

PROYECTO TÍPICO. PLANTA DE ABATIMIENTO DE FLÚOR

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. EL FLÚOR Y LA SALUD	3
3. DOSIS PROMEDIO A ADOPTAR.....	3
4. PROCESOS DE DESFLUORACIÓN	4
4.1. PROCESO CON FOSFATO TRICÁLCICO MEDIANTE HUESO MOLIDO.....	4
5. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	6
5.1. OPERACIÓN NORMAL DE ABATIMIENTO	6
5.2. CONTRALAVADO	6
5.3. REGENERACIÓN	7
5.4. ENJUAGUE LENTO	7
5.5. ENJUAGUE RÁPIDO	7
5.6. NEUTRALIZACIÓN	7
6. PARÁMETROS	7
6.1. PARÁMETROS OPERACIONALES.....	7
6.2. PARÁMETROS FÍSICOS, TEMPORALES Y ECONÓMICOS.....	8
7. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO	8
7.1. HUESO MOLIDO 70.....	8
8. VELOCIDAD DE CONTRALAVADO	9
9. DIMENSIONAMIENTO	9

9.1. VOLUMEN DIARIO Y TOTAL DIARIO DE AGUA A TRATAR	9
9.2. VOLUMEN ENTRE REGENERACIONES	10
9.3. VOLUMEN DE MATERIAL INTERCAMBIADOR	11
9.4. DIMENSIONES DE LOS TANQUES	11
9.4.1. <i>Caudal Horario</i>	11
9.4.2. <i>Sección Total de los Tanques</i>	11
9.4.3. <i>Número de Tanques</i>	12
9.4.4. <i>Diámetro de los Tanques</i>	12
9.4.5. <i>Altura del Manto</i>	12
9.4.6. <i>Altura de la Cámara de Expansión</i>	13
9.4.7. <i>Lecho de Sostén</i>	13
9.4.8. <i>Altura Total de la Generatriz Cilíndrica</i>	14
9.5. SOLUCIÓN REGENERANTE	14
9.5.1. <i>Por Tanque</i>	14
9.5.2. <i>Volumen al 1% por Tanque</i>	15
9.5.3. <i>Volumen de Solución de Hidróxido de Sodio al 47% por Tanque</i>	15
9.5.4. <i>Caudal de Regeneración</i>	16
9.5.5. <i>Tiempo de Pasaje de la Solución Regenerante</i>	16
9.6. ENJUAGUE LENTO	17
9.6.1. <i>Duración del Enjuague Lento</i>	17
9.7. ENJUAGUE RÁPIDO	18
9.8. RESERVA DE REGENERANTE	18
9.9. NEUTRALIZACIÓN	19
9.9.1. <i>Consumo de Anhídrido Carbónico por Tanque</i>	19
9.9.2. <i>Volumen de Agua Para la Neutralización</i>	19
9.9.3. <i>Tiempo de Neutralización</i>	20
9.9.4. <i>Reserva Operacional de Anhídrido Carbónico</i>	20
9.10. TIEMPO TOTAL DE REGENERACIÓN	21
9.11. VOLUMEN DE AGUA PARA LA REGENERACIÓN	21
9.12. PORCIENTO DE AGUA PARA EL PROCESO	22
10. BIBLIOGRAFÍA	23
11. EJEMPLO DE APLICACIÓN	24
11.1. DATOS PARA EL DISEÑO	24
11.2. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO – FLÚOR RESIDUAL PROMEDIO	24
11.3. DOSIS A SUMINISTRAR	24
11.4. MEZCLA DE AGUA CRUDA CON AGUA TRATADA	24
11.5. DIMENSIONAMIENTO	25
11.5.1. <i>Volumen Diario y Total Diario</i>	25
11.5.2. <i>Volumen y Tiempo Entre Regeneraciones</i>	26
11.5.3. <i>Volumen de Hueso</i>	27
11.5.4. <i>Dimensionamiento de los Tanques</i>	27

11.5.4.1. Caudal Horario	27
11.5.4.2. Sección Total de los Tanques	28
11.5.4.3. Número de Tanques.....	28
11.5.4.4. Diámetro de los Tanques.....	28
11.5.4.5. Altura del Manto	28
11.5.4.6. Altura de la Cámara de Expansión	29
11.5.4.7. Lecho de Sostén.....	29
11.5.4.8. Altura Total de la Generatriz Cilíndrica	29
11.5.5. <i>Solución Regenerante</i>	29
11.5.5.1. Por Tanque	29
11.5.5.2. Volumen al 1% de Hidróxido de Sodio por Tanque.....	29
11.5.5.3. Volumen de Solución de Hidróxido de Sodio al 47%.....	30
11.5.5.4. Caudal de Regeneración Para Cada Tanque	30
11.5.5.5. Tiempo de Pasaje de la Solución de Hidróxido de Sodio al 1% por Tanque	30
11.5.6. <i>Enjuague Lento</i>	30
11.5.7. <i>Enjuague Rápido</i>	31
11.5.8. <i>Reserva de Hidróxido de Sodio</i>	31
11.5.9. <i>Neutralización</i>	31
11.5.9.1. Consumo de Anhídrido Carbónico por Tanque	31
11.5.9.2. Volumen de Agua para la Neutralización por Tanque.....	32
11.5.9.3. Tiempo de Neutralización.....	32
11.5.9.4. Reserva de Anhídrido Carbónico.....	32
11.5.10. <i>Tiempo Total de Regeneración por Tanque</i>	32
11.5.11. <i>Volumen de Agua para Regeneración por Tanque</i>	32
11.5.12. <i>Porcentaje de Agua Para Proceso</i>	33
11.6. CONFIGURACIÓN FINAL.....	33
11.7. CAUDALES DE OPERACIÓN EN CADA TANQUE	33
11.8. ELECTROBOMBAS	34
11.8.1. <i>De Operación del Equipo</i>	34
11.8.2. <i>De Transvase y Regeneración</i>	34
11.9. TUBERÍAS	34
12. ANEXO: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARTICULARES PARA LA ADQUISICIÓN DE UNA PLANTA DE ABATIMIENTO DE FLÚOR UTILIZANDO HUESO MOLIDO 70 COMO MATERIAL INTERCAMBIADOR.....	36
12.1. Tanque Metálico Para el Material Intercambiador	36
12.2. MATERIAL INTERCAMBIADOR	37
12.3. SOPORTE DEL MATERIAL INTERCAMBIADOR	37
12.4. MATERIAL PARA LECHO DE SOSTÉN.....	38
12.5. TANQUE DE PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE (HIDRÓXIDO DE SODIO) DE REGENERANTE AL 1 %	38
12.6. TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE REGENERANTE (HIDRÓXIDO DE SODIO AL 47 %)	38
12.7. TANQUE CARBONATADOR.....	39
12.8. BOMBAS CENTRÍFUGAS DE TRANSVASE Y REGENERACIÓN DE HIDRÓXIDO DE SODIO.....	40

12.9. BATERÍAS DE TUBOS DE ANHÍDRIDO CARBÓNICO	41
12.10. MEDIDORES INSTANTÁNEOS DE CAUDAL	42
12.11. MEDIDOR TOTALIZADOR DE CAUDAL	42
12.12. VÁLVULAS	43
12.13. INTERCONEXIONES GENERALES	43
12.14. HIDRÓXIDO DE SODIO	43
12.15. DESAGÜES	43
12.16. MANÓMETROS	44
12.17. ELECTROAGITADOR	44
12.18. PISO DE LA SALA DE EQUIPOS	44

LISTA DE ILUSTRACIONES

TABLAS

Tabla 1. Relación temperatura versus dosis de flúor a suministrar.....	3
Tabla 2. Características del hueso 70	5
Tabla 3. Cargas superficiales de diseño	7
Tabla 4. Parámetros de diseño	8
Tabla 5. Relación flúor residual promedio versus capacidad de intercambio	8
Tabla 6. Relaciones velocidad de controlavado versus expansión	9
Tabla 7. Tiempo entre regeneraciones versus Valor Presente	27
Tabla 8. Diámetro de tuberías.....	34

FIGURAS

Figura 1. Localidades donde el tenor de flúor en el agua excede de 1,5 mg/l	2
Figura 2. Detalle falso fondo	14
Figura 3. Detalle del tanque metálico.....	35

PLANOS

Plano 1. Proceso de desfluorización – Esquemas de conexiones.....	45
--	----

1. INTRODUCCIÓN

Si bien no es un fenómeno a nivel mundial, en la República Argentina hay zonas donde solo se disponen de fuentes de provisión subterráneas, dada la inexistencia de cursos de aguas superficiales, lagos o lagunas en condiciones de ser explotados. Las escasas precipitaciones pluviales no permiten tampoco una solución mediante su captación debido a la concentración en determinados períodos del año o por requerir áreas y volúmenes de reserva antieconómicos o de improbable ubicación física.

El caso mencionado puede además complicarse ante la presencia de contenidos de flúor que superan en muchas ocasiones los tenores admitidos por las normas en vigencia.

Asimismo, una solución regional mediante un sistema integrado de acueductos tampoco suele ser factible por razones económicas, financieras o políticas en el corto plazo.

En la **Figura 1** se puede observar diversos lugares donde el tenor de flúor en las fuentes de provisión superan 1,5 mg/l.

Donde más abunda es en la provincia de La Pampa, en el sector limítrofe de la provincia de Buenos Aires con La Pampa hacia la altura de Coronel Dorrego y en el sur de la provincia de Córdoba. También se observa contenidos elevados de flúor en algunas áreas de las provincias de La Rioja, Santa Fé, San Luis, Santiago del Estero y Río Negro.

Es de hacer notar que en las aguas profundas del litoral del país, lo mismo que en los grandes ríos que la circundan, el contenido de flúor es escaso a muy escaso.

Entre la composición química del agua y su contenido de flúor no puede establecerse ninguna relación. Aparece tanto en aguas duras como en las blandas, poco o muy alcalinas, sulfatadas o no.

La fluorosis dental (dientes manchados) que se pueden observar en los habitantes que utilizan esas aguas es el mejor índice de la presencia de flúor en las aguas que han utilizado para la bebida en los primeros años de sus vidas y, sin lugar a dudas, cuanto más marrón es el veteado de sus dientes, tanto mayor el contenido de flúor del agua de bebida que utilizaron en los primeros 12 ó 14 años de sus vidas.

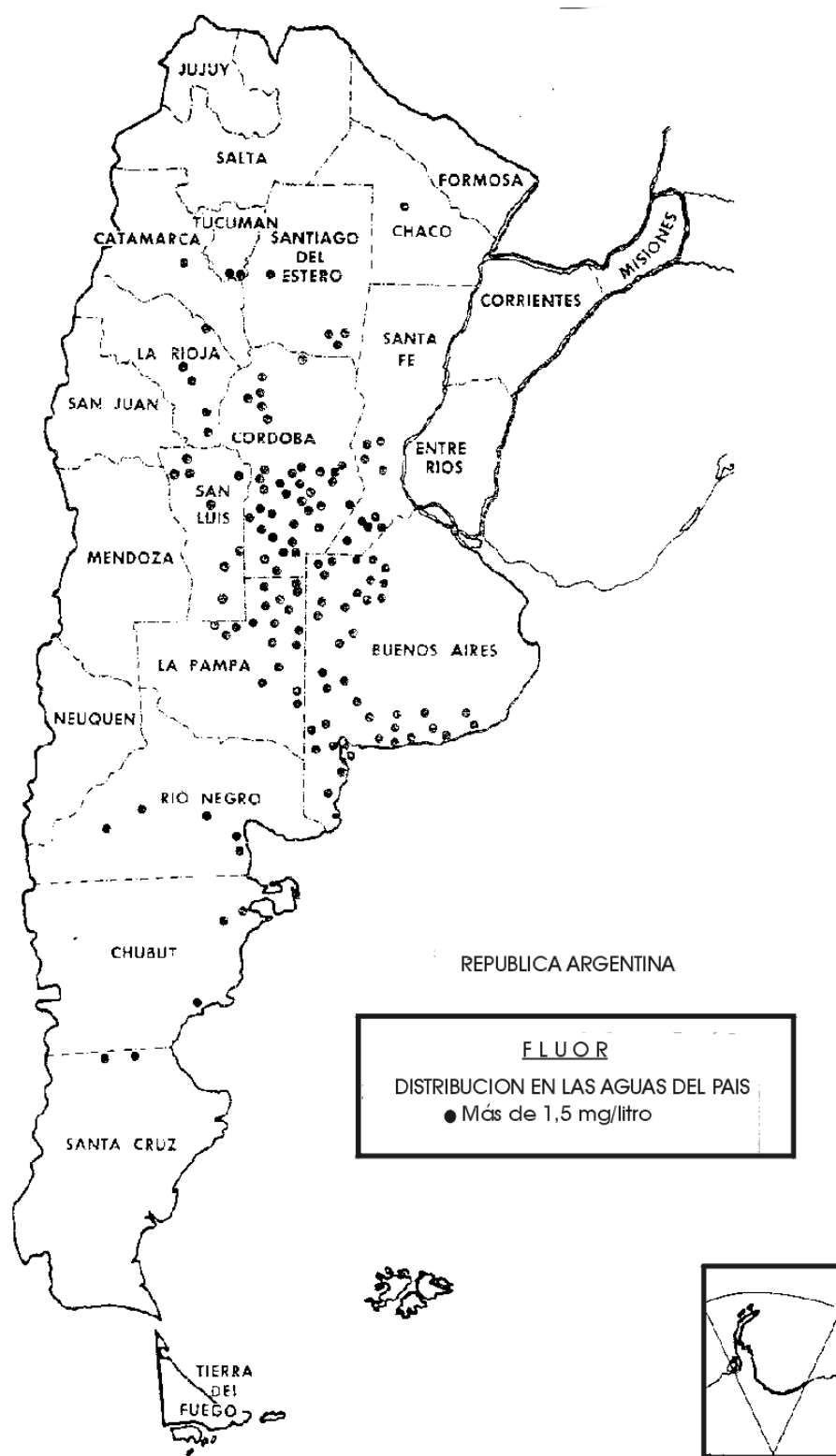


Figura 1. Localidades donde el tenor de flúor en el agua excede de 1,5 mg/l

2. EL FLÚOR Y LA SALUD

No hay dudas sobre la relación entre ciertas enfermedades tales como la fluorosis dental (esmalte de los dientes moteados), osteopetrosis y la presencia de determinadas cantidades de flúor en el agua bebida.

Experiencias realizadas prueban que la fluorosis dental se produce cuando la ingesta de flúor en el agua de consumo supera los 2 mg/l. Agua que contengan valores superiores agravan el problema y por un proceso de fijación se puede producir osteosclerosis asintomática, es decir la opacidad de los huesos a los rayos x, ante dosis superiores a los 8 mg/l.

La utilización durante largos períodos de aguas que tengan como efecto acumular dosis diarias superiores a 30 mg de flúor se traducen en la posibilidad de fluorosis anquilosante, osteosclerosis graves y osteoporosis. La rigidez de los ligamientos vertebrales y/o pelvis no es un mal de fácil tratamiento.

En cuanto a la dosis de flúor versus caries dentales, el aumento de 0,1 a 3,0 mg/l tiene un efecto sin duda protector. Todo radica en establecer un límite que maximice la protección con un mínimo de casos de esmalte moteado, es decir la fluorosis dental.

3. DOSIS PROMEDIO A ADOPTAR

Dada la relación directa existente entre la temperatura del lugar y la cantidad de agua bebida, es prudente adoptar límites de flúor relacionados a estos parámetros.

En nuestro país el Código Alimentario Argentino en su Capítulo XII, página 331, "Bebidas hídricas, agua y agua gasificada" así lo ha establecido. (Ver **Tabla 1**). Se hace notar que los valores publicados por el COFES en las "Normas de Calidad de Aguas de Bebida", serie Documentos Técnicos N°1, 1993, coinciden con los ahí indicados.

El Ministerio de Salud y Acción Social en su Resolución N° 494 del 07 de julio de 1994 "Agua Potable" fijó la obligatoriedad de su cumplimiento. En consecuencia se adoptan dichos valores para el diseño de las plantas de abatimiento de flúor.

Temperatura °C	Flúor mg/l	
	Mínimo	Máximo
10,0 a 12,0	0,9	1,7
12,1 a 14,6	0,8	1,5
14,7 a 17,6	0,8	1,3
17,7 a 21,4	0,7	1,2
21,5 a 26,2	0,7	1,0
26,3 a 32,6	0,6	0,8

Fuente: Código Alimentario Argentino

Tabla 1. Relación temperatura versus dosis de flúor a suministrar

donde:

temperatura : media máxima en un período no menor de 5 (cinco) años y sugerido de 10 (diez años)

flúor : dosis promedio a suministrar

4. PROCESOS DE DESFLUORACIÓN

Cuando la cantidad de flúor en el agua excede los valores máximos indicados en la **Tabla 1** es necesario un proceso de desfluoración.

Existen diversos procesos que logran abatir el flúor. Entre ellos se pueden mencionar:

- 1). Sales de magnesio.
- 2). Sales de aluminio.
- 3). Carbón activado.
- 4). Electrodiálisis.
- 5). Osmosis inversa.
- 6). Evaporación.
- 7). Alúmina activada.
- 8). Resinas de intercambio iónico.
- 9). Productos basados en fosfato tricálcico.

En el Capítulo VIII Tratamientos Especiales Numeral 5 “Remoción de Flúor” de la Fundamentación se describen estos procesos y se indican las ventajas y desventajas y de cada uno de ellos.

4.1. PROCESO CON FOSFATO TRICÁLCICO MEDIANTE HUESO MOLIDO

El Servicio Nacional de Agua Potable y Saneamiento Rural (S.N.A.P.) actualmente Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento (ENOHSA.), realizó en su oportunidad diversas experiencias sobre el uso del denominado “hueso molido” para la reducción de flúor, que condujeron al desarrollo de una tecnología mediante el paso por un lecho de este material.

En otra presentación se incluye una Planta de Intercambio Iónico que es utilizado para la eliminación de diferentes tipos de sales.

Teniendo en cuenta el antecedente se ha decidido presentar como complemento de las Normas el diseño de una Planta de Desfluoración basada en este método.

El “hueso molido”, que es la base del proceso se obtiene como un subproducto en los frigoríficos, el cual es lavado, desengrasado, molido y clasificado mediante tamices de mallas 20/40. Para su utilización como material intercambiador es sometido a un tratamiento mediante potasa cáustica al 30 % durante 30 minutos a 60 °C a fin de eliminar los restos de materias orgánicas y posteriormente neutralizado el exceso de alcalinidad mediante una solución ácida débil, para finalmente ser tamizado para cumplir con lo indicado en la **Tabla 2**.

El hueso molido denominado “hueso 70” por su composición de fosfato tricálcico tiene las siguientes características:

Características	Valor
Fosfato tricálcico	70 %
Humedad	5 %
Grasa	5 %
Fósforo	15 %
Coeficiente de uniformidad menor	2,50
Tamaño efectivo	0,45 a 0,55 mm
Peso específico aparente	700 a 800 kg / m ³
Peso específico absoluto	1400 a 1500 kg / m ³
Porcentaje de vacíos o porosidad	40 a 60 %
Tamiz US Sieves Serie ASTM E 11-61	11 – 61
n° 8 (2,38 mm) pasa	98 / 100 %
n° 30 (0,595 mm) pasa	0 / 5 %

Fuente: Cálculo de una planta desfluoradora. Aldo R. Dameri, Ref. n° 4

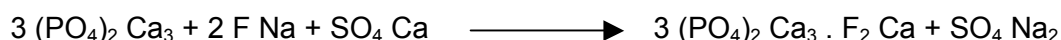
Tabla 2. Características del hueso 70

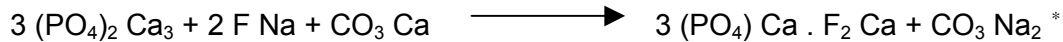
En el proceso de desfluoración puede interpretarse que la apatita del hueso más el flúor forman fluorapatita insoluble la cual durante la regeneración con hidróxido de sodio (soda cáustica) se transforma en hidroxiapatita y fluoruro de sodio, que es eliminado durante la regeneración.

La hidroxiapatita queda así en condiciones de reiniciar el ciclo.

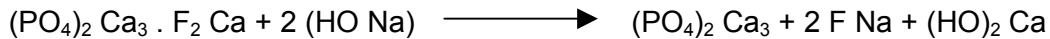
El mecanismo exacto de la reacción entre el fosfato tricálcico y el flúor no se conoce perfectamente. Se supone que además de una adsorción se verifica la formación de un complejo $(\text{PO}_4)_2 \text{Ca}_3 \cdot \text{F}_2 \text{Ca}$ (fluorapatita).

Se admite que la eliminación del flúor se debe a la formación de fluorapatita a expensas del fluoruro de sodio, fosfato tricálcico y sulfato o carbonato de calcio presente en el agua, que conduce a las siguientes reacciones:





Durante el proceso de regeneración con hidróxido de sodio la reacción se interpreta como:



en la que se obtiene nuevamente fosfato tricálcico y el fluoruro de sodio (soluble) es eliminado durante esta etapa del proceso.

Se destaca que el método presentado es sólo utilizable para la reducción de flúor. Si es necesaria la reducción de otras sales debe pensarse en otra solución tecnológica que, como se ha indicado, puede consistir en el proceso de intercambio iónico.

En las provincias de La Pampa y Buenos Aires se construyeron y operaron en diversas localidades plantas basadas en la tecnología descrita.

Actualmente y en razón que la producción del denominado “hueso 70” no es un producto de demanda industrial, sino una fabricación en cantidades limitadas bajo pedido, se ha discontinuado su operación por razones de mercado.

Se hace notar que durante el funcionamiento de las plantas instalados no se observaron anomalías en el proceso, siendo la reposición por pérdidas durante el contralavado originadas en el desgaste físico de las partículas, menores del 10 % en volumen por año.

5. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

5.1. OPERACIÓN NORMAL DE ABATIMIENTO

Durante esta parte del ciclo el agua percola por el manto del material intercambiador en sentido de arriba hacia abajo, lo que produce el abatimiento del flúor entregando un tenor residual estimado en 0,5 mg/l durante su carrera normal.

El valor del flúor comienza a elevarse hacia fines de la carrera operacional, con lo que se tiene un valor promedio de acuerdo a la capacidad de intercambio, nivel de regeneración y velocidades de pasaje adoptadas.

5.2. CONTRALAVADO

Se realiza a flujo inverso, de abajo hacia arriba y tiene por finalidades:

- La limpieza del manto intercambiador.

* Trelles, Larghi, Páez. El Problema Sanitario de las Aguas Destinadas a la Bebida Humana, con Contenidos Elevados de Arsénico, Vanadio y Flúor. Universidad de Buenos Aires, Instituto de Ingeniería Sanitaria. Publicación N° 4, 1970.

- El esponjamiento del mismo para facilitar la regeneración.

5.3. REGENERACIÓN

Consiste en el pasaje de la solución regenerante a los fines de producir la reacción indicada en el numeral 4.1.

5.4. ENJUAGUE LENTO

Su finalidad es eliminar los restos de regenerante que han quedado en el manto.

5.5. ENJUAGUE RÁPIDO

Es un complemento del enjuague lento.

5.6. NEUTRALIZACIÓN

Al ser la solución regenerante un medio fuertemente alcalino, aún luego del enjuague rápido el pH de salida es del orden de 10.

A estos fines se realiza el pasaje de una solución ácida débil, con agua saturada de anhídrido carbónico, hasta estabilizar el pH de salida en el valor del agua cruda.

Se está entonces en condiciones de reiniciar el ciclo de abatimiento.

6. PARÁMETROS

6.1. PARÁMETROS OPERACIONALES

Operación	Carga superficial $\text{m}^3 / \text{h m}^2$
Abatimiento	7
Contralavado	25/35
Regeneración	0,400
Enjuague rápido	7
Neutralización	7

Fuente: Cálculo de una planta desfluoradora. Aldo R. Dameri, Ref. n° 4

Tabla 3. Cargas superficiales de diseño

6.2. PARÁMETROS FÍSICOS, TEMPORALES Y ECONÓMICOS

Características	Valor
Altura del lecho intercambiador	0,60 a 1,50 m
Expansión por contralavado	65 %
Velocidad del agua en tuberías	1,00 a 1,50 m / s
Velocidad en tuberías de contralavado menor que	3,00 m / s
Duración del contralavado	5 a 10 minutos
Duración del enjuague rápido	5 a 10 minutos
Solubilidad del CO ₂ a 15°C y 15 m.a.m.	2,80 kg / m ³ H ₂ O
Neutralización	4 a 6 kg CO ₂ / m ³ de material intercambiador
Reserva de regenerante y neutralizante	30 a 60 días
Amortización de equipos	10 años
T.S.D. y / o Costo de Oportunidad del Capital	12 % anual
Cargas sociales	70 %

Fuente: Elaboración propia. (Aldo R. Dameri)

Tabla 4. Parámetros de diseño

7. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO

7.1. HUESO MOLIDO 70

Se adoptan, de acuerdo a lo expresado en la Referencia n° 2, las siguientes capacidades de intercambio a un nivel de regeneración de 18 [kg (HO Na) / m³ (hueso)] y a una carga superficial de regeneración de 0,4 [m³ / h m²].

Se entiende por capacidad de intercambio la cantidad de flúor expresada en gramos de ión flúor (F⁻) en relación a un metro cúbico de material intercambiador (hueso molido 70) a los valores de regeneración y carga superficial adoptados.

Flúor residual promedio mg / l	Capacidad de intercambio g / m ³
0,60	790
0,70	890
0,80	935
0,90	970
1,00	995
1,10	1010
1,20	1020

Fuente: Cálculo de una planta desfluoradora. Aldo R. Dameri, Ref. n°4

Tabla 5. Relación flúor residual promedio versus capacidad de intercambio

8. VELOCIDAD DE CONTRALAVADO

En el numeral 5.2 se han establecido los fines que debe cumplir el contralavado.

Dado que el esponjamiento del lecho intercambiador es una función de la temperatura del agua (al verlo su viscosidad) y del tamaño y graduación de las partículas (porosidad), que son los parámetros que determinan la velocidad de sedimentación en partículas discretas, con el material intercambiador de las características adoptado y considerando una temperatura del agua subterránea de 15°C para lograr la total fluidificación del lecho se deben adoptar velocidades de contralavado comprendidas entre 25 y 35 m³ / h m², las que llevan asociadas los siguientes valores de expansión del lecho:

Velocidad de contralavado m ³ / h m ²	Porosidad %	Expansión %
25	47	38
	54	20
30	47	45
	54	26
35	47	64
	54	43

Fuente: Cálculo de una planta desfluoradora. Aldo R. Dameri, Ref. n° 4

Tabla 6. Relaciones velocidad de controlavado versus expansión

9. DIMENSIONAMIENTO

9.1. VOLUMEN DIARIO Y TOTAL DIARIO DE AGUA A TRATAR

$$V_D [m^3 / día] = \text{dotación futura} [\ell / \text{hab. día}] \cdot \text{población futura} [\text{hab.}] \cdot \alpha_1 \cdot 1/1000 [\ell / m^3] \quad (1)$$

donde:

$V_D [m^3 / día]$: volumen diario a tratar

α_1 : coeficiente del día de máximo consumo anual

Se hace necesario incrementar el volumen diario para tener en cuenta los caudales de dilución de regenerante, contralavado, enjuague lento, enjuague rápido y neutralización estimados en un 5 %, por lo que finalmente el volumen total diario será:

$$V_T [m^3 / día] = 1,05 \cdot V_D \quad (2)$$

9.2. VOLUMEN ENTRE REGENERACIONES

La selección del tiempo entre regeneraciones y por ende el volumen de agua tratada entre las mismas V plantea un problema económico de rentabilidad.

Dado que el caso que nos ocupa debe estar enfocado a la selección de la variable más económica a la luz de la rentabilidad nacional se debería, problema de no sencilla resolución, trabajar con los denominados precios sombra (shadow prices) como precios de cuenta, que son funciones temporales y locales en la economía de un país, aplicando algunos de los criterios usualmente empleados como el Valor Presente Neto (NPV), la Tasa Interna de Retorno (TIR), la relación Costo – Beneficio (CB) o la relación Costo – Beneficios Netos (CBN).

Para nuestro trabajo se adopta el método del Valor Presente con las siguientes consideraciones:

- Se suponen que los beneficios son iguales en cada alternativa por lo que no se consideran.
- El costo anual del equipo comprende la amortización del mismo.
- No se considera la influencia de la obra civil, dado que su monto es similar para las distintas alternativas.
- El costo de operación sólo comprende el salario del personal encargado de la misma, pues el resto de sus componentes son comunes tales como insumos en drogas, personal administrativo, etc.
- Se adopta como horizonte 10 años.
- Se supone un valor residual cero para los equipos.
- Se considera un periodo de gracia en la devolución del préstamo de 3 años.
- Se adopta como Tasa Social de Descuento, correlato del costo de oportunidad del capital en las actividades privadas, el 12 % anual.

La relación que minimice el valor presente nos determinará el tiempo entre regeneraciones y en consecuencia el volumen correspondiente.

Se hace notar que de no adoptar un periodo de gracia el valor presente de las amortizaciones coincide con el costo inicial de inversión en equipos.

El valor presente queda expresado por

$$PV = \sum_{j=1}^n \frac{C}{(1+i)^j} \quad (3)$$

donde:

$PV [\$]$: valor presente

$C [\$]$: inversión o amortización en el período genérico j [año]

i : Tasa Social de Descuento anual, ver **Tabla 4**.

9.3. VOLUMEN DE MATERIAL INTERCAMBIADOR

$$V_H [m^3] = \frac{V \cdot \text{flúor en el agua} [g F^- / m^3]}{CI [g F^- / m^3 \text{ material intercambiador}]} \quad (4)$$

donde:

$V_H [m^3]$: volumen de material intercambiador

$V [m^3]$: volumen entre regeneraciones, ver numeral 9.2

$CI [g / m^3]$: capacidad de intercambio, ver Ref. n° 2

9.4. DIMENSIONES DE LOS TANQUES

Es usual la adopción de tanques cilíndricos de generatriz vertical y fondos toriesféricos.

9.4.1. Caudal Horario

$$Q_H [m^3 / h] = \frac{V_T}{T} \quad (5)$$

donde:

$Q_H [m^3 / h]$: caudal horario

$V_T [m^3 / día]$: volumen total diario de agua a tratar, ver (2)

$T [h / día]$: tiempo diario de funcionamiento

9.4.2. Sección Total de los Tanques

$$A [m^2] = \frac{Q_H}{U_P} \quad (6)$$

donde:

$A [m^2]$: área

$Q_H [m^3 / día]$: caudal horario, ver (5)

$U_P [m^3 / h m^2]$: velocidad de pasaje o carga superficial, ver **Tabla 3**

9.4.3. Número de Tanques

Si bien la industria metalúrgica suministra recipientes cilíndricos en presión con diámetros considerables, al ser el espesor del cuerpo cilíndrico una función del diámetro, la presión de diseño y la tensión admisible del material, así como las dificultades constructivas de los fondos toriesféricos, no es aconsejable superar los 2,50 m de diámetro, con un área de pasaje de aproximadamente 4,90 m².

$$N = \frac{A}{4,90} \quad (7)$$

donde:

N : número de tanques

$A [m^2]$: sección total de tanques, ver (6)

Se deberá adoptar en el diseño un número razonable, función de las condiciones locales de fabricación de los recipientes.

9.4.4. Diámetro de los Tanques

$$D [m] = \left(\frac{4A}{\pi N} \right)^{1/2} \quad (8)$$

donde:

$D [m]$: diámetro de los tanques

$A [m^2]$: sección total, ver (6)

N : número de tanques adoptados, ver (7)

9.4.5. Altura del Manto

Un buen diseño limita los valores a un mínimo de 0,60 m para evitar cortocircuitos en el manto y a un máximo de 1,50 m por razón de posible compactación del lecho con las consiguientes dificultades en el contralavado.

$$H_h [m] = \frac{V_H}{A} \quad (9)$$

donde:

$H_h [m]$: altura del manto

$V_H [m^3]$: volumen de material intercambiador, ver (4)

$A [m^2]$: sección total de pasaje, ver (6)

Se deberá ajustar la altura hasta estar comprendido entre los límites especificados.

9.4.6. *Altura de la Cámara de Expansión*

Según se ha establecido en los numerales 6.2. y 8. Su altura será:

$$H_E [m] = 0,65 \cdot H_h \quad (10)$$

donde:

$H_E [m]$: altura de la cámara de expansión

$H_h [m]$: altura del manto, ver (9)

9.4.7. *Lecho de Sostén*

El lecho de sostén tiene una función doble:

- 1). Como soporte del material intercambiador.
- 2). Completar el sistema de drenaje inferior, distribuyendo uniformemente el agua de contralavado y disminuyendo su energía cinética.

Puede adoptarse cualquiera de los sistemas usuales, por ejemplo, múltiple, laterales y capas de grava graduada, laterales envueltos en malla en lugar de capas de grava, o laterales con toberas de distribución. Se recomienda en especial proyectar un falso fondo plano, evitando así el volumen perdido del casquete interior del tanque, donde al efectuar la regeneración queda retenida la soda cáustica, con el consiguiente aumento de agua de enjuague por ser dificultosa su eliminación, dado que la solución de regenerante tiene una densidad mayor que el agua y es una zona de poca circulación del agua de contralavado. Ver **Figura 2**.

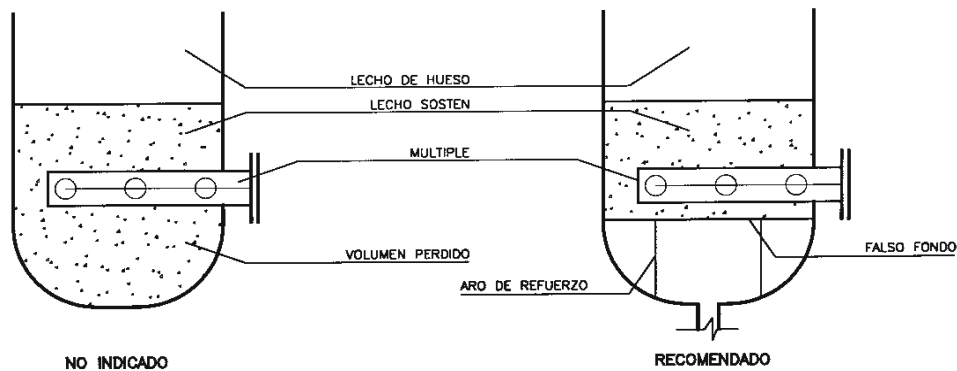


Figura 2. Detalle falso fondo

9.4.8. Altura Total de la Generatriz Cilíndrica

$$h[m] = H_L + H_h + H_E \quad (11)$$

donde:

$h[m]$: altura total de la generatriz, cilíndrica

$H_L[m]$: altura del lecho del sostén, ver numeral 9.4.7

$H_h[m]$: altura del manto, ver (9)

$H_E[m]$: altura de la cámara de expansión, ver (10)

9.5. SOLUCIÓN REGENERANTE

9.5.1. Por Tanque

$$C_R[kg] = \frac{V_H \cdot N_R}{N} \quad (12)$$

donde:

$C_R[kg]$: consumo de regenerante por tanque

$V_H[m^3]$: volumen de material intercambiador, ver (4)

$N_R[kg/m^3]$: nivel de regeneración (kilogramos de regenerante por m^3 de material intercambiador), ver Ref. n° 2

N : número de tanques, ver (7)

9.5.2. Volumen al 1% por Tanque

$$V_{1\%} [m^3] = 0,099 \left[\frac{m^3}{kg} \right] \cdot C_R \quad (13)$$

donde:

$V_{1\%} [m^3]$: volumen al 1% por tanque

$C_R [kg]$: consumo de regenerante por tanque, ver (12)

9.5.3. Volumen de Solución de Hidróxido de Sodio al 47% por Tanque

$$V_{47\%} [\ell] = 1,39 \left[\frac{\ell}{kg} \right] \cdot C_R \quad (14)$$

donde:

$V_{47\%} [\ell]$: volumen de solución de hidróxido de sodio al 47% por tanque

$C_R [kg]$: consumo de hidróxido de sodio por tanque y regeneración, ver (12)

De acuerdo a Perry John, Manual del Ingeniero Químico, Editorial UTEHA, Méjico, Third Edition, Reimpresión 1966, Tabla 111, página 263 la densidad de una solución de HON_a al 48% y una temperatura de 20 °C es:

$$\delta = 1,5065 \frac{g}{cm^3} \approx 1,5 \frac{Kg}{l}$$

por lo que:

$$\frac{Masa \text{ de } HON_a}{litro \text{ de solución}} = 1,5 \frac{Kg \text{ de solución}}{litro \text{ de solución}} \cdot 0,48 \frac{Kg \text{ } HON_a}{Kg \text{ de solución}}$$

$$\frac{Masa \text{ de } HON_a}{litro \text{ de solución}} = 0,72 \frac{Kg \text{ } HON_a}{litro \text{ de solución}}$$

considerando su inversa se obtiene finalmente:

$$1,39 \frac{litro \text{ (de solución)}}{Kg \text{ (} HON_a \text{)}}$$

9.5.4. Caudal de Regeneración

$$Q_R [m^3 / h] = \frac{U_R \cdot A}{N} \quad (15)$$

donde:

$Q_R [m^3 / h]$: caudal de regeneración

$U_R [m^3 / h m^2]$: velocidad o carga superficial de regeneración, ver **Tabla 3**

$A [m^2]$: sección total de los tanques, ver (6)

N : número de tanques, ver (7)

9.5.5. Tiempo de Pasaje de la Solución Regenerante

$$T_p [h] = \frac{V_{1\%}}{Q_R} \quad (16)$$

donde:

$T_p [h]$: tiempo de pasaje

$V_{1\%} [m^3]$: volumen al 1%, ver (13)

$Q_R [m^3 / h]$: caudal de regeneración, ver (15)

Es de hacer notar que adoptado un nivel de regeneración y la correspondiente carga superficial el tiempo de pasaje de la solución regenerante es una función de la forma en que se dispone el manto de material intercambiador: sección A y altura H_h .

Reemplazando se tiene:

$$T_p [h] = \frac{0,099 \cdot N_R \cdot A \cdot H_h}{V_R \cdot A} \quad (17)$$

Si

$$Cte = \frac{0,099 \cdot N_R}{V_R}$$

$$N_R [kg / m^3] = 18 \quad V_R [m^3 / h m^2] = 0,400$$

$$Cte = \frac{0,099 \cdot 18}{0,400} = 4,46 [h / m]$$

$$T_p [h] = 4,46 \left[\frac{h}{m} \right] \cdot H_h \quad (17 \text{ bis})$$

Razonando con un manto de altura 1,00 m el tiempo de pasaje será 4,46 horas al que adicionado al tiempo de enjuague lento supuesto de 2,30 horas insume un total de aproximadamente 7 horas.

Una solución posible para disminuir este tiempo es adoptar el sistema denominado "counter flow" que consiste en un ingreso dual de la solución regenerante por el distribuidor superficial normal de los diseños y por el fondo del manto, el que es retirado por un colector adicional situado en la parte media del manto.

Se logra así disminuir el camino a recorrer por el regenerante a la mitad y en igual proporción el tiempo de pasaje.

9.6. ENJUAGUE LENTO

Como se ha indicado en el numeral 5.4. su objetivo es continuar desplazando la solución regenerante hasta finalizar su pasaje por el manto de material intercambiador por lo que su carga superficial es igual a la de regeneración.

9.6.1. Duración del Enjuague Lento

Finalizada la introducción de la solución regenerante el volumen ocupado por la misma en el manto de material intercambiador es:

$$V_s [m^3] = \frac{A \cdot 0,10 + \text{porosidad} \cdot V_H}{N} \quad (18)$$

donde:

$V_s [m^3]$: volumen ocupado en cada tanque

$A [m^2]$: área total de los tanques, ver (6)

$V_H [m^3]$: volumen de material intercambiador, ver (4)

N : número de tanques, ver (7)

finalmente se tiene:

$$T_s [h] = \frac{V_s}{Q_R} \quad (19)$$

donde:

$T_s [h]$: tiempo de pasaje para el enjuague lento en cada tanque

$Q_R [m^3 / h]$: caudal de regeneración, ver (15)

9.7. ENJUAGUE RÁPIDO

Es un complemento del enjuague lento con la finalidad de eliminar los posibles restos de la solución regenerante del manto de material intercambiador.

Su caudal se expresa por:

$$Q_F [m^3 / h] = \frac{Q_H}{N} \quad (20)$$

donde:

$Q_F [m^3 / h]$: caudal para el enjuague rápido

$Q_H [m^3 / h]$: caudal horario, ver (5)

N : número de tanque, ver (7)

9.8. RESERVA DE REGENERANTE

Es prudente disponer de 60 días para este insumo como seguridad operacional de la planta de tratamiento.

$$R_R [kg] = C_R \cdot n^{\circ} \text{ de regeneraciones / día} \cdot 60 [\text{días}] \cdot N \quad (21)$$

donde:

$R_R [kg]$: reserva de regenerante

$C_R [kg]$: consumo de regenerante, ver (12)

N : número de tanques, ver (7)

Si se optara por el empleo de hidróxido de sodio industrial en solución al 47 / 48% el volumen necesario será:

$$V_R [m^3] = 1,39 \frac{l}{Kg} \cdot \frac{1}{1000} \frac{m^3}{l} \cdot R_R = 0,00139 \cdot R_R \quad (22)$$

9.9. NEUTRALIZACIÓN

La misma se realizará con una solución de anhídrido carbónico en agua.

9.9.1. Consumo de Anhídrido Carbónico por Tanque

$$C [kg] = 6 \left[\frac{kg \text{ CO}_2}{m^3 \text{ intercambiador}} \right] \cdot \frac{V_H}{N} \quad (23)$$

donde:

$C [kg]$: consumo de CO_2

$V_H [m^3]$: volumen de material intercambiador , ver (4)

N : número de tanques, ver (7)

9.9.2. Volumen de Agua Para la Neutralización

$$V_N [m^3] = \frac{C}{\eta \cdot sat} \quad (24)$$

donde:

$V_N [m^3]$: volumen de agua para la neutralización

$C [kg]$: consumo de anhídrido carbónico por tanque, ver (23)

η : rendimiento del proceso 0,70

De acuerdo a la referencia indicada en el numeral 9.5.3, Tabla 140 página 282, las solubilidades del anhídrido carbónico a presión atmosférica normal son:

Temperatura °C	Solubilidad Gramos / 100 gramos de agua
10	0,2318
20	0,1688

Para una temperatura de 15 °C se adopta la media aritmética, por lo que:

Solubilidad a 15 °C = $(0,2318 + 0,1688) / 2 = 0,2003 \text{ g CO}_2/100 \text{ g H}_2\text{O}$

Analizando el esquema de conexiones adjunto, la presión en el tanque carbonatador se estima en un mínimo de 4 m.c.a. (relativos) por lo que de acuerdo a la ley de Henry (ver Mellor J.W. Química Inorgánica Moderna, Editorial El Ateneo, Bs. As., 1951) la solubilidad será directamente proporcional a la relación entre la presión absoluta (14 m.c.a. = 1,4 Kg/cm²) actuante en el mencionado tanque carbonatador y la presión absoluta (1 Kg/cm²) atmosférica normal, por lo que:

$$sat = 0,2003 \frac{g (CO_2)}{100 g (H_2O)} \cdot \frac{kg}{1000 g} \cdot \frac{1000000 g}{m^3} \cdot \left(\frac{1,4 kg / cm^2}{1,0 kg / cm^2} \right)$$

$$sat = 2,80 \frac{kg (CO_2)}{m^3 (H_2O)}$$

$Sat \left[\frac{kg CO_2}{m^3 H_2O} \right]$: solubilidad del anhídrido carbónico en agua a 15° C y 1,5 kg /cm
(absolutos)

9.9.3. Tiempo de Neutralización

$$T_N [h] = \frac{V_N}{Q_F} \quad (25)$$

donde:

$T_N [h]$: tiempo de neutralización

$V_N [m^3]$: volumen de agua para la neutralización, ver (24)

$Q_F [m^3/h]$: caudal de enjuague rápido, ver (20)

9.9.4. Reserva Operacional de Anhídrido Carbónico

Con idéntico criterio que el expresado en el numeral 9.8. se tiene:

$$R_{CO_2} [kg] = C \cdot n^{\circ} de \frac{regeneraciones}{día} \cdot 60 [días] \cdot N \quad (26)$$

donde:

$R_{CO_2} [kg]$: reserva operacional

$C [kg]$: consumo de anhídrido carbónico por tanque, ver (23)

N : número de tanques, ver (7)

9.10. TIEMPO TOTAL DE REGENERACIÓN

$$T_T [h] = T_c + T_p + T_s + T_F + T_N \quad (27)$$

donde:

$T_T [h]$: tiempo total

$T_c [h]$: tiempo de contralavado (5 a 10 minutos) $\cong 0,15 [h]$, ver **Tabla 4**

$T_p [h]$: tiempo de pasaje de la solución regenerante, ver (16)

$T_s [h]$: tiempo de enjuague lento, ver (19)

$T_F [h]$: tiempo de enjuague rápido 0,15 [h], ver **Tabla 4**

$T_N [h]$: tiempo de neutralización, ver (25)

9.11. VOLUMEN DE AGUA PARA LA REGENERACIÓN

$$V_{AP} [m^3] = \frac{V_C \cdot A \cdot 0,15 [h]}{N} + (V_{1\%} - V_{47\%}) + V_s + Q_F \cdot 0,15 [h] + V_N \quad (28)$$

donde:

$V_{AP} [m^3]$: volumen necesario para regeneración en cada tanque

$V_C [m^3 / hm^2]$: carga superficial de contralavado, ver **Tabla 3**

$A [m^2]$: sección total de los tanques, ver (6)

N : número de tanques, ver (7)

$V_{1\%} [m^3]$: volumen de hidróxido de sodio al 1% por tanque, ver (13)

$V_{47\%} [m^3]$: volumen de hidróxido de sodio al 47 % por tanque, ver (14)

$V_s [m^3]$: volumen para enjuague lento, ver (18)

$Q_F [m^3/h]$: caudal de enjuague rápido, ver (20)

$V_N [m^3]$: volumen de agua para neutralización, ver (24)

9.12. PORCIENTO DE AGUA PARA EL PROCESO

$$P [\%] = N \cdot \frac{V_{AP}}{V} \cdot 100 \quad (29)$$

donde:

$P [\%]$: porcentaje de agua necesaria al proceso

$V_{AP} [m^3]$: volumen de agua necesaria para la regeneración, ver (27)

$V [m^3]$: volumen entre regeneraciones, ver numeral 9.2

N : número de tanques, ver (7)

Se recomienda convalidar lo adoptado en el numeral 9.1. que corresponde al 5%

10. BIBLIOGRAFÍA

- Botteri A., Dameri A.R. Estudio Técnico-Económico para la puesta en marcha de Plantas de Desfluoración en la República Argentina. Secretaría de Estado de Salud Pública. República Argentina. Revista Ingeniería Sanitaria, AIDIS Sección Argentina, para el XI Congreso Interamericano, Ecuador. 1968.
- Calegaro, De Albarado, Ricaldoni. El fluor y los abastos de agua. Su exceso y posibilidades de eliminación. La Plata. Junio 1957.
- COFES. Normas de calidad de aguas de bebida. Documentos técnicos n° 1, 1993.
- Dameri Aldo R. Cálculo de una Planta Desfluoradora empleando hueso molido como Material Intercambiador. Revista Ingeniería Sanitaria, AIDIS Sección Argentina, para el XIV Congreso Interamericano, México. 1974.
- Inhouds E., Potel Junot M. Planta de abatimiento de flúor. 6° Congreso Argentino de Saneamiento, trabajo n° 68.
- Maier Franz J. Defluoration of Municipal Water Supplies. I.A.W.W.A.
- Mair Franz J. Manual of water fluoridation practice.
- Mair Franz J. Fluoración del agua potable. Publicación científica n° 203 OPS-OMS, 1971.
- Mellor J.W. Química Inorgánica Moderna. Editorial El Ateneo. Buenos Aires, Argentina. 1951. 4ª Edición Revisada.
- OMS. Comité de expertos en fluoración del agua. Informe n° 146.
- Perry John. Manual del Ingeniero Químico. Editorial UTEHA, México. 1966. Tercera Edición, Reimpresión 1966.
- Trelles, Bach. El problema de la eliminación del flúor en las aguas de bebida. Ensayos de corrección de las aguas arsénico vanádicas fluoradas. Boletín O.S.N., N° 47. Buenos Aires, Argentina. 1941.
- Trelles, Larghi, Paez. El problema sanitario de las aguas destinadas a la bebida humana, con contenidos elevados de arsénico, vanadio y flúor. Publicación n° 4. IIS, 1970.

11. EJEMPLO DE APLICACIÓN

11.1. DATOS PARA EL DISEÑO

Flúor en el agua a tratar	5 mg/l
Horizonte de diseño	10 años
Población futura	2.000 hab.
Dotación pico (máxima diaria anual) futura	120 l/hab. día
Tiempo diario de funcionamiento	8 h/día
Temperatura media máxima	14 °C

11.2. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO – FLÚOR RESIDUAL PROMEDIO

De la **Tabla 5** se adopta:

$$C.I. = 995 \text{ g/m}^3$$

Residual promedio = 1,00 mg/l

11.3. DOSIS A SUMINISTRAR

De la **Tabla 1**:

Dosis a suministrar = 1,5 mg/l

11.4. MEZCLA DE AGUA CRUDA CON AGUA TRATADA

$X \cdot \text{Residual promedio} + y \cdot \text{Flúor agua cruda} = \text{Dosis a suministrar}$

$$x + y = 1,00$$

$$y = 1,00 - x$$

donde

x: proporción agua tratada

y: proporción agua cruda

luego se tiene:

$$x \cdot 1,00 + (1,00 - x) \cdot 5,00 = 1,50$$

finalmente

$$x = 0,875$$

$$x = 87,5 \%$$

$$y = 12,5 \%$$

11.5. DIMENSIONAMIENTO

11.5.1. Volumen Diario y Total Diario

De (1):

$$V_D [m^3/día] = x \cdot d_f \cdot p_f \cdot \alpha_1 \cdot 1/1000$$

α_1 : está incluido en la dotación futura, luego $\alpha_1 = 1.00$

$$V_D \left[\frac{m^3}{día} \right] = 0,875 \cdot 120 \cdot 2000 / 1000$$

$$V_D \left[\frac{m^3}{día} \right] = 210,00$$

De (2):

$$V_T \left[\frac{m^3}{día} \right] = 1,05 \cdot 210,00$$

$$V_T \left[\frac{m^3}{día} \right] = 220,50$$

11.5.2. Volumen y Tiempo Entre Regeneraciones

De (3)

$$PV = \sum_{j=1}^n \frac{C}{(1+i)^j} = \left[\frac{i}{1-(1+i)^{-n}} \cdot \frac{1}{(1+i)} \cdot \frac{\frac{1}{(1+i)^{n+u}} - \frac{1}{(1+i)^u}}{\frac{1}{(1+i)} - 1} \right] C$$

donde

n : horizonte = 10 años

u : período de gracia = 3 años

C { \$ } : precio del equipo

PV_i [\$] = 0,712 C

En el precio de los equipos se ha considerado: elaboración de la ingeniería de detalle, provisión, construcción, transporte, montaje, seguro, prueba hidráulica, puesta en marcha, operación durante dos (2) meses y todo elemento para terminar la encomienda de acuerdo a las reglas del arte y en conformidad a los Pliegos de Especificaciones.

En lo que hace al operador se ha establecido un salario de $1500 \left[\frac{\$}{mes} \right]$ afectado de 70% de cargas sociales por lo que la apropiación a cada regeneración será:

$$AP \left[\frac{\$}{año} \right] = \frac{13}{12} \cdot 1500 \left[\frac{\$}{mes} \right] \cdot 1,70 / 22,5 \left[\frac{día}{mes} \right] \cdot 12 \left[\frac{mes}{año} \right] \cdot d \left[\frac{día}{mes} \right]$$

$$AP \left[\frac{\$}{año} \right] = 1473 \cdot d$$

y en consecuencia

$$PV_{AP} = \left[\frac{1}{(1+i)^n} \cdot \frac{\frac{1}{(1+i)^n} - 1}{\frac{1}{(1+i)} - 1} \right] \cdot 1473 \cdot d$$

$$PV_{AP[\$]} = 3003 \cdot d$$

Tiempo día	n $\frac{\text{día}}{\text{mes}}$	Equipos \$	PV _I \$	PV _{AP} \$	PV \$
3	10,0	140.000	99.649	30.027	129.676
4	7,50	146.000	103.920	22.520	126.440
5	6,00	151.000	107.479	18.016	125.495
6	5,00	155.500	110.682	15.013	125.695
7	4,29	159.500	113.529	12.881	126.410

Fuente: elaboración propia. (Aldo R. Dameri)

Tabla 7. Tiempo entre regeneraciones versus Valor Presente

Dado que el menor PV corresponde a 5 días

$$V[m^3] = 5 \cdot 220,5$$

$$V[m^3] = 1102,50$$

11.5.3. Volumen de Hueso

De (4):

$$V_H[m^3] = \frac{1102,50 \cdot 5,00}{995}$$

$$V_H[m^3] = 5,54$$

11.5.4. Dimensionamiento de los Tanques

11.5.4.1. Caudal Horario

De (5):

$$Q_H \left[\frac{m^3}{h} \right] = \frac{220,50}{8}$$

$$Q_H \left[\frac{m^3}{h} \right] = 27,56$$

11.5.4.2. Sección Total de los Tanques

De (6):

$$A[m^2] = \frac{27,56}{7}$$

$$A[m^2] = 3,94$$

11.5.4.3. Número de Tanques

De (7):

$$N = \frac{3,94}{4,90}$$

$$N = 0,80$$

Por razones de seguridad y buenas reglas de diseño adoptaremos un mínimo de dos (2) tanques, por lo que finalmente:

$$N = 2$$

11.5.4.4. Diámetro de los Tanques

De (8):

$$D[m] = \left(\frac{4 \cdot 3,94}{3,14 \cdot 2} \right)^{1/2}$$

$$D[m] = 1,58$$

11.5.4.5. Altura del Manto

De (9):

$$H_h[n] = \frac{5,54}{3,94}$$

$$H_h[m] = 1,41 \quad (\text{verifica altura máxima})$$

11.5.4.6. Altura de la Cámara de Expansión

De (10):

$$H_E [m] = 0,65 \cdot 1,41$$

$$H_E [m] = 0,91$$

11.5.4.7. Lecho de Sostén

Se adopta un sistema compuesto de múltiple, laterales con boquillas y capa de blinder o “arena torpedo” y falso fondo plano.

$$H_L [m] = 0,15$$

11.5.4.8. Altura Total de la Generatriz Cilíndrica

De (11):

$$h [m] = 0,15 + 1,41 + 0,91$$

$$h [m] = 2,47$$

11.5.5. Solución Regenerante

11.5.5.1. Por Tanque

De (12):

$$C_R [kg] = \frac{5,54 \cdot 18}{2}$$

$$C_R [kg] = 49,86$$

11.5.5.2. Volumen al 1% de Hidróxido de Sodio por Tanque

De (13):

$$V1\% [m^3] = 0,099 \cdot 49,86$$

$$V1\% [m^3] = 4,94$$

11.5.5.3. Volumen de Solución de Hidróxido de Sodio al 47%

De (14):

$$V_{47\%} [l] = 1,39 \cdot 49,86$$

$$V_{47\%} [l] = 69,31 \quad (\text{por tanque})$$

11.5.5.4. Caudal de Regeneración Para Cada Tanque

De (15):

$$Q_R \left[\frac{m^3}{h} \right] = \frac{0,400 \cdot 3,94}{2}$$

$$Q_R \left[\frac{m^3}{h} \right] = 0,79$$

11.5.5.5. Tiempo de Pasaje de la Solución de Hidróxido de Sodio al 1% por Tanque

De (16):

$$T_p [h] = \frac{4,94}{0,79}$$

$$T_p [h] = 6,25$$

Dado el valor determinado se adopta el sistema de flujos opuestos, con lo que tiempo disminuye a la mitad, por lo que

$$T_p [h] = 3,13$$

11.5.6. Enjuague Lento

De (18):

$$V_s [m^3] = \frac{3,94 \cdot 0,10 + 0,50 \cdot 5,54}{2}$$

$$V_s [m^3] = 1,58 \quad (\text{por tanque})$$

De (19):

$$T_S [h] = \frac{1,58}{0,79}$$

$$T_S [h] = 2,00$$

11.5.7. Enjuague Rápido

De (20):

$$Q_F \left[\frac{m^3}{h} \right] = \frac{27,56}{2}$$

$$Q_F \left[\frac{m^3}{h} \right] = 13,78$$

11.5.8. Reserva de Hidróxido de Sodio

De (21):

$$R_R [kg] = 49,86 \cdot \frac{1}{5} \cdot 60 \cdot 2$$

$$R_R [kg] = 1196,64$$

De (22):

$$V_R [m^3] = 0,00139 \cdot 1196,64$$

$$V_R [m^3] = 1,66 \quad (\text{de solución al 47\%})$$

11.5.9. Neutralización

11.5.9.1. Consumo de Anhídrido Carbónico por Tanque

De (23):

$$C [kg] = 6,00 \cdot 5,54 / 2$$

$$C [kg] = 16,62$$

11.5.9.2. Volumen de Agua para la Neutralización por Tanque

De (24):

$$V_n [m^3] = \frac{16,62}{0,70 \cdot 2,80}$$

$$V_n [m^3] = 8,48$$

11.5.9.3. Tiempo de Neutralización

De (25):

$$T_n [h] = \frac{8,48}{13,78}$$

$$T_n [h] = 0,62$$

11.5.9.4. Reserva de Anhídrido Carbónico

De (26):

$$R_{CO_2} [kg] = 16,62 \cdot \frac{1}{5} \cdot 60 \cdot 2$$

$$R_{CO_2} [kg] = 398,88$$

11.5.10. Tiempo Total de Regeneración por Tanque

De (27):

$$T_i [h] = 0,15 + 3,13 + 2,00 + 0,15 + 0,62$$

$$T_i [h] = 6,05$$

11.5.11. Volumen de Agua para Regeneración por Tanque

De (28):

$$V_{AP} [m^3] = \frac{35 \cdot 3,94 \cdot 0,15}{2} + 4,94 - 0,069 + 1,58 + 13,78 \cdot 0,15 + 8,48$$

$$V_{AP} [m^3] = 27,34$$

11.5.12. Porciento de Agua Para Proceso

De (29):

$$p [\%] = 2 \cdot \frac{27,35}{1102,50} \cdot 100$$

$$p [\%] = 4,96$$

verifica la hipótesis adoptada en el numeral 5.1 de 5%.

11.6. CONFIGURACIÓN FINAL

Se adopta la siguiente configuración:

- Equipo compuesto por dos (2) tanques de operación.
- Un (1) tanque en stand by (reserva) por razones operacionales y de futuros mantenimientos.

tal cual se puede observar en el plano “Esquema de Conexiones”.

11.7. CAUDALES DE OPERACIÓN EN CADA TANQUE

Finalmente los valores a adoptar son:

Operación de desfluoración	14 m ³ /h
Contralavado	69 m ³ /h
Regeneración	0,80 m ³ /h
Enjuague lento	0,80 m ³ /h
Enjuague rápido	14 m ³ /h
Neutralización	14 m ³ /h

11.8. ELECTROBOMBAS

11.8.1. De Operación del Equipo

Su conjunto deberá suministrar el caudal de operación de los dos (2) tanques, es decir 28 m³/h, más el tercero en proceso de regeneración que suma un total de 42 m³/h a una altura manométrica de elevación suficiente para entregar el agua tratada al tanque elevado o cisterna de reserva.

Así mismo deberán poder cubrir el caudal de contralavado de cada tanque, 69 m³/h, a una presión no menor de 1kg/cm² equivalente a 10 m.c.a.

11.8.2. De Transvase y Regeneración

El o los equipos que cumplirán estas operaciones serán dimensionados en su condición más crítica de regeneración, con un caudal de 0,80 m³/h a una altura manométrica de elevación de 1kg/cm² (10 m.c.a.) verificando que el tiempo de transvase a la altura de elevación requerida no exceda de una (1) hora.

11.9. TUBERÍAS

De acuerdo a lo indicado en la **Tabla 4** “Parámetros de Diseño”, en relación a las velocidades en tubería se tiene:

Posición	Caudal M ³ /h	Velocidad m/s	Diámetro mm
Ingreso general	42	1,49	100
Ingreso a tanques	14	0,88	75
Salida de tanques	14	0,88	75
Salida general	28	0,99	100
Contralavado	69	2,44	100
Regeneración	0,80	0,87	18

Fuente: elaboración propia. (Aldo R. Dameri)

Tabla 8. Diámetro de tuberías

Dado que las diversas tuberías y sus correspondientes válvulas de operación cumplen funciones duales, se adoptan finalmente:

Línea de ingreso y salida general	DN 100
Cuadro de operación de los tanques	DN 100

Línea de regeneración

DN 18

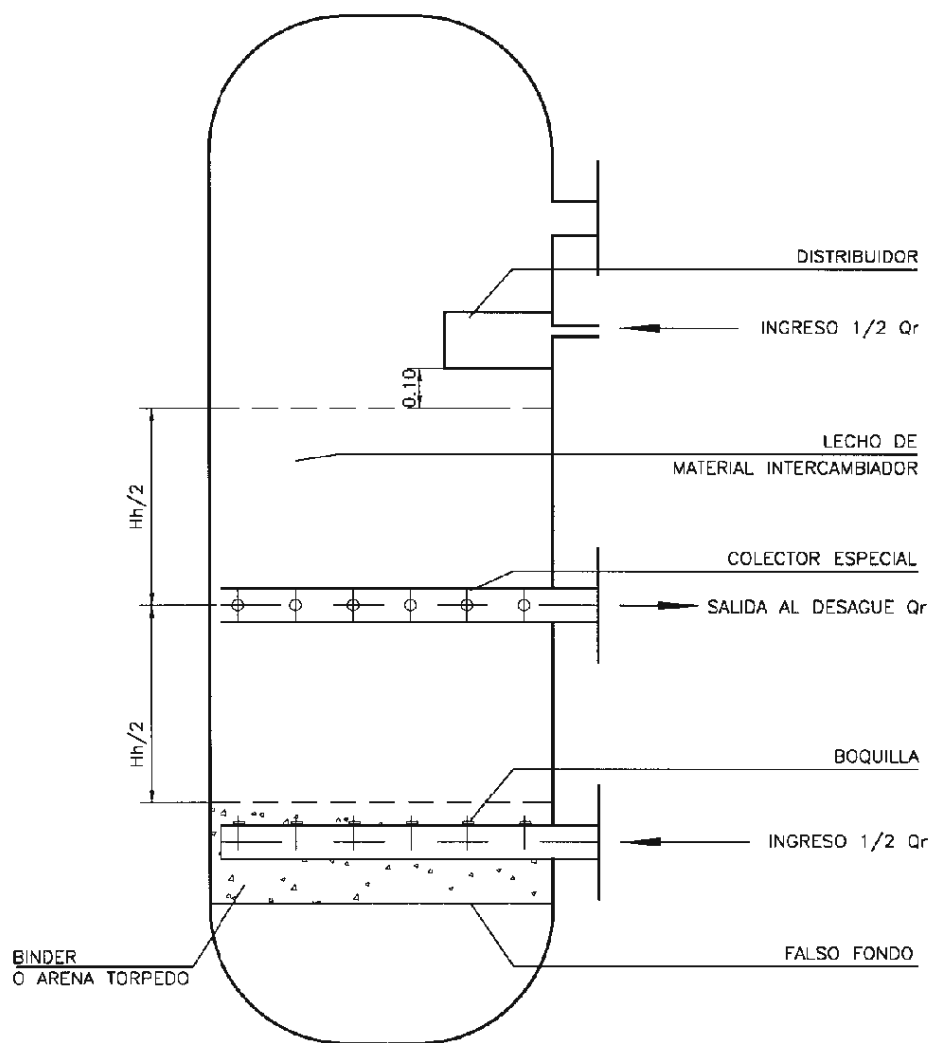


Figura 3. Detalle del tanque metálico

12. ANEXO: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARTICULARES PARA LA ADQUISICIÓN DE UNA PLANTA DE ABATIMIENTO DE FLÚOR UTILIZANDO HUESO MOLIDO 70 COMO MATERIAL INTERCAMBIADOR

Todos los elementos a suministrar deberán cumplir con las normas IRAM (Instituto Argentino de Racionalización de Materiales), ISO (International Organization for Standardization) o en su defecto la de algún ente normatizador de reconocida importancia internacional tales como AFNOR (Asociación Francesa de Normalización), ANSI (American National Standard Institute), ASME (American Society of Mechanical Engineers), ASTM (American Society for Testing and Materials), AWS (American Welding Society), AWWA (American Water Works Association), Hydraulic Institute Standards.

Todo otro elemento a suministrar que no cuente con normalización de las antes mencionadas instituciones deberán ser aprobados antes de su empleo por el ENOHSA.

12.1. Tanque Metálico Para el Material Intercambiador

Será diseñado en un todo de acuerdo al BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE del ASME, tomo VIII UNFIRED PRESSURE VESSELS, edición 1971 o posterior.

Su forma será cilíndrica de eje vertical, con fondos bombeados (toriesféricos o semielípticos), en chapa de acero al carbono o inoxidable SAE (ANSI) 304.

Diámetro	m
Altura Generatriz Cilíndrica	m
Presión de trabajo	kg/cm ²

Tendrá una entrada de hombre con un diámetro no menor de 0,50 m. El tanque apoyará mediante por lo menos tres patas que no ejercerán sobre el piso una presión superior a kg/cm².

A la altura del nivel superior del manto de hueso llevará un visor de vidrio de 0,10 m de ancho por 0,40 m de alto.

Será provisto de un falso fondo plano, sustentado, de un sistema de drenaje inferior, distribuidor de regenerante independiente a nivel del lecho y colector superior.

En el caso de un diseño "counter flow", será provisto además del correspondiente distribuidor a la mitad de la altura del manto intercambiador.

En caso de ser constituido en chapa de acero al carbono Interiormente irá cubierto de por lo menos dos manos gruesas a pincel o soplete, superando el espesor de 150 micrones, de pintura epoxi bituminosa u otro tipo de material que garantice una protección igual o superior, previo arenado de la superficie de aplicación y exteriormente previa limpieza con un disolvente para eliminar grasas, aceites etc. y eliminación de la herrumbre por

cepillado, rasqueteado, esmerilado, viruteado, arenado y/o solución desoxidante, será pintado con dos manos de fondo antióxido sintético de cromato de zinc y dos manos de esmalte sintético en color a elección de la Inspección Técnica.

Estará provisto de las conexiones necesarias para poder operar el equipo: entrada lateral superior del agua cruda, salida central del agua tratada, entrada lateral al nivel del lecho de regenerante e intermedia (counter flow), purga de aire superior en diámetro mínimo de 1/4" (6 mm) y grifo toma muestra ubicado en la línea de salida de agua tratada.

12.2. MATERIAL INTERCAMBIADOR

Será hueso molido con un tratamiento previo de desengrase con potasa cáustica (HOK) al 30%, durante 30 minutos y a una temperatura de 60° C.

Sus características serán:

Fosfato tricálcico	70 %
Humedad	5 %
Grasa	5 %
Fósforo	15 %
Coeficiente de uniformidad	menor 2,50
Tamaño efectivo	0,45 a 0,55 mm
Peso específico aparente	0,7 a 0,8 t/m ³
Peso específico absoluto	1,4 a 1,5 t/m ³
Porcentaje de vacíos	40 a 60 %
Tamiz US SIEVES SERIE ASTM E 11-61	
8 (2,38 mm) Por ciento que pasa	98 -100
30 (0,595 mm) Por ciento que pasa	0 – 5

Se deberá proveer un volumen de ... m³, con una altura de lecho ... m.

12.3. SOPORTE DEL MATERIAL INTERCAMBIADOR

Está constituido por un falso fondo con boquillas distribuidoras de plástico o múltiple y laterales con o sin toberas.

El fabricante podrá proponer otros sistemas de soporte del lecho cuya aceptación quedará a cargo del licitante.

12.4. MATERIAL PARA LECHO DE SOSTÉN

En caso de ser necesario el empleo de material para lecho de sostén (grava, binder, arena) será de origen silíceo y no perderá más del 5 % en peso tratado con ácido clorhídrico al 40 %, a una temperatura de 20° C, durante 24 horas.

12.5. TANQUE DE PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE (HIDRÓXIDO DE SODIO) DE REGENERANTE AL 1 %

Será cilíndrico de eje vertical.

Tendrá las siguientes dimensiones:

Diámetro	m
----------	---

Altura Generatriz cilíndrica	m
------------------------------	---

El material será chapa de acero IRAM 1010,1015 o 1020, Norma IRAM – IAS U 500 – 600: 1987, con un espesor no menor de 4,7 mm (3/16”) o acero inoxidable SAE (ANSI) 304, u otro material aprobado por el ENOHSA.

Estará provisto de refuerzos en el sentido de las directrices circulares para evitar su deformación y/o vibración, especialmente al trabajar el agitador, y de filtro para evitar la introducción de cuerpos extraños en la línea de bombeo.

Apoyará mediante por lo menos tres patas que no ejercerán sobre el piso una presión superior de ... kg/cm².

En caso de ser construido en chapa de acero al carbono exterior e interiormente irá recubierto de por lo menos dos manos gruesas a pincel o soplete, superando el espesor de 150 micrones, de pintura epoxi bituminosa u otro tipo de material que garantice una protección igual o superior, previo arenado de la superficie de aplicación.

Estará provisto de las conexiones necesarias para la operación: salida a la línea de succión de las electrobombas de regeneración con su filtro correspondiente y salida al desagüe, de una regla de material resistente al regenerante graduada en litros y de cuatro chicanas desviadoras verticales dispuestas a 90° una de otra.

12.6. TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE REGENERANTE (HIDRÓXIDO DE SODIO AL 47 %)

Será de forma cilíndrica de eje horizontal, con cabezales bombeados, en chapa de acero al carbono diseñado o acero inoxidable SAE (ANSI) 304 de acuerdo al BOIELER AND

PRESSURE VESSEL CODE del ASME, tomo VIII UNFIRED PRESSURE VESSELS, respondiendo además a la norma IRAM 2627: 1981.

El espesor de la chapa no será menor de 4,7 mm (3/16').

Diámetro	m
Generatriz cilíndrica	m
Volumen mínimo	m ³
Presión de trabajo	kg/cm ²

Estará provisto de boca de carga con tapa para vereda en ... m de diámetro, entrada de hombre con un diámetro no menor de 0,50 m, ventilación protegida con malla, caño de aspiración de la bomba de transvase, diámetro ... m; con válvula de pie y medición de nivel mediante varilla graduada.

En caso de ser construido en acero al carbono estará recubierto de por lo menos dos manos gruesas a pincel o soplete, superando el espesor de 150 micrones, de pintura espoxibituminosa previo arenado de la superficie ea recubrir o de otro material que garantice una protección igual o superior, tanto interior como exteriormente.

Este tanque se ubicará enterrado a -0,40 de profundidad en su nivel superior en relación al terreno natural o piso terminado.

12.7. TANQUE CARBONATADOR

Será diseñado en un todo de acuerdo al BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE del ASME, tomo VIII UNFIRED PRESSURE VESSELS.

Su forma será cilíndrica de eje vertical, con fondos bombeados, en chapa de acero al carbono o acero inoxidable SAE (ANSI) 304.

Diámetro	m
Generatriz cilíndrica	m
Presión de trabajo	kg/cm ²

Apoyará sin ejercer sobre el piso una carga superior a ... Kg/cm²

Irá provisto de tapa de inspección y cilindro interior a donde llegan el agua y el anhídrido carbónico para aumentar el recorrido de la solución.

En caso de ser construido en acero al carbono será recubierto interiormente de por lo menos dos manos gruesas a pincel o soplete, superando el espesor de 150 micrones de pintura epoxi bituminosa previo arenado de la superficie, u otro tipo de material que garantice una protección igual o superior. Exteriormente, previa limpieza con un disolvente para eliminar grasas, aceites, etc. y eliminación de la herrumbre por cepillado,

rasqueteado, esmerilado, viruteado, arenado y/o solución desoxidante, será pintado con dos manos de fondo antióxido sintético de cromato de Zinc y dos manos de esmalte sintético.

Estará provisto de las conexiones necesarias para el funcionamiento del equipo.

12.8. BOMBAS CENTRÍFUGAS DE TRANSVASE Y REGENERACIÓN DE HIDRÓXIDO DE SODIO

Serán provistas ... electrobombas (una para reserva) de las siguientes características.

Caudal m^3/h

Altura monométrica total m.c.a.

Será accionada por un motor eléctrico, asíncrono, rotor en corto circuito, del tipo 100 % blindado, grado de protección IP54 del VDE , horizontal , 220 – 380 V 50 Hz, 1500 rpm de velocidad sincrónica (velocidad en vacío), con una potencia de ... HP.

El enfriamiento será mediante ventilador exterior ubicado en el lado opuesto del accionamiento y protegido por un capuchón. Interiormente otro ventilador hará circular aire para disipar el calor uniformemente.

La carcasa, pies los escudos cojinete, el capuchón y la caja de conexiones serán de hierro fundido o de acero laminado soldado eléctricamente. Los ventiladores serán de chapa de hierro, aluminio o plástico.

La caja de conexiones será herméticamente cerrada para entrada de caños.

El eje será de acero Siemens Martin, y estará montado mediante cojinetes a bolilla.

La jaula de ardilla del inducido estará formada por barras de cobre desnudo, soldadas con aleación de plata a los aros de corto circuito, también en cobre.

El rotor se equilibrará dinámica y estáticamente.

El entrehierro tendrá gran exactitud, que se logrará mediante rectificado de las superficies del rotor y del estátor.

La potencia indicada será en servicio permanente a tensión y frecuencia nominales.

La aislación de los alambres del bobinado y ranuras responderán a la clase A del VDE, admitiendo un calentamiento de 60° C sobre la temperatura ambiente de 40° C como máximo.

El motor responderá ampliamente a las reglas del VDE (Asociación de Electrotécnicos Alemanes) y la norma IRAM – 1; 1980 Y IRAM 2008 – 2: 1981.

El cuerpo y el soporte de la bomba será fundición de hierro de grano fino.

El eje será de acero Siemens Martin montado con dos cojinetes en baño de aceite.

El rotor será en hierro fundido de grano fino y perfectamente pulido.

El acople entre el eje de la bomba y el motor eléctrico se realizará mediante manchón elástico.

El líquido a impulsar será solución de hidróxido de sodio al 1 % del tanque de preparación de solución a los equipos intercambiadores y solución al 47 % del tanque de almacenamiento al tanque de preparación de solución.

Se deberán especificar el número y norma a que responden los diferentes materiales constitutivos del equipo.

La base donde el conjunto de electrobomba sea instalado tendrá una altura mínima de 0,25 m sobre el nivel del piso terminado, debiendo contar con desagüe para conducir las pérdidas de los prensaestopas.

12.9. BATERÍAS DE TUBOS DE ANHÍDRIDO CARBÓNICO

Será provista de una batería de ... tubos de anhídrido carbónico de ... kg. cada uno cargados.

Responderán a las normas IRAM 2525 mod. n° 2: 88/09, 2527 mod. n° 88/09 y 2533 mod. n° 4: 83/09.

El anhídrido carbónico responderá a la norma IRAM 41170: 1997 "Anhídrido carbónico licuado para uso industrial".

Se suministrará junto con la batería, en orden de ubicación siguiendo la conexión al tanque saturador.

- 1). Válvulas individuales de cierre para cada tubo.
- 2). Un calefactor mediante agua caliente, accionado por serpentín sumergido, con resistencia eléctrica; con termo regulador para mantener la temperatura del gas en 20° C, accionando por un termómetro en íntimo contacto con el anhídrido carbónico que circula por la cañería de conexión.
- 3). Un regulador de presión con manómetros.
- 4). Medidor de caudal.
- 5). Tanque de condensación con visor y purga inferior.
- 6). Una válvula de retención y una válvula de cierre.

12.10. MEDIDORES INSTANTÁNEOS DE CAUDAL

N°	Cantidad	Fluido a Medir	Caudal Normal	Observaciones
1	Agua			a ... kg/cm ² y 20° C
2	Agua Ácida			
3	Agua CO ²			
4	OHNA AL 1%			

Serán del tipo flotámetro, con prensa estopa para fácil desarme y limpieza.

El tubo será de vidrio Pyrex con lectura directa del flotante en el tubo transparente.

El material en contacto con el fluido a medir será bronce cromado.

Para el equipo N° 4 toda la superficie metálica interior en contacto con el fluido será acero inoxidable 18/8 (AISI 304).

Se suministrará para cada equipo un tubo de vidrio Pyrex de repuestos, con diagrama de calibración y dos juegos de juntas.

Cuando se realice la medición con el flotámetro en desvío, se proveerá el juego correspondiente de placa orificio, compuesto de dos bridas porta placa con las conexiones, válvulas y filtros para operar normalmente el equipo, placa orificio de acero inoxidable 18/8 (AISI 304) con un espesor comprendido entre 3 y 5 mm ejecutada según norma DIN.

12.11. MEDIDOR TOTALIZADOR DE CAUDAL

Será del tipo de hélice Woltmann, cuadrante seco. El cuerpo será de bronce o hierro encamisado en bronce; el anillo de cierre en bronce; el cuadrante en poliestireno; engranajes sumergidos en níquel o acero inoxidable; los engranajes de relojería seca en poliestireno o latón niquelado; platinas en poliestireno o ebonita; hélice en plexiglas o ebonita y el eje de transmisión al mecanismo contador de acero inoxidable o níquel.

Se deberá especificar a que normas y número responden los materiales a emplear.

Asimismo tendrá indicado el sentido de circulación del fluido.

Caudal normal m^3/h

Caudal máximo m^3/h

Fluido agua a temperatura ambiente

12.12. VÁLVULAS

Serán diafragma, tipo Saunders, diafragma Q, o similar. Cuando circula por ellas agua común o solución de hidróxido de sodio el cuerpo será de hierro fundido.

En caso de circular agua ácida el cuerpo será de bronce o hierro fundido ebonitado.

12.13. INTERCONEXIONES GENERALES

Se deberán ejecutar todas las interconexiones necesarias para el funcionamiento del equipo, teniendo en cuenta los diferentes fluidos a conducir para la elección de los materiales, que responderán a las normas IRAM respectivas.

No se permitirá el empleo de cáñamo peinado y pintura en pasta para la ejecución de las juntas donde circula agua ácida o alcalina.

Los diferentes cruces de cañería serán ejecutados en trinchera o aéreas (altura libre al nivel del piso 2,00 m). No se permitirá la existencia de interconexiones que dificulten la circulación del personal.

No se permitirá la colocación de elementos de maniobra o lectura a una altura superior a 1,70 m o inferior a 0,50 m del nivel del piso de trabajo.

Serán convenientemente apoyadas y/o amuradas para evitar problemas de deflexión, vibraciones, etc.

Hasta el diámetro de 3”(75mm) se admitirán las uniones roscadas, pegadas o bridadas. Para diámetros superiores se admitirán las uniones a bridas.

Exteriormente previa limpieza con un disolvente para eliminar grasas, aceites, etc. y eliminación de la herrumbre por cepillado, rasquetado, esmerilado, viruteado, arenado y/o solución desoxidante y aplicación de dos manos de fondo antióxido sintético de cromato de zinc en las cañerías de hierro negro, serán pintadas con dos manos de esmalte sintético en color a elección de la Inspección Técnica.

12.14. HIDRÓXIDO DE SODIO

Será del tipo industrial, norma IRAM 41129 –1: 1992.

12.15. DESAGÜES

Se deberán realizar en materiales resistentes a los diversos fluidos o conducir, teniendo en cuenta que el pH podrá alternativamente ser ácido o alcalino. Se construirá como mínimo una cámara cada dos equipos, con un pico rociador rompe espuma en las correspondientes a las columnas intercambiadoras.

12.16. MANÓMETROS

Serán del tipo tubo Bourdón, de bronce. La caja será de bronce endurecido con eslabón de ajuste y dientes prolijamente terminados. Montados independientemente de la caja.

El cuadrante estará graduado en kg/cm^2 .

La exactitud será de $\pm 2 \%$ del alcance total de la escala, para cualquier lectura superior al 5% .

Diámetro exterior de la caja 100 mm.

Escala de 0 a 7 kg/cm^2 .

En la interconexión a la línea de presión a medir se deberá intercalar un grifo de cierre y uno de purga.

12.17. ELECTROAGITADOR

Se utilizará para homogeneizar la solución de hidróxido de sodio al 1%

Diámetro de la hélice m

Cantidad

Número de revoluciones rpm

Potencia HP

Material del eje y paletas

Será accionado por un motor eléctrico, 100% blindado, grado de protección IP 54 del VDE y de similares características a las especificadas en el numeral 8.

12.18. PISO DE LA SALA DE EQUIPOS

El nivel del piso terminado de la sala de equipos por donde se haya previsto circulación de personal, sobreelevado 0,10 m del nivel del piso terminado correspondiente a donde estarán ubicados los equipos que contará con la pendiente suficiente para evacuar las eventuales pérdidas y aguas de limpieza del local al desagüe.

Las patas de soporte de los tanques estarán sobreelevadas 0,10 m del nivel del piso terminado mediante dados de hormigón para evitar el contacto con los desagües de pérdida y limpieza.

