentemente, la velocidad de filtración disminuye, conforme se ilustra en la **Figura 38**.

Como además de la pérdida de carga laminar (que aumenta con el tiempo), existe pérdida de carga turbulenta (que disminuye con el tiempo), la reducción de la velocidad de filtración con el tiempo resulta en un exponencial.

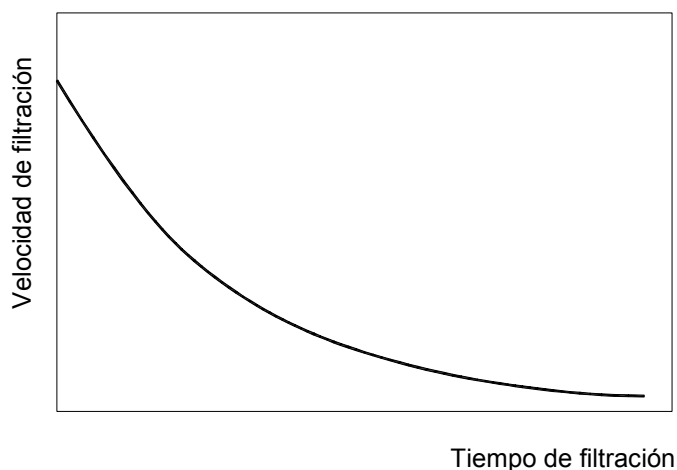


Figura 38. Variación de la velocidad de filtración con el tiempo de funcionamiento - Método de control carga hidráulica disponible constante y resistencia total del filtro variable

En comparación a los métodos en donde la velocidad de filtración permanece prácticamente constante, este método presenta la ventaja de producir agua filtrada de mejor calidad y carreras de filtración más prolongadas.

Sin embargo el método es raramente empleado en la práctica, especialmente en estaciones de tratamiento de agua destinadas al consumo humano, ya que para su aplicación hay necesidad de una reserva aguas arriba cuando la capacidad de filtración es pequeña y otra reserva aguas abajo, cuando la capacidad de filtración es mayor, ya que generalmente es constante el caudal afluente a la planta. Sin embargo, el método de control puede resultar práctico y económico en pequeñas instalaciones.

En el esquema de la **Figura 39** se muestra una unidad de filtración que opera en las condiciones anteriormente especificadas.

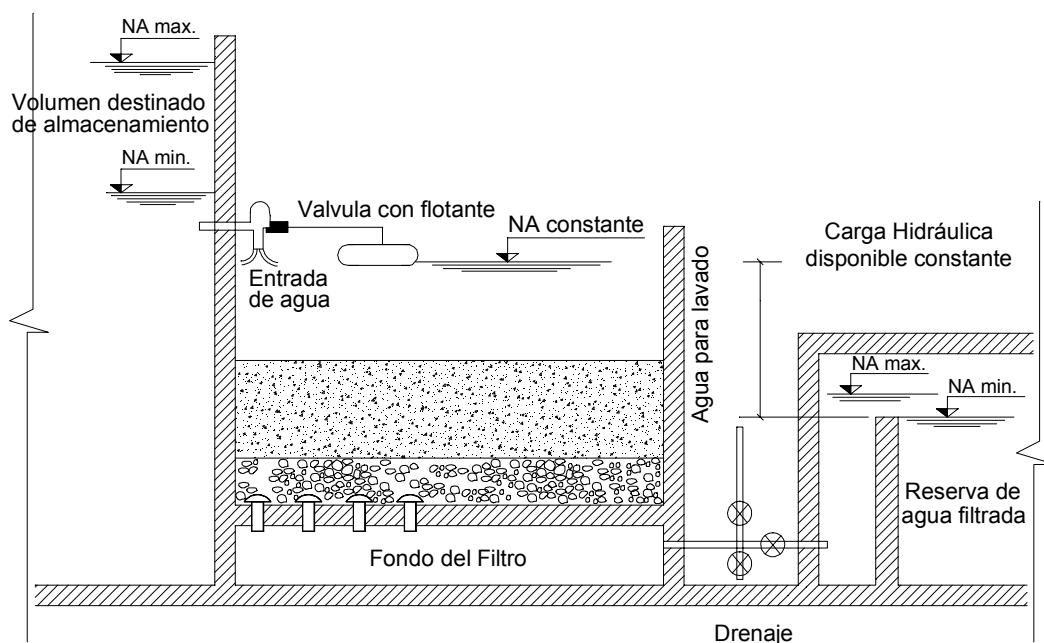


Figura 39. Esquema de un filtro operando con carga hidráulica disponible constante y resistencia total a la filtración variable – Velocidad de filtración declinante

Tanto en aguas arriba como en aguas abajo, hay variación del nivel del agua en función de la velocidad de filtración, disminuyendo aguas arriba y aumentando aguas abajo en el inicio de la filtración. A su vez a partir del momento cuando la velocidad de filtración resulta inferior a la velocidad media, aumenta aguas arriba y disminuye abajo el nivel del líquido.

2.2.4. Carga Hidráulica Disponible Variable y Resistencia Total del Filtro Constante – “CHDV” y RTFC

Este método de control es semejante al descrito en el Numeral 2.2.1. (Carga Hidráulica Disponible Constante y Resistencia Total del Filtro Constante “CHDC” y “RTFC”). Sin embargo el dispositivo de control debe además, compensar las variaciones de nivel del agua en el interior del filtro, para que la velocidad de filtración permanezca constante.

Como la entrada es generalmente efectuada por medio de compuertas ahogadas al no existir un dispositivo de control del nivel de agua, se produce variación en el interior de los filtros desde un valor mínimo a un valor máximo.

Para que la velocidad de filtración en una unidad cualquiera no se altere, el elemento de control debe actuar para producir las alteraciones necesarias.

En realidad lo que se tiene en este caso es una posibilidad teórica, pero raramente son proyectadas instalaciones de esta naturaleza en la práctica.

3. PROYECTO DE UN SISTEMA DE FILTRACIÓN CON VELOCIDAD DECLINANTE CON VOLUMEN DE AGUA ALMACENADO SOBRE LOS FILTROS*

Para utilizar el modelo de Machado y Di Bernardo es necesario preparar un ante-proyecto en el cual se establece el número de unidades filtrantes en la batería, la velocidad media de filtración, la carga hidráulica disponible, el área total de almacenamiento aguas arriba de los filtros (función del área de un filtro) y la sumatoria de las pérdidas de carga (laminar en el medio filtrante limpio y turbulenta) en función de la velocidad de filtración.

La carga hidráulica ($N_{2c} - N_0$) se debe fijar a priori para que la relación entre las velocidades máxima y media de filtración resulte entre 1,3 y 1,5, lo que propiciará carreras de filtración con una duración razonable (si esto no ocurre después de correr el modelo, es necesario cambiar la carga hidráulica disponible). En el área total de almacenamiento se debe incluir el área propia de los filtros ya que el volumen de agua existente aguas arriba de los mismos representa un almacenamiento adicional.

3.1. VELOCIDAD MEDIA DE FILTRACIÓN

La velocidad media de filtración en función del caudal a tratar (admitido para la batería de filtros), número de filtros de la batería y del área de un filtro, se calcula según la siguiente ecuación:

$$U_m = \frac{Q \cdot 86400}{N \cdot A} \quad (84)$$

U_m : Velocidad media de Filtración ($m^3/m^2 \cdot dia$)

Q : Caudal a filtrar (m^3/s)

N : Número de filtros de la batería

A : Área de un filtro (m^2)

3.2. PÉRDIDA DE CARGA EN EL FONDO DE LOS FILTROS

La determinación de la pérdida de carga en el fondo de filtro, que puede estar constituido por vigas en forma de V, bloques, múltiple con laterales, falso fondo con boquillas, etc. Se efectúa mediante la siguiente expresión general:

$$h_f = K \cdot U^n \quad (85)$$

* Ver Proyecto Típico "Planta de Potabilización – Filtración Directa Descendente para un Caudal de 600 L/s"

donde:

U = velocidad de filtración

K y n = coeficientes a determinar en cada caso

De proyectarse un falso fondo con orificios, conociendo el número de orificios, el diámetro y área de los mismos la expresión resulta:

$$h_1 = \frac{K \cdot U_0}{2 \cdot g} = \frac{K}{2 \cdot g} \left[\frac{A \cdot U}{86400 \cdot N_o \cdot A_o} \right]^2 \quad (85')$$

donde:

U_o : Velocidad a través del orificio

h_1 : Pérdida de carga en el fondo de los filtros (m)

g : Aceleración de la gravedad = 9,8 m/s²

U : Velocidad de filtración o carga hidráulica (m³/m² · día)

N_o : Número total de orificios

A_o : Área de un orificio (m²)

Nota: para fondo prefabricados se debe consultar al fabricante para obtener la ecuación de pérdida de carga.

3.3. PÉRDIDA DE CARGA EN LA COMPUERTA DE ENTRADA A LOS FILTROS

La pérdida de carga en la entrada de los filtros se establece en función de la pérdida debida a la variación de las condiciones de escurrimiento en aquel lugar, obtenida en función de la velocidad de filtración a través de la siguiente expresión:

$$h_2 = 1,67 \cdot \frac{U_c^2}{2 \cdot g} = \frac{1,67}{2 \cdot g} \left[\frac{A \cdot U}{86400 \cdot A_c} \right]^2 \quad (86)$$

U_c : Velocidad a través de la compuerta

h_2 : Pérdida de carga en la compuerta (m)

A_c : Área de la compuerta (m²)

3.4. PÉRDIDA DE CARGA EN LA SALIDA DE LOS FILTROS

La pérdida de carga en la salida de los filtros se establece en función de la longitud equivalente de las piezas especiales que interconectan el filtro con la cámara que contiene el vertedero (entrada a la cañería, salida de la cañería, ramal T de salida lateral, válvula esclusa abierta, curva de 90°, etc.).

Utilizando la expresión de Hazen-Williams en función de la velocidad de filtración, se obtiene:

$$h_3 = \frac{10,643 \cdot Q^{1,85} \cdot L_{equiv}}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} = \frac{10,643 \cdot L_{equiv}}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \left[\frac{A \cdot U}{86400} \right]^{1,85} \quad (87)$$

h_3 : Pérdida de Carga en la Salida de los filtros (m)

C : Coeficiente de Pérdida de Carga - Hazen-Williams (adimensional)

D : Diámetro de la Canalización de Salida de los filtros (m)

L_{equiv} : Longitud Equivalente de piezas especiales (m)

3.5. PÉRDIDA DE CARGA EN EL VERTEDERO DE SALIDA (CÁMARA INDIVIDUAL)

Esta pérdida de carga representa la altura de la lámina arriba del vertedero, siendo una función del caudal y del ancho del mismo. Utilizando la Fórmula de Francis (vertedero rectangular) en función de la velocidad de filtración, se obtiene:

$$h_4 = \left[\frac{A \cdot U}{1,84 \cdot B \cdot 86400} \right]^{2/3} \quad (88)$$

h_4 : Pérdida de Carga en el Vertedero de Salida (m)

B : Ancho del vertedero rectangular (m)

Nota: cuando hay un vertedero general, se tiene un tirante constante para cada caudal de ingreso a la planta.

3.6. PÉRDIDA DE CARGA EN EL MEDIO FILTRANTE LIMPIO Y CAPA SOPORTE

Para determinar la Pérdida de Carga en el Medio Filtrante Limpio y en la Capa Soporte son necesarias las características de los materiales, tales como distribución de los tamaños de los granos y espesor de las subcapas, tamaño efectivo de los granos, coeficiente de uniformidad, coeficiente de esfericidad, masa específica real, etc. Se puede utilizar la ecuación de Fair-Hatch:

$$\frac{h}{L} = \frac{150 \cdot \nu}{86400 \cdot g} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} \cdot \frac{U}{C_e^2} \sum_i^n \frac{X_i}{D_i^2} \quad (89)$$

ν : Viscosidad cinemática del agua (m²/s)

g : Aceleración de la gravedad (m/s²)

ε_0 : Porosidad media del medio filtrante limpio

C_e : Coeficiente de esfericidad

X_i : Fracción “en peso” del material filtrante retenido entre dos tamices consecutivos de la serie granulométrica.

D_i : Tamaño medio de las aberturas de las mallas j y k (m) - $D_i = \sqrt{D_j \cdot D_k}$

L : Espesor del manto filtrante (m)

Utilizando la ecuación (89) y conociendo las características del medio filtrante y de la capa soporte, se obtienen las siguientes pérdidas de carga, en función de la velocidad de filtración:

h_5 : Pérdida de Carga en la Arena (m)

h_6 : Pérdida de Carga en la Antracita (m)

h_7 : Pérdida de Carga en la Capa Soporte (m)

3.7. ECUACIÓN GENERAL DE LA PÉRDIDA DE CARGA DURANTE LA FILTRACIÓN

La ecuación general de la Pérdida de Carga Durante la Filtración, a ser utilizada en el modelo matemático, se establece por la sumatoria de todas las pérdidas de carga, según la siguiente expresión:

$$H = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6 + h_7 \quad (90)$$

4. EJEMPLOS

Ejemplo 1

Características de los filtros

Medio Filtrante Doble: Arena y Antracita

Número de Filtros en la Batería (N):6 (seis)

Caudal Afluente a la Batería: $Q = 0,35 \text{ m}^3/\text{s}$

Area de los Filtros: $A_f = 21,00 \text{ m}^2$

Fondo de: Vigas en V invertido (vigas Californianas)

Velocidad media de filtración

De la ecuación (84), Velocidad Media de Filtración $U_m = 240 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$

Pérdida de carga en el fondo de los filtros (h_1)

Número total de orificios: $N_o = 1008$ unidades

Diámetro de los orificios: $D_o = 0,01 \text{ m}$

Área de los orificios: $A_o = 0,0000785 \text{ m}^2$

$K = 1$

De la ecuación (85'), la pérdida de carga $h_1 = 4,809 \cdot 10^{-7} \cdot U^2$

Pérdida de carga en la compuerta de entrada a los filtros (h_2)

Área de la compuerta: $A_c = 0,1963 \text{ m}^2$

De la ecuación (86), la pérdida de carga $h_2 = 1,305 \times 10^{-7} \cdot U^2$

Pérdida de carga en la salida de los filtros (h_3)

Coeficiente de la Fórmula de Hazen-Williams: $C = 120$

Diámetro de Canalización de Salida de los Filtros: $D = 0,30 \text{ m}$

Longitud Equivalente de Piezas Especiales: $L_{\text{equiv}} = 41,60 \text{ m}$

De la ecuación (87), la pérdida de carga $h_3 = 4,567 \cdot 10^{-6} \cdot U^{1,85}$

Pérdida de carga en el vertedero de salida – caja individual (h_4)

Ancho del Vertedero Rectangular: $B = 1,0 \text{ m}$

De la ecuación (88), la pérdida de carga $h_4 = 2,586 \times 10^{-3} \cdot U^{0,667}$

Pérdida de carga en el medio filtrante limpio y capa soporte

Parámetro	Antracita	Arena
Tamaño del grano menor	0,59	0,42
Tamaño del grano mayor	2,40	1,41
Tamaño efectivo (mm)	0,90	0,50
Tamaño - D60 (mm)	1,44	0,75
Coeficiente de uniformidad	1,60	1,50
Coeficiente de esfericidad (C_e)	0,70	0,80
Porosidad (ϵ_0)	0,45	0,40
Masa específica real (Kg/m^3)	1600	2650
Espesor de capa (m)	0,50	0,25

Tabla 6. Características del Medio Filtrante

Tamaño (mm)	Espesor (m)
25,4 - 38,0	0,07
19,0 - 12,7	0,06
12,7 - 6,4	0,05
6,4 - 3,2	0,05
3,2 - 2,0	0,05
4,8 - 9,6	0,05
12,7 - 19,0	0,05
Espesor total (m)	0,38
Coeficiente de Esfericidad (C_e)	0,75
Porosidad (ϵ_0)	0,45

Tabla 7. Características de la Capa Soporte

Pérdida de carga en la arena

De la ecuación (89), con $\nu = 1,007 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (a 20°C), $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, datos de la **Tabla 6** y $\sum X_i / D_i^2 = 152,6$ obtenido de la **Tabla 9**, la pérdida de carga en la arena $h_5 = 5,977 \cdot 10^{-4} \cdot U$.

Tam. de los Granos (mm)	D _i (mm)	X _i	X _i /D _i (1000/m)	X _i /(D _i) ² (10000/m ²)
0,42 - 0,59	0,498	0,10	0,201	40,3
0,59 - 0,71	0,647	0,10	0,155	23,9
0,71 - 0,84	0,772	0,10	0,130	16,8
0,84 - 1,00	0,916	0,40	0,437	47,7
1,00 - 1,19	1,091	0,25	0,229	21,0
1,19 - 1,41	1,295	0,05	0,039	3,0
			Σ = 1,189	Σ = 152,7

Tabla 8. Determinación de $\sum X_i / D_i^2$

Pérdida de carga en la antracita

Tamaño de los Granos (mm)	D _i (mm)	X _i	X _i /D _i (1000/m)	X _i /(D _i) ² (10000/m ²)
0,71 - 0,84	0,772	0,03	0,039	5,0
0,84 - 1,00	0,916	0,04	0,044	4,8
1,00 - 1,19	1,091	0,07	0,064	5,9
1,19 - 1,41	1,295	0,18	0,139	10,7
1,41 - 1,70	1,548	0,43	0,278	17,9
1,70 - 2,00	1,844	0,15	0,081	4,4
2,00 - 2,40	2,190	0,10	0,046	2,1
			Σ = 0,691	Σ = 50,8

Tabla 9. Determinación de $\sum X_i / D_i^2$

De la ecuación (89), con $\nu = 1,007 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (a 20°C), $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, datos de la **Tabla 6** y $\sum X_i / D_i^2 = 50,8 \cdot 10^4/\text{m}^2$ obtenido de la **Tabla 9**, la pérdida de carga en la antracita $h_6 = 3,070 \times 10^{-4} \text{ U}$.

Pérdida de carga en la capa soporte

Tamaño de los Granos (mm)	D _i (mm)	X _i	X _i /D _i (1000/m)	X _i /(D _i) ² (10000/m ²)
25,4 - 38,0	31,068	1,00	0,032	0,1
19,0 - 12,7	15,534	1,00	0,064	0,4
12,7 - 6,4	9,015	1,00	0,111	1,2
6,4 - 3,2	4,525	1,00	0,221	4,9
3,2 - 2,0	2,530	1,00	0,395	15,6
4,8 - 9,6	6,788	1,00	0,147	2,2
12,7 - 19,0	15,534	1,00	0,064	0,4
			Σ = 1,034	Σ = 24,8

Tabla 10. Determinación de $\sum X_i / D_i^2$

De la ecuación (89), con $v = 1,007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (a 20°C), $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, datos de la **Tabla 7** y $\sum X_i / D_i^2 = 24,8 \cdot 10^4/\text{m}^2$ obtenido de la **Tabla 10**, la pérdida de carga en la capa soporte $h_7 = 9,927 \times 10^{-5} \cdot U$.

Ecuación general de la pérdida de carga durante la filtración

De la ecuación (90), se obtiene:

$$H = 6,114 \times 10^{-7} \cdot U^2 + 4,567 \times 10^{-6} \cdot U^{1,85} + 2,586 \times 10^{-3} \cdot U^{0,667} + 1,004 \times 10^{-3} \cdot U$$

Resultados:

En las **Tabla 11** y **Tabla 12**, se muestran los resultados obtenidos utilizando el modelo matemático de Machado y Di Bernardo (1996) para la situación práctica presentada.

Los valores de las cargas hidráulicas (H)m de 0,8 y 1,0, se establecieron para que la relación $U_{\text{máx}}/U_{\text{med}}$ resulte entre 1,3 e 1,5, lo cual propicia carreras de filtración con mayor duración.

Los resultados obtenidos utilizando el almacenamiento adicional de seis veces el área de un filtro de la batería, se presentan para mostrar la influencia del almacenamiento aguas arriba del Sistemas de Filtros con Velocidad Declinante.

En la **Tabla 11** se muestran los resultados obtenidos durante la filtración con los 6 filtros en operación, en donde se obtienen los valores de las velocidad de filtración en cada filtro, desde el que está más tiempo en operación ($U_{\text{mín}}$) hasta el recién lavado ($U_{\text{máx}}$), además de los valores del nivel de agua N_{1c} y de la variación $N_{2c}-N_{1c}$.

En la **Tabla 12** se muestran los resultados obtenidos al final del lavado de un filtro de la batería (duración del lavado de 20 minutos) en donde se obtienen los valores de las velocidades de filtración en los filtros remanentes en operación, el nivel de agua N_{3c} y la variación $N_{3c}-N_{2c}$.

Carga Hidráulica (m)	Alm. Adicional f(A)	Velocidades Durante la Filtración (*) (m ³ /m ² .día)						Nivel de Agua (m)	h1 (m)
		$U_{\text{máx}}$	U_a	U_b	U_c	U_d	$U_{\text{mín}}$	N_1	$N_2 - N_1$
0,8	s/ Alm.	317	283	251	221	195	171	0,73	0,07
0,8	6A	317	283	251	221	195	171	0,75	0,05
1,0	s/ Alm.	359	303	253	210	173	142	0,85	0,15
1,0	6A	359	303	253	210	173	142	0,87	0,13

Velocidad Media de Filtración: 240 m³/m².día

6 Filtros en Operación

(*) Luego de alcanzarse el nivel N_1

N_2 = Carga Hidráulica (H)

Tabla 11. Resultados durante la filtración

Carga Hidráulica (m)	Alm. Adicional f(A)	Velocidades al Final del Lavado de un Filtro (#) (m ³ /m ² .dia)						Nivel de Agua (m)	dh (m)
		U _{máx} *	U _a *	U _b *	U _c *	U _d *	U _{med}	N ₃	N ₃ - N ₂
0,8	s/ Alm.	357	320	285	253	223	288	0,93	0,13
0,8	6A	346	310	276	244	215	278	0,91	0,11
1,0	s/ Alm.	395	335	282	234	194	288	1,13	0,13
1,0	6A	383	324	272	226	187	278	1,11	0,11

Velocidad Media de Filtración: 240 m³/m².dia
(#) Duración del Lavado = 20 min

6 Filtros en Operación
N₂ = Carga Hidráulica (H)

Tabla 12. Resultados durante el lavado de un filtro

Analizando los resultados de la aplicación práctica presentados en las **Tabla 11** y **Tabla 12** se observa que:

- 1). Los valores de las velocidades de filtración en los diversos filtros entre lavados sucesivos, cuando permanecen constantes la velocidad media de filtración, la carga hidráulica disponible, el número de filtros en la batería y las pérdidas de carga laminar y turbulenta, se mantienen iguales con y sin almacenamiento adicional aguas arriba de los filtros.
- 2). Los valores de las velocidades de filtración en los filtros remanentes al final del lavado de un filtro, para una misma carga hidráulica, descienden con el almacenamiento adicional aguas arriba de los filtros.
- 3). El nivel mínimo de operación (N_{1c}) aumenta con el almacenamiento adicional y el nivel registrado al final del lavado de un filtro (N_{3c}) disminuye, siendo la diferencia entre los mismos menor para capacidades adicionales de almacenamiento mayores, aguas arriba de los filtros.
- 4). En relación a la aplicación de los resultados para fines prácticos (en la elaboración de proyectos), a priori definiendo como hipótesis la cota 100,00 para el vertedero de salida, considerando el sistema sin almacenamiento adicional y admitiendo la carga hidráulica de 1,0 m, se puede establecer lo siguiente:
 - a) Cota del nivel N_{2c} = 101,00 m
 - b) Cota del nivel N_{1c} = 100,85 m
 - c) Variación de nivel N_{2c} - N_{1c} = 0,15 m

Observación: El umbral de las cámaras de recolección del agua de lavado de los filtros y el borde superior de las compuertas de admisión de agua a los filtros deben ser fijadas debajo de la cota 100,85 m (N_{1c}), permitiendo el funcionamiento de los filtros como vasos comunicantes.

d) Cota del nivel $N_{3c} = 101,13 \text{ m}$

e) Variación de nivel $N_{3c} - N_{2c} = 0,13 \text{ m}$

Observación: Conociéndose el nivel máximo del agua que se producirá en el canal común de alimentación de los filtros (N_{3c}), se puede fijar la cota del umbral del vertedero de excesos, por ejemplo, en 101,20 m.

Ejemplo 2

Una planta de tratamiento de agua proyectada con capacidad nominal de 800 L/s, poseía 4 filtros funcionando con velocidad supuesta constante. Como no había control de nivel, el caudal de agua decantada se dividía hacia los filtros por medio de las canaletas de recolección de agua de lavado, vertiendo libremente sobre el medio filtrante. Por lo tanto, cuando las canaletas se encontraban sumergidas en algunos filtros y vertiendo libremente en los demás, no se tenía idea de la velocidad de filtración con que cada filtro trabajaba, inclusive había un perjuicio significativo de la calidad del efluente en algunos de ellos. Además de resolver el problema operacional se deseaba adecuar los filtros para que funcionaran con velocidad declinante.

Se instalaron piezómetros en diferentes puntos de la altura de un filtro y se varió el caudal afluente (estimado por la altura de la lámina líquida sobre el coronamiento de las canaletas), para relacionar la pérdida de carga en los diferentes componentes del filtro.

Datos relevados

- Caudal afluente a la planta de tratamiento el día del relevamiento = 783 L/s.
- Número de filtros = 4
- Características de los filtros: cada unidad poseía 2 filtros de 9,6 m de longitud y 3,3 m de ancho, con un canal central de recolección de agua de lavado y compuerta de entrada (0,70 x 0,70 m).
- Velocidad media de filtración = $267 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$.
- Sistema de drenaje: bloques cerámicos.
- Medio filtrante: antracita y arena.

Pérdida de carga: h_i (m) y U ($\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$)

a) Compuerta de Entrada

$$h_1 = 8,43 \cdot 10^{-8} U^2$$

b) Medios Granulares Limpios

$$\text{antracita : } h_2 = 4,92 \cdot 10^{-4} U$$

arena : $h_3 = 6,51 \cdot 10^{-4} U$

grava : $h_4 = 1,03 \cdot 10^{-7} U$

c) Sistema de Drenaje (bloque cerámico de Leopold)

$h_5 = 1,09 \cdot 10^{-4} U^{1,3266}$

d) Cañería de Salida y Accesorios

$h_6 = 5 \cdot 10^{-6} U^{1,85}$

e) Cámara de Nivel

Para que los filtros funcionen como vasos comunicantes, se construyó una cámara de salida en cada filtro provista de vertedero rectangular (ver esquema en planta en **Figura 42**).

$h_7 = 4,8 \cdot 10^{-3} U^{0,667}$

f) Ecuación General de Pérdida de Carga

$H = 8,43 \cdot 10^{-8} U^2 + 5 \cdot 10^{-6} U^{1,85} + 1,09 \times 10^{-4} U^{1,3266} + 1,14 \cdot 10^{-3} U + 4,8 \cdot 10^{-3} U^{0,667}$

Velocidades y niveles de agua durante la filtración – modelo de Di Bernardo (considerando almacenamiento adicional aguas arriba de los filtros igual al número de filtros)

Carga Hidráulica Disponible = 1,6 m

- Velocidades de Filtración: $U_{\text{máx}}=367 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$; $U_a=292 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$; $U_b=230 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$; $U_{\text{mín}} = 179 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$
- $N_{2c} - N_{1c} = 0,33 \text{ m}$; $U_{\text{máx}}/U_{\text{med}} = 1,376$

Velocidades y niveles de agua durante el lavado

Carga Hidráulica Disponible = 1,6 m

- Velocidades de Filtración: $U_{\text{máx}}^* = 438 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$; $U_a^* = 352 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$; $U_b^* = 278 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$
- $N_{3c} - N_{2c} = 0,36 \text{ m}$

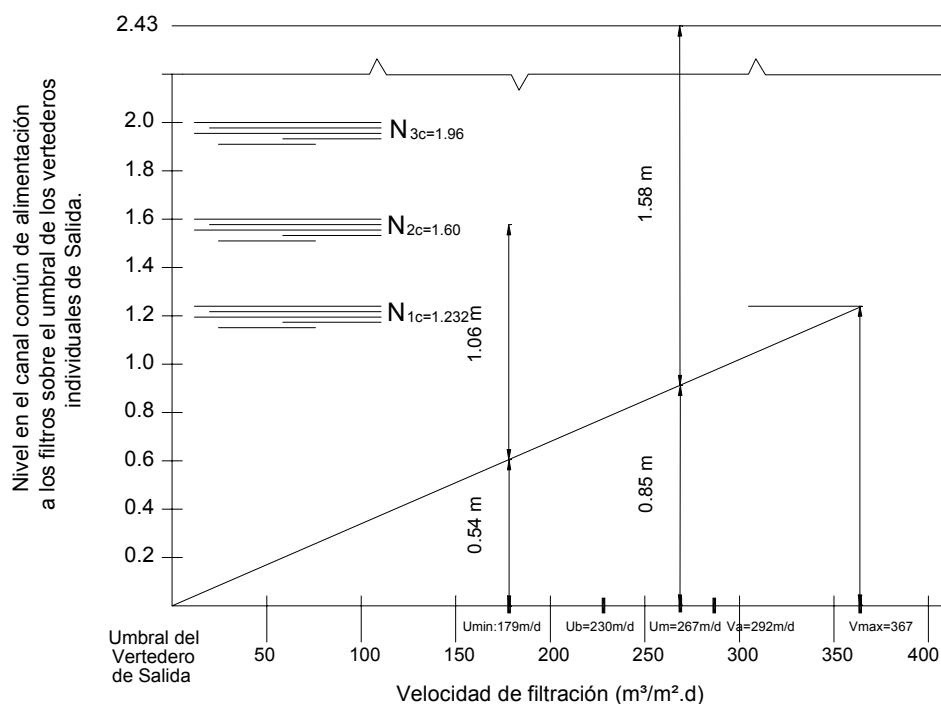


Figura 40. Representación de los Niveles en el Canal Común de Alimentación de los Filtros en Función de la Velocidad de Filtración

Comparación entre la filtración con velocidad constante y con velocidad declinante

Pérdida de carga producida por la retención de impurezas en el filtro más sucio de la batería cuando se retira de operación para lavado (Nivel N_{2c}) = 1,06 m.

Si se desea que la duración de la carrera de filtración sea la misma en un sistema de filtración con velocidad constante y en un sistema de filtración con velocidad declinante, ambos con 4 filtros iguales, la cantidad de impurezas en el filtro más sucio del sistema de filtración con velocidad declinante, debe ser igual a la existente en el filtro del un sistema de filtración con velocidad constante en el momento del lavado. Esto significa que son iguales los coeficientes de resistividad producidos por la retención de impurezas en los dos filtros. Por lo tanto, se tiene:

$$H_{FVD} = K_r U_{\min} = H_{FVC} = K_{ri} U_{FVC} \text{ (pues } K_{ri} \text{ es lo mismo y } U_{FVC} = U_{\text{med}})$$

$$H_{FVC} = H_{FVD} (U_{\text{med}} / U_{\min}) \rightarrow H_{FVC} = 1,06 \cdot (267/179) = 1,57 \text{ m}$$

(FVD = filtro de velocidad variable y FVC = filtro de velocidad constante)

Por lo tanto, 1,58 m será la pérdida de carga producida por la retención de impurezas en el filtro de velocidad constante, funcionando con la velocidad

media de filtración del sistema de filtración con velocidad declinante, para que las carreras de filtración sean iguales en los dos sistemas.

Para la velocidad media de filtración la ecuación general de pérdida de carga (ver también la **Figura 40**) permite calcular la pérdida de carga turbulenta y laminar en el medio granular limpio es igual a 0,85 m.

De esa forma, la carga hidráulica disponible en un sistema de filtración con velocidad constante será de 2,42 m, mayor que la de 1,6 m en sistema de filtración con velocidad declinante.

Consideraciones finales

Además de verificar la carga hidráulica, el análisis efectuado permite que la carga hidráulica disponible se adopte en el proyecto de un sistema de filtración con velocidad declinante a partir del empleo de datos disponibles sobre la filtración con velocidad constante, caso muy común en investigaciones. Para garantizar que los filtros funcionen como vasos comunicantes es necesario que el nivel del agua en su interior sea superior al umbral de las canaletas de recolección de agua de lavado.

La pérdida de carga en la compuerta de entrada para la velocidad de filtración máxima, que es el caso más crítico, resulta de:

$$h_1 = 8,4 \cdot 10^{-8} U^2 \rightarrow h_{1\text{máx}} = 0,011 \text{ m}$$

Por lo tanto, el nivel de agua en el interior del filtro más limpio (en relación al Nivel N_{1c}) será de 1,221 m arriba del umbral del vertedero de salida, de forma que tanto las compuertas de entrada como el umbral de las canaletas de recolección de agua de lavado estarán sumergidas.

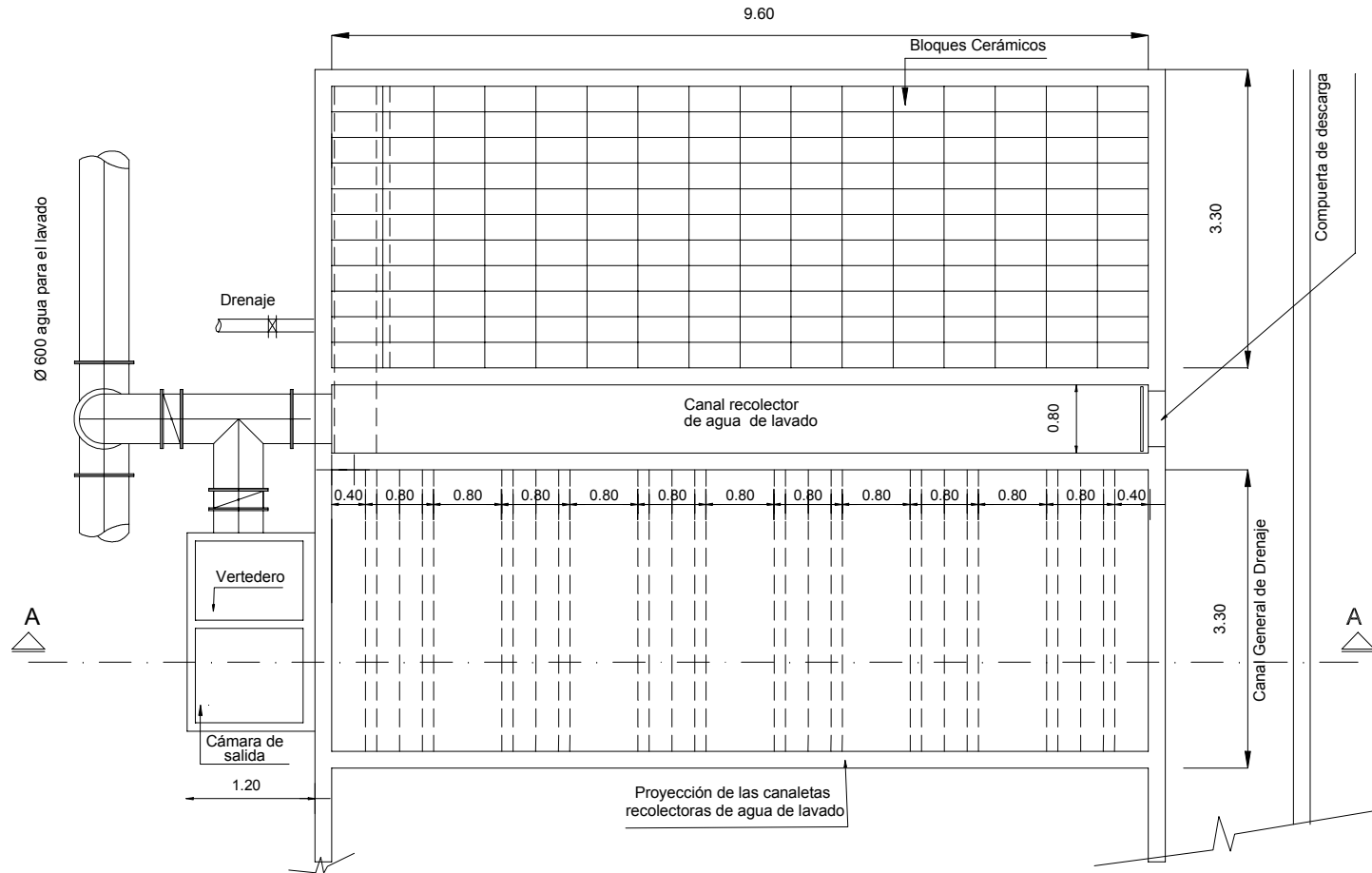


Figura 41. Planta del filtro a nivel de los bloques que conforman el falso fondo y de la proyección de las canaletas de lavado

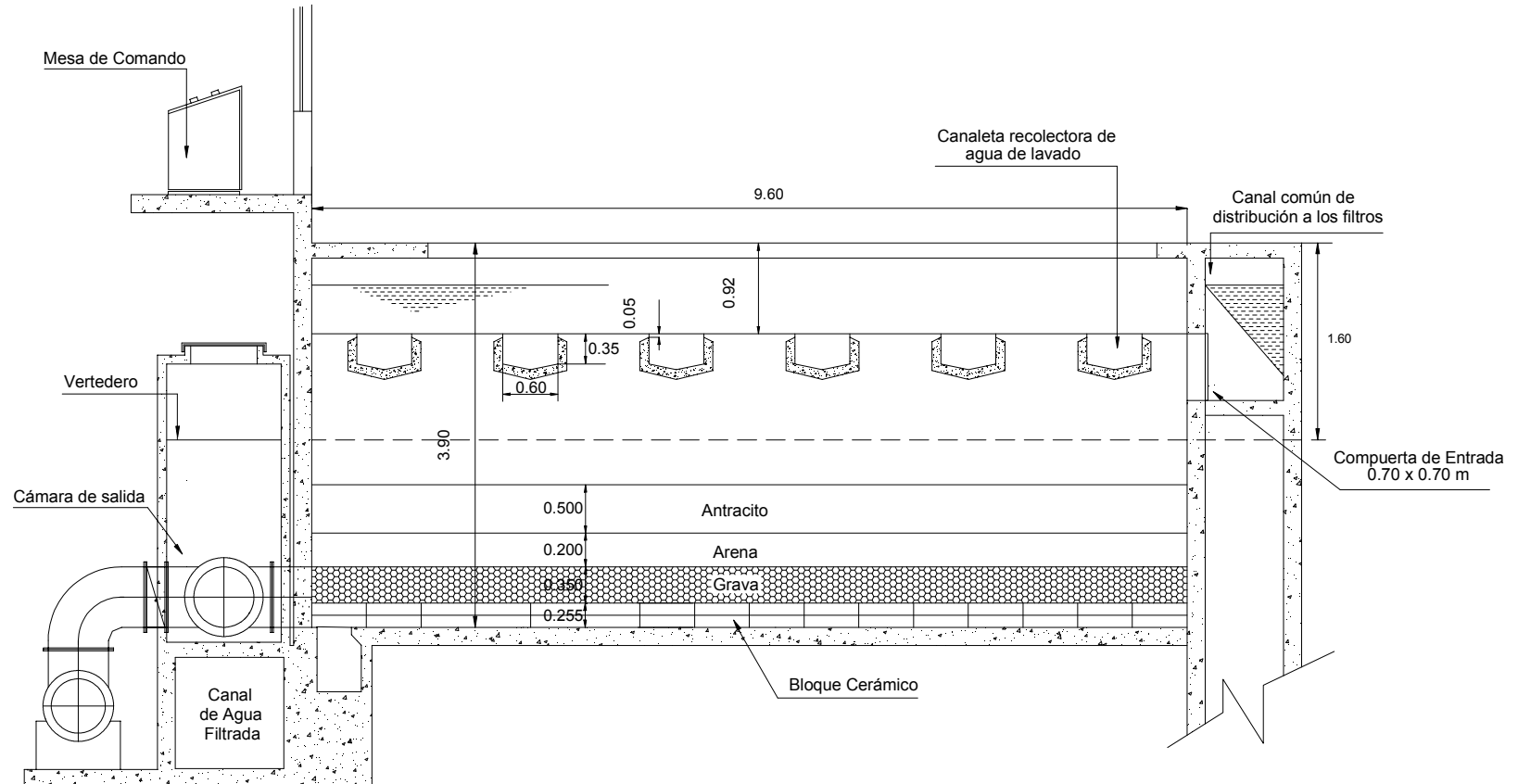


Figura 42. Corte A-A

Ejemplo 3

Una planta de tratamiento de agua posee 6 filtros con capacidad nominal de 600 L/s, y se ampliará pasando al número de filtros a 8 en la primera etapa (caudal de 800 L/s) y posteriormente en la segunda etapa a 10, cuando el caudal a ser tratado sea de 1200 L/s.

Cada filtro posee cámara única de filtración de 4m de ancho y 10 m de largo ($A = 40 \text{ m}^2$).

Calcular las variaciones del nivel de agua en el canal común de alimentación de los filtros y la velocidad durante la filtración y el lavado. En la **Figura 43** se muestra el esquema del filtro en corte.

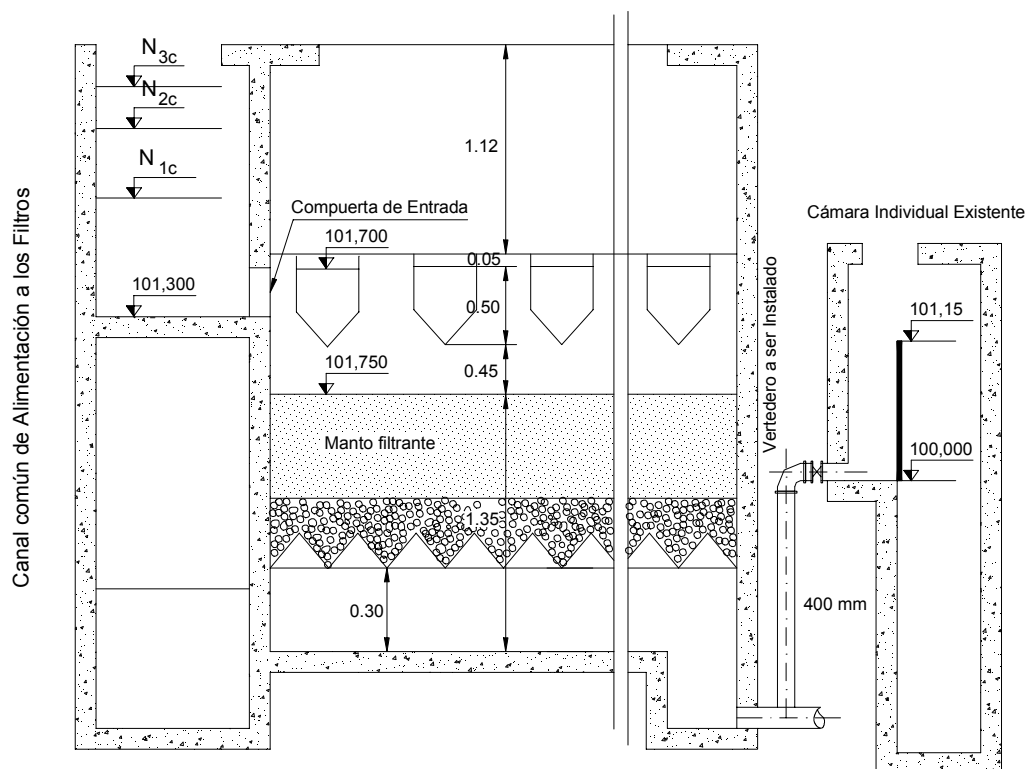


Figura 43. Esquema del filtro de la Planta de Tratamiento

En las ecuaciones que siguen, la pérdida de carga es dada en metros y velocidad de filtración en $\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$.

a). Velocidad

$$U_{med8} = \frac{0,8 \cdot 86400}{8 \cdot 40} = 216 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d} \text{ y } U_{med10} = \frac{1,2 \cdot 86400}{10 \cdot 40} = 259,2 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$$

b). Fondo de los filtros: viga V invertida.

- Número total de orificios = 2004
- Diámetro de los orificios = 15,9 mm; Área de 1 orificio = $198,56 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$
- Pérdida de carga

$$h_1 = \frac{U_0^2}{2g} = \frac{1}{2g} \left[\frac{40U^2}{86400 \cdot 2004 \cdot 198,56 \cdot 10^{-6}} \right]^2 = 6,9 \cdot 10^{-8} U^2$$

c) Compuerta de entrada

$$h_2 = 1,67 \frac{U_c^2}{2g} = \frac{1,67}{19,6} \left[\frac{40 U^2}{86400 \cdot \pi \frac{(0,4)^2}{4}} \right]^2 = 11,56 \cdot 10^{-7} U^2$$

d) Salida de los filtros

- Longitud equivalente de las piezas especiales (entrada y salida de la cañería, T de la salida lateral, válvula esclusa abierta, curva de 90°, etc. De diámetro igual a 400mm) = 49. 3m.

$$h_3 = \frac{10,643 Q^{1,85} L}{C^{1,85} D^{4,87}} = \frac{10,643 \cdot 49,3}{100^{1,85} \cdot 0,4^{4,87}} \left(\frac{40U}{86400} \right)^{0,667} = 3,9 \cdot 10^{-3} U^{0,667}$$

e) Vertedero de salida con B = 1,0 m - Cámara individual

$$Q = 1,84 h_4^{1,5} \rightarrow h_4 = 0,66 \left(\frac{40U}{86400} \right)^{0,667} = 3,9 \cdot 10^{-3} U^{0,667}$$

f) Medio filtrante limpio y capa soporte

Parámetro	Antracita	Arena
Tamaño del grano menor	0,59	0,42
Tamaño del grano mayor	2,40	1,41
Tamaño efectivo(mm)	0,90	0,50
Tamaño-D60(mm)	1,44	0,75
Coeficiente de uniformidad	1,60	1,50
Coeficiente de esfericidad(C _e)	0,70	0,80
Porosidad (ε ₀)	0,45	0,40
Masa específico real (Kg/m ³)	1600	2650
Espesor de capa (m)	0,50	0,25

Tabla 13. Características del Medio Filtrante

Tamaño (mm)	Espesor(m)
25,4 - 38,0	0,07
19,0 - 12,7	0,06
12,7 - 6,4	0,05
6,4 - 3,2	0,05
3,2 - 2,0	0,05
4,8 - 9,6	0,05
12,7 - 19,0	0,05
Espesor total (m)	0,38
Coefficiente de Esfericidad (C_e)	0,75
Porosidad (ϵ_0)	0,45

Tabla 14. Características de la Capa Soporte

$$\frac{h}{l} = \frac{150 \cdot \nu}{g} \frac{(1 - e_0)^2}{e_0^3} \frac{U}{C_e^2} \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{D_i^2} \quad \text{ecuación de Fair-Hatch}$$

$$h_{ant} = 3,070 \cdot 10^{-4} \cdot U$$

$$h_{areia} = 5,977 \cdot 10^{-4} \cdot U$$

$$h_{pedr} = 9,927 \cdot 10^{-5} \cdot U$$

$$H_5 = 1,004 \cdot 10^{-3} \cdot U$$

g) Ecuación general de pérdida de carga

$$H = 1,225 \cdot 10^{-6} U^2 + 6,154 \cdot 10^{-6} U^{1,85} + 3,9 \cdot 10^{-3} U^{0,667} + 1,004 \cdot 10^{-3} U$$

h) Velocidad del filtro y Niveles de Agua en el Canal Común de Alimentación a los Filtros para un caudal de 800 L/s y 8 filtros en la batería (obtenido por medio de cálculo electrónico considerando almacenamiento igual al número de filtros en la batería)

h₁) Durante la filtración

- Carga hidráulica disponible = 1,05 m
- Numero de filtros = 8
- Velocidad media de filtración = 216 m³ / m² d
- Cota del umbral del vertedero de salida = 101,150
- Velocidades de filtración: 323; 287; 254; 223; 195; 170; 148; 128 m³ / m² . d
- Variación de nivel: $N_{2c} - N_{1c} = 0,108 \text{ m}$

- Cota del nivel $N_{1c} = 102,092$
- Cota del nivel de agua en el interior del filtro recién lavado = $102,092 - 0,121 = 101,971$.
- Obs. 0,121 m es la pérdida de carga en la compuerta de entrada al filtro recién lavado.
- Como la cota del umbral de las cámaras de recolección es 101,700, los filtros funcionarán como vasos comunicantes.
- $U_{máx} / U_{med} = 323 / 216 \cong 1,49$

h₂) Durante el lavado

- Velocidad de filtración: 346; 309; 274; 242; 212; 185; 161 m³/m² . d
- Velocidad media de filtración al final del lavado = 247 m³ / m² . d
- Variación de nivel: $N_{3c} - N_{2c} = 0,098 \text{ m}$

i). Velocidades de filtración y niveles de agua en el canal común de alimentación de los filtros para un caudal de 1200 l/s y 10 filtros en la batería (obtenidos por medio de cálculo electrónico considerando almacenamiento igual al número de filtros en la batería)

i₁) Durante la filtración

- Carga hidráulica disponible = 1,3
- Número de filtros = 10
- Velocidad media de filtración = 259,2 m³ / m² d
- Cota del umbral del vertedero de salida = 101,150
- Velocidades de filtración: 387; 354; 322; 293; 265; 239; 215; 193; 172; 154 m³/m² . d
- Variación de Nivel: $N_{2c} - N_{1c} = 0,113 \text{ m}$
- $U_{máx} / U_{med} = 391,6 / 259,2 \cong 1,51$

i₂) Durante el lavado

- Velocidades de filtración: 408; 374; 342; 311; 282; 255; 229; 206; 185 m³ / m² . d
- Velocidad media de filtración al final del lavado = 288 m³ / m² . d
- Variación de Nivel: 0,097 m

5. BIBLIOGRAFIA

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas Projeto de Estação de Tratamento de Água para Abastecimento Público – NBR 12216 ABNT, Junho 1992, Brasil.
- Arboleda, J. V. Hydraulic Control Systems of Constant and Declining Flow Rate Filtration JAWWA, Vol. 66, n.2, p: 87-94, Feb. 1974, USA.
- Arboleda, J. V., GIRALDO, R., SNEL, H. Hydraulic Behavior of Declining Rate Filtration JAWWA, Vol. 77, n. 12, p: 67-74, Dec. 1985.
- Aultman, W. W. Valve Operation Devices and Rate-of-Flow Controllers JAWWA, Nov. 1959, USA.
- Baylis, J. R. Variable Rate Filtration PURE WATER Vol. XI, n. 5, p: 86-114, May 1959, USA.
- Baylis, J. R. Surges in the Flow of Water Through Filters PURE WATER Vol. XI, n. 6, p: 77-97, June 1959, USA.
- Bryant, E. A Variable Rate Filtration – Principles, Design and Operation Water & Sewage Works Vol. 121, n. 112, p: 40-44, Dec. 1974, USA.
- Cleasby, J. L., Williamson, M. M., Baumann, E.R. Effect of Filtration Rate Changes in Quality. JAWWA, V. 55, n. 7, p: 869-877, July 1963, USA.
- Cleasby, J. L. Filter Rate Control Without Rate Controllers JAWWA, Vol. 61, n. 4, p: 181-185, April 1969, USA.
- Cleasby, J. L. New Ideas in Filter Control Systems Symposium on Modern Water Treatment Methods – PAHO Aug. 1972, Asuncion, Paraguay.
- Cleasby, J. L., Di Bernardo, L. Hydraulic Considerations in Declining-Rate Filtration JEED – PROC. ASCE, Vol. 106, n. EE6, p: 1043-1055, Dec. 1980, USA.
- Cleasby, J. L. Declining-rate Filtration Fluid-Particle Separation Journal, Vol. 2, n. 1, p: 1-4, March 1989, USA.
- Di Bernardo, L., Cleasby, J. L. Declining-rate versus Constant-rate Filtration JEED – PROC. ASCE, Vol. 106, n. EE6, p: 1023-1041, Dec. 1980, USA.
- Di Bernardo, L., Freire, M. L. Influência da Altura de Queda entre as Unidades de Pré-Tratamento e os Filtros de uma Estação de Tratamento de Água na Duração da Carreira de Filtração e Qualidade do Efluente. 14^o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Revista DAE, Set. 1984, Brasil.
- Di Bernardo, L. Proposição de um Modelo Matemático para o Projeto de Sistemas de Filtração com Taxa Declinante. 13^o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1985, Maceió-AL, Brasil.
- Di Bernardo, L. A Rational Method to the Design of Declining-Rate Filters. World Filtration Congress IV, 1986, Ostende, Belgium.

- Di Bernardo, L. Hidráulica da Filtração com Taxa Declinante. Revista DAE, vol. 46, n° 146, p:259-267, set. 1986, Brasil
- Di Bernardo, L. Souza, P. R. Posicionamento da Crista do Vertedor de Saída em sistemas de Filtração com Taxa Declinante. 16^o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental 1991, Goiânia-GO, Brasil.
- Di Bernardo, L., Teixeira, B. A N. Previsão da Duração da Carreira de Filtração em Sistemas de Filtração com Taxa Declinante XXIII Congreso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental Nov. 1991, La Habana, Cuba.
- Di Bernardo, L., Machado, R. Comportamento de Sistemas de Filtração com Taxa Declinante Variável com e sem Armazenamento Adicional de Água a Montante dos Filtros. 18^o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Set.1995, Salvador-BA, Brasil.
- Di Bernardo, L. & Machado, R. Hydraulic Behavior of Declining-rate Filtration System with Storage Capacity upstream the Filters. 7th World Filtration Congress, May 1996, Budapest- Hungary.
- Escobar R., J. C. Influência da Capacidade de Armazenamento de Água a Montante dos Filtros no Funcionamento de Sistemas de Filtração com Taxa Declinante Dissertação de Mestrado – EESC-USP, Nov. 1992, São Carlos, Brasil.
- Hilmoie, D. J., Cleasby, J. L. Comparing Constan-Rate and Declining-Rate of Surface Water JAWWA, Vol. 78, n. 12, p: 26-34, Dec. 1986, USA.
- Hudson JR., H. E. Declining-Rate Filtration JAWWA, Vol. 51, n. 11, p: 1455 – 1463, Nov. 1959, USA.
- Machado, R. Proposição de Modelação Matemática para Sistemas de Filtração com Taxa Declinante Variável Incluindo Armazenamento de Água a Montante dos Filtros. Tese de Doutorado. EESC-USP, 1995, São Carlos, Brasil.
- Machado, R. & Di Bernardo, L. Influência da Capacidade de Armazenamento de Água a Montante dos Filtros em Sistemas de Filtração com Taxa Declinante Variável - Investigação Experimental e Modelação. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, vol 1, n° 3, p: 96-114, jul/set. 1996, Brasil.
- Machado, R. & Di Bernardo, L. - Modelação Matemática para Sistemas de Filtração com Taxa Declinante Variável Incluindo Armazenamento de Água a Montante dos Filtros. XXV Congreso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental, Nov. 1996, México.
- Souza, P. R. Influência do Posicionamento do Vertedor de Saída nos Sistemas de Filtração com Taxa Declinante e Taxa Constante com Nível Variável - Dissertação de Mestrado, EESC-USP, Dez. 1990, São Carlos, Brasil.
- Teixeira, B. A N. Proposição de um Método para Obtenção de Parâmetros de Projeto e Operação de Sistemas de Filtração com Taxa Declinante Tese de Doutorado 1991, São Carlos, Brasil.
- Tuepker, J. L. Filter Performance under Varying Operating Conditions Proceedings of the Conference on Water Filtration – University of Missouri at Rolla, April 1965, USA.