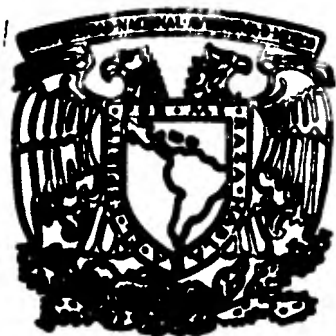


Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE QUIMICA



**TRATAMIENTO DE AGUA EN CORRIENTE LATERAL
EN UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO**



**EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA**

**T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A:**

JUAN ANTONIO CORTEZ VALTIERRA

1 9 8 2



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

INDICE GENERAL

	PAG.
CAP. I OBJETIVO	1
CAP. II GENERALIDADES	3
a).- Contaminantes del agua de enfriamiento . . .	3
a.1) Gases Disueltos	
a.2) Dureza	
a.3) Hierro	
a.4) Sílice	
a.5) Cloruros	
a.6) Sulfatos	
a.7) Aceites	
a.8) Material Suspendido	
a.9) Contaminantes Biológicos	
a.10) pH	
b).- Tipos de tratamientos del agua de enfria miento	7
b.1) Tratamiento convencional	7
b.2) Otros tratamientos	8
b.2.1 Filtración en Corriente Lateral	
b.2.2 Clarificador en Corriente Lateral	
b.2.3 Intercambio Iónico	
b.2.4 Osmosis Inversa	
b.2.5 Tratamiento con Cal-Carbonato	

c).- Tratamiento Convencional	15
c.1 Pérdidas por evaporación	
c.2 Pérdidas por arrastre	
c.3 Purga	
c.4 Agua de repuesto	
c.5 Ciclos de concentración	
c.6 Límite de concentración de contaminantes	
d).- Fuentes de Contaminantes	31
e).- Estimación de Dosificación de Reactivos . . .	34
e.1 Estimación del número de ciclos de concen- tración.	
e.2 Estimación de consumo de ácido sulfúrico y análisis químico resultante	
e.3 Inhibidores de corrosión	
e.4 Inhibidores de incrustaciones	
e.5 Microbicidas (control microbiológico)	
f).- Tratamiento del Agua con Cal-Carbonato en Frío	58
f.1 Remoción de sílice con el tratamiento Cal-Carbonato en frío	
g).- Porque se decidió usar el Tratamiento de Cal- Carbonato para el Tratamiento de Agua de En- friamiento y Porque en Corriente Lateral . . .	70

h).- Equipo Usado en el Tratamiento de Cal- Carbonato	73
i).- Cálculo del Consumo de Reactivos en Tratamien to de Cal-Carbonato	78
i.1 Conceptos	
i.2 Sustancias químicas usadas	
i.3 Cálculo de reactivos	
i.4 Sílice residual	

CAP. III DESARROLLO DE UN EJEMPLO CON EL USO DEL TRATAMIENTO

CAL-CARBONATO EN CORRIENTE LATERAL	90
a).- Datos	90
b).- Balance de Materia y Cálculo de Reactivos . .	92
c).- Tabulación de Resultados	120
d).- Diagrama de Tubería e Instrumentación	125
e).- Datos de Equipos	125
f).- Estimado de Inversión	132
g).- Costos de Producción	136

CAP. IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 137

B I B L I O G R A F I A

INDICE DE TABLAS

	PAG.
II.1	METODOS SUGERIDOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO 13
II.2	LIMITES DE CONTROL 22
II.3	FACTOR "A" (Para el Cálculo de pHs) 24
II.4	FACTOR "B" (Para el Cálculo de pHs) 25
II.5	FACTOR "C" (Para el Cálculo de pHs) 26
II.6	FACTOR "C" (Para el Cálculo de pHs) 27
II.7	FACTOR "D" (Para el Cálculo de pHs) 28
II.8	FACTOR "D" (Para el Cálculo de pHs) 29
II.9	FUENTE DE CONTAMINANTES HACIA EL AGUA DE ENFRIAMIENTO 32
II.10	EJEMPLO DE ANALISIS DE AGUA DE POZO 34
II.11	ALCALINIDAD RESIDUAL vs. pH (Aproximada) 37
II.12	COMPARACION PARA DETERMINAR LA ALCALINI- DAD RESIDUAL OPTIMA 47

II.13	DOSIS DE CAL HIDRATADA Y CARBONATO DE SODIO (PROCESO CAL-CARBONATO)	88
III.1	TABLA COMPARATIVA A DIFERENTE NUMERO DE CICLOS DE CONCENTRACION (datos de operación)	121
III.2	TABLA COMPARATIVA A DIFERENTE NUMERO DE CICLOS DE CONCENTRACION (datos de costos)	124
III.3	ESTIMADO DE MAGNITUD DE INVERSION	135
III.4	COSTOS DE PRODUCCION	136

INDICE DE FIGURAS

	PAG.
II.1	EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA ELIMINACION DE SILICE 63
II.2	EFECTO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA EN LA ELIMI NACION DE SILICE 64
II.3	EFECTO DEL pH EN LA ELIMINACION DE SILICE 65
II.4	EFECTO DE LA RECIRCULACION DE LODOS EN LA ELIMINACION DE SILICE 66
II.5	EFECTO DEL TIPO DE COMPUESTO DE MAGNESIO EN LA ELIMINACION DE SILICE 67
II.6	EFECTO DE LA CONCENTRACION INICIAL DE SILICE 68
II.7	SECCION TRANSVERSAL DE UN CLARIFICADOR-ABLAN DADOR 69
II.8	CANTIDAD RESIDUAL DE Ca^{++} (PROCESO CAL-CAR BONATO) 84
II.9	CANTIDAD RESIDUAL DE Mg^{++} (PROCESO CAL-CAR BONATO) 85

III.1	CLARIFICADOR EC-1	126
	DIAGRAMA DE FLUJO JAC-1	127

I. O B J E T I V O

El objetivo principal de este trabajo es el de demostrar mediante un análisis técnico-económico , que el proceso llamado "Tratamiento en Corriente Lateral" es mejor que el Tratamiento convencional del agua de recirculación en una Torre de Enfriamiento con sistema abierto.

El tratamiento convencional consiste en adicionar productos químicos (tales como ácido sulfúrico, cloro gas, anticrustantes, etc.) a la cisterna de agua fría de la torre con el fin de eliminar contaminantes del agua (tales como dureza, algas, etc.), convirtiéndolos a productos menos contaminantes. Debido a que parte del agua se evapora (transferencia de calor y masa del agua al aire), los productos contaminantes tienden a concentrarse a niveles no aceptables, siendo necesario purgar el sistema. Para reponer las pérdidas por evaporación, purga y arrastre, es necesario adicionar agua fresca de repuesto y, por lo tanto, más productos químicos de control de contaminantes.

El tratamiento en corriente lateral consiste en tratar parte del agua de retorno mediante el tratamiento de agua llamado Cal-Carbonato en frío, eliminando así buena parte de los

productos contaminantes, ayudando también a que la cantidad de purga sea menor, y por consiguiente, menor cantidad de agua de repuesto y menor cantidad de productos químicos de control.

Otro de los objetivos de esta Tesis es el de servir como guía a las personas interesadas en el tratamiento de agua de torres de enfriamiento.

II. GENERALIDADES

a) CONTAMINANTES DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO:

a.1) Los gases disueltos son los principales agentes corrosivos dentro del agua de enfriamiento:

Oxígeno (O_2): facilita la oxidación del fierro - principalmente, formando óxidos que fácilmente se desprenden de los materiales que contienen Fierro en su composición.

Dióxido de Carbono (CO_2): al disolverse en el agua forma ácido carbónico (H_2CO_3), el cual es corrosivo a metales tales como el fierro.

Amoníaco (NH_3): al disolverse en el agua forma el - hidróxido de amonio (NH_4OH) que ataca a los metales, principalmente al cobre.

a.2) Dureza; la dureza del agua está definida como la - concentración de sales de calcio y magnesio.

El principal compuesto contaminante lo forman los carbonatos e hidróxidos, ya que su solubilidad en el agua es muy baja, además de que la solubilidad de los hidróxidos disminuye con la temperatura. La dureza del agua tiende a formar depósitos e incrustaciones muy duras y difíciles de eliminar. Estos depósitos dificultan la transferencia de calor tanto en la torre de enfriamiento, como en los equipos de transferencia de calor.

- a.3) Hierro; el hierro se presenta en el agua como resultado de la corrosión del sistema. La presencia de oxígeno y de un pH bajo dan como resultado la formación del hidróxido férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) que es insoluble formando depósitos en el sistema de agua de enfriamiento.
- a.4) Sílice (SiO_2); la sílice tiene una fuerte tendencia a formar incrustaciones y depósitos.
- a.5) Cloruros (Cl^-); los cloruros atacan y corroen principalmente a los aceros inoxidable; esto se debe a que los iones cloruro destruyen la capa inerte e in

soluble de óxido de cromo que se forma en los aceros inoxidables para evitar la corrosión. Los cloruros también actúan como inhibidores en la formación de películas protectoras que forman algunos inhibidores de corrosión.

a.6) Sulfatos ($\text{SO}_4^{=}$); los sulfatos se encuentran en altas concentraciones en los sistemas de agua de enfriamiento, debido a que se utiliza ácido sulfúrico para el control de dureza y de pH.

A concentraciones entre 500 y 800 p.p.m. los sulfatos pueden reaccionar con algunas pinturas y recubrimientos protectores.

También el concreto puede deteriorarse en presencia de sulfatos, por la precipitación de sulfatos de calcio y aluminio dentro de los poros húmedos del concreto. En E.U.A. el "Bureau of Reamtion Concrete Manual" da los siguientes datos de ataque de concreto debido a la concentración de sulfatos:

<u>Degradación</u>	<u>p.p.m. de Sulfato</u>
Despreciable	0 - 150
Positiva	150 - 1500
Severa	1500 - 10000
Muy severa	10000

- a.7) Aceites; es uno de los contaminantes mas indesea -
bles ya que sirve como nutriente de la contamina -
ción biológica. Interfiere en la acción de algunos
inhibidores de corrosión y, restringe la transferen
cia de calor.
- a.8) Material suspendido; tales como arcilla, polvo, al -
gas, arena, etc.. Este material puede ocasionar
formación de contaminantes biológicos, depósitos, -
obstrucción de tuberías y de equipos, etc...
- a.9) Contaminantes Biológicos; el agua de enfriamiento
es un excelente medio para la formación de microor -
ganismos, los cuales pueden ser llevados por el aire
y en la corriente de agua de repuesto.
- Los microorganismos causan la formación de depósi -
tos de lodos en los cambiadores de calor, disminu -
yendo la eficiencia de la transmisión tanto en la
torre de enfriamiento como en los cambiadores de ca
lor. Los microorganismos incrementan indirectamente
la corrosión debido a la interferencia con los inhi
bidores de corrosión. Adicionalmente, los microorga
nismos atacan la madera de que están fabricadas al -
gunas torres.

a.10) pH; es bien sabido que un pH alcalino facilita la formación de depósitos, y un pH ácido facilita la oxidación de los metales.

b) TIPOS DE TRATAMIENTOS DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO:

b.1) Tratamiento Convencional: en realidad este tratamiento es el utilizado en la mayoría de los sistemas de agua de enfriamiento abiertos con recirculación,

Este tratamiento consiste en un control de los contaminantes mediante la adición de reactivos químicos que anulen o inhiban los efectos de los contaminantes.

Para ayudar a mantener la concentración límite de los contaminantes, es necesario eliminar parte del agua de recirculación en forma de purga, ya que al evaporarse el agua, se concentran los contaminantes en el sistema.

Es necesario también reponer el agua que se elimina en la purga y el agua que se evapora, por lo tanto,

se presentan mas contaminantes.

Para el control de dureza se utiliza un ácido fuerte (generalmente sulfúrico, pero algunas veces se puede usar clorhídrico) que forme una sal mas soluble con la dureza.

Para el control de incrustaciones y corrosión se usan agentes inhibidores de corrosión y dispersantes.

Para el control de microorganismos se utilizan biocidas.

b.2) Otros tratamientos:

Son solamente modificaciones al tratamiento convencional:

b.2.1) Filtración en Corriente Lateral:

Este sistema consiste en filtrar una parte del agua de recirculación. El equipo usado - son filtros de malla de tamaño medio o micro métrico.

b.2.2) Clarificador en Corriente Lateral:

Este sistema también es útil para materia en suspensión. El equipo usado son tanques asen

tadores y un agente floculante o coagulantes tales como; bentonitas, sulfato ferroso, sulfato de aluminio, etc...

b.2.3) Intercambio Iónico:

El equipo usado puede ser suavizador con zeolitas, desmineralizadores, etc... Este sistema es útil para eliminar dureza (con el suavizador) ó sólidos disueltos totales en general (con desmineralizador).

Es impráctico usar este método en corriente lateral ya que la alta concentración de los sólidos totales disueltos en el agua de recirculación es muy elevada e invertiría el equilibrio. Adicionalmente, la materia suspendida se adsorbería en la superficie de la resina envenenándola.

Este sistema es adecuado para usarse en el agua fresca de repuesto. Tiene el inconveniente de ser caro debido al alto volumen de agua a tratar.

b.2.4) Osmosis Inversa:

Este sistema se basa en el fenómeno llamado Presión Osmótica, que consiste en colocar una

solución muy concentrada junto a otra menos concentrada y en medio de las dos, una membrana semipermeable.

El diluyente de la solución menos concentrada tenderá a pasar a la solución más concentrada para tratar de igualar concentraciones. Esto se puede evitar aplicando presión del lado de la solución mas concentrada.

La presión a la cual se evita que el diluyente pase a través de la membrana se le denomina Presión Osmótica. Si se aplica una presión superior a la presión osmótica del lado mas concentrado, el diluyente tenderá a pasar de la solución mas concentrada a la menos concentrada, a este fenómeno se le llama Osmosis Inversa.

La ósmosis inversa es un sistema caro, ya que requiere de bombas de alta presión y membranas de alto costo. Adicionalmente, su operación es difícil porque las membranas se ensucian y se tapan con facilidad.

b.2.5) Tratamiento con Cal-Carbonato en Frío en Corriente Lateral:

Este tratamiento consiste en tratar parte - del agua de recirculación de retorno con Cal (hidróxido de calcio) y carbonato de sodio. Esto ayuda a la reducción de la dureza, control de la alcalinidad y además, al formarse hidróxido de magnesio ayuda al asentamiento de la sílice.

Este proceso, como se puede observar, opera como un clarificador y un suavizador combinados, por lo que el equipo a usar es un tanque clarificador, generalmente del tipo lecho suspendido.

La principal ayuda a este proceso es la alta concentración de sílice, ya que a mayor concentración de sílice es menor la relación entre la cantidad de hidróxido de magnesio que es necesario adicionar por unidad de sílice en el agua.

Otro factor importante es la temperatura, ya que a temperaturas arriba de la ambiental se facilita la precipitación de el carbonato de calcio y del hidróxido de magnesio.

La temperatura óptima es de 200 °F (93.3 °C) aproximadamente. La temperatura del agua de enfriamiento de retorno fluctúa entre 86 y 120 °F (30 y 48.9 °C), dependiendo de la localización de la torre de enfriamiento; siendo más elevada que la temperatura del agua de pozo.

De acuerdo a Crits y Glover (referencia 1), - la presencia de dispersantes en el agua no interfiere con la precipitación de la sílice, aún con dispersante del tipo polioles hasta niveles de 200 y 300 p.p.m.

Posteriormente en el presente trabajo se hablará con más amplitud del tratamiento del agua con cal carbonato en frío.

La tabla número II.1 muestra algunos métodos sugeridos para el control de contaminantes - por medios externos en el agua de enfriamiento.

T A B L A No. II-1

METODOS SUGERIDOS PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO

CONTAMINANTES	METODOS	NOTAS
1.- Sólidos suspendidos	a) filtración del agua de repuesto	Se requieren filtros granulares ó microfiltros.
	b) filtro en corriente lateral	Se requieren filtros granulares ó microfiltros.
	c) clarificadores en corriente lateral	No requiere filtros.
	d) tratamiento con cal en tibia en corriente lateral	No requiere filtros.
2.- Sílice	a) desmineralizador en el agua de repuesto	Método caro, puede requerir filtros.
	b) ósmosis inversa en el agua de repuesto	Método caro, puede requerir filtros.
	c) descalcificador/pulidor	Método caro, requiere adición de HCl. Requiere un pretratamiento.
	d) tratamiento con cal en tibia en corriente lateral.	El mejor método para eliminar sílice. Ver este trabajo.
3.- pH Bicarbonatos	a) adición de H_2SO_4	Se debe tener cuidado con la concentración límite de sulfatos.
	b) adición de HCl	Se debe tener cuidado con la concentración límite de cloruros.
	c) intercambio iónico con iones cloruros en agua de repuesto	Tener cuidado con la concentración de cloruros.
	d) intercambio iónico con ácido débil en el agua de repuesto	No adiciona aniones al sistema y también elimina calcio y magnesio.
	e) tratamiento con cal en agua de repuesto	No adiciona aniones al sistema, también elimina calcio y magnesio
	f) tratamiento con cal en tibia en corriente lateral	No adiciona aniones al sistema, también elimina calcio y magnesio.

T A B L A No. II-1

(cont.)

4.- Calcio y Magnesio DUREZA	a) suavizador con zeolitas en el agua de repuesto	Puede requerir filtros
	b) intercambio iónico con un ácido débil en el agua de repuesto	Evita la adición de ácido.
	c) tratamiento con cal en el agua de repuesto	Es el método más comúnmente usado.
	d) tratamiento con cal en tibia en corriente lateral.	Es el más económico, también elimina la sílice.
5.- Sulfatos	a) evitar la adición de H_2SO_4 . Usar en su lugar HCl	Tener cuidado con la concentración límite de cloruros.
	b) desmineralizador u ósmosis inversa	Método caro tanto en operación como en equipo.
	c) tratamiento con Hidróxido de Bario y cal en el agua de repuesto	Método muy caro en la operación.
	d) tratamiento con Hidróxido de Bario y cal en corriente lateral	Es menor caro que el anterior.
	e) tratamiento con cal en corriente lateral, filtros y ósmosis inversa	Método caro tanto en operación como en equipo.
6.- Cloruros	a) evitar la adición de HCl; usar en su lugar H_2SO_4	Tener cuidado con la concentración límite de sulfatos.
	b) desmineralizador u ósmosis inversa en el agua de repuesto	Método caro tanto en operación como en equipo
	c) cal, filtros y ósmosis inversa en corriente lateral	Caro tanto en operación como en equipo.

C) TRATAMIENTO CONVENCIONAL.

Descripción de conceptos:

c.1) Pérdidas por Evaporación: el fenómeno principal que se efectúa en el enfriamiento del agua es la transferencia de masa. El aire que circula a través de la torre de enfriamiento no se encuentra saturado de agua, por lo que se crea un gradiente de concentración y es por esto que el agua pasa al aire en forma de vapor.

El agua al evaporarse se lleva consigo calor en forma de calor latente, logrando así que el agua se enfríe. Un balance térmico quedaría como sigue:

$$R C_p \Delta T = E \lambda_v$$

E = cantidad de agua evaporada (lb/hr)

R = cantidad de agua recirculada (lb/hr)

C_p = capacidad calorífica del agua

$$1 \frac{\text{BTU}}{\text{lb } ^\circ\text{F}} = 1 \frac{\text{CAL}}{\text{gr } ^\circ\text{C}}$$

ΔT = diferencia de temperatura en el agua de recirculación ($^\circ\text{F}$)

λ_v = calor latente de evaporación del agua, -
aproximado de 1000 BTU/lb a condiciones
ambientales.

Sustituyendo valores:

$$(R) (1) (\Delta T) = (E) (1000)$$

$$\frac{E}{R} = \frac{\Delta T}{1000} \quad (\text{ec. 1})$$

Y, en por ciento:

$$\frac{E}{R} \times 100 = \%E = \frac{\Delta T}{10} \quad (\% \text{ de pérdidas por evaporación})$$

De aquí se deduce que por cada 10°F de ΔT en la torre, se evapora aproximadamente 1% del agua de recirculación.

c.2) Pérdidas por Arrastre: el aire al pasar por la torre arrastra consigo agua líquida en forma de gotitas o niebla. Estas pérdidas por arrastre son impor

tantes en el cálculo de dosificación de reactivos, debido a que llevan consigo la misma concentración de contaminantes que el agua de recirculación.

El porcentaje de pérdidas por arrastre varía con el tipo de torre. Algunos valores aproximados se muestran en la siguiente tabla:

Tipo de Torre	Pérdidas por arrastre en % del agua de Recirculación.
Torres sin Relleno (caída libre)	(1 - 5)
Tiro natural	(0.3 - 1)
Tiro mecánico	(0.1 - 0.3)

Algunos diseños modernos alcanzan niveles tan bajos como 0.005 %.

- c.3) Purga: es necesario purgar los sistemas de agua de enfriamiento debido a que al evaporarse el agua, la concentración de los contaminantes puede alcanzar

niveles no aceptables.

La cantidad de agua de purga depende de las pérdidas por evaporación, el sistema de tratamiento del agua y de las pérdidas por arrastre.

La purga de algunos sistemas fluctúa entre 0.5 a - 3.0 % del agua de recirculación.

c.4) Agua de Repuesto; es la cantidad de agua fresca que es necesario reponer a un sistema de agua de enfriamiento, debido a las pérdidas por evaporación, purga y arrastre. La cantidad de agua de repuesto varía entre 2.5% a un 10% dependiendo del tipo de torre y del tratamiento del agua.

c.5) Ciclos de Concentración: es la relación que existe entre la concentración de cualquier sal o compuesto en el agua de recirculación y la concentración del mismo compuesto o sal en el agua fresca de repuesto. El número de ciclos de concentración depende fundamentalmente de las pérdidas por evaporación y arrastre, del análisis del agua de repuesto y del tratamiento del agua.

Para torres con tratamiento convencional, el número de ciclos varía entre 3 y 5; pero con algunos tratamientos modificados (como por ejemplo con tratamientos con cal-carbonato en corriente lateral) se pueden alcanzar valores tan elevados como 30 ciclos.

La relación entre el número de ciclos de concentración y las pérdidas por evaporación, arrastre, purga y agua de repuesto se pueden definir por las siguientes ecuaciones de balance de materia:

Sea: R = cantidad de agua de recirculación

$A\%$ = cantidad de agua de repuesto en porcentaje del agua de recirculación

$P\%$ = purga en porcentaje de agua de recirculación

$E\%$ = cantidad de pérdidas por evaporación en porcentaje del agua de recirculación = 0.1

T ($^{\circ}F$) . . . ec. 1

$W\%$ = pérdidas por arrastre en porcentaje del agua de recirculación

X_R = concentración de cualquier sal en el agua de recirculación

X_A = concentración de la misma sal en el agua de repuesto

N = número de ciclos de concentración = X_R / X_A

Balance Total

$$A\% = E\% + P\% + W\% \quad (\text{ ec. 2 })$$

Balance con respecto a la sal X

$$(A\%)X_A = (P\%)X_P + (W\%)X_P \quad (\text{ ec. 3 })$$

Despejando

$$(A\%)X_A = X_P(P\% + W\%)$$

$$X_P/X_A = N = \frac{A\%}{(P\% + W\%)}$$

$$P\% + W\% = \frac{A\%}{N} \quad (\text{ ec. 4 })$$

Sustituyendo (2) en (4),

$$A\% - E\% = \frac{A\%}{N}$$

6

$$(A\%)N - A\% = (E\%)N$$

Sustituyendo ec.1 $E\% = 0.1 \Delta T$

Y simplificando,

$$A\%(N - 1) = (0.1 \Delta T)N$$

$$A\% = \frac{(0.1 \Delta T) N}{N - 1} \quad (\text{ec. 5})$$

Sustituyendo A% en la ec. 4, nos queda:

$$P\% = \frac{0.1 \Delta T}{N - 1} - W\% \quad (\text{ec. 6})$$

De estas ecuaciones se puede notar que a un número de ciclos de concentración mayor, la purga es menor.

c.6) Límites de Concentración de Contaminantes; el límite de concentración de los contaminantes que forman depósitos e incrustaciones, está dado por el producto de solubilidad de éstos o por una combinación de los productos de solubilidad de algunos contaminantes que se interfieran entre sí, tal como la sílice, y el ión magnesio.

Otros datos son obtenidos a base de experimentos y experiencias. En la tabla II.2 se muestran algunos límites de control sugeridos.

Se han desarrollado algunas relaciones empíricas para definir si un agua tiene tendencia corrosiva o forma incrustaciones. En los siguientes renglones se enumeran algunas.

L I M I T E S D E C O N T R O L

Contaminante	Máximo Valor Permitido en el Agua de Recirculación
1. pH	(6.5 - 7.5)
2. Sólidos suspendidos	(200 - 400) ppm
3. Carbonatos (como CaCO ₃)	(8) ppm
4. Bicarbonatos (como CaCO ₃)	(40 - 120) ppm
5. Sulfatos (como CaCO ₃)	
de Magnesio	(170,000) ppm
de Calcio	(1,290) ppm
6. Sílice (como SiO ₂)	(150) ppm
7. Producto Mg+SiO ₂ (Mg como CaCO ₃)	(144,000)
8. Producto Ca+SO ₄ (como CaCO ₃)	(1500000 - 2500000)
9. Producto Ca+CO ₃ (como CaCO ₃)	(1,200)
10. Cloruros (ppm de Cl ⁻)	prácticamente sin límite (*)
11. COD, BOD, NH ₃	definido por el tipo de Bio-cida usado

- Los valores aquí expresados son solamente útiles para sistemas abiertos con recirculación, en los cuales se presenten problemas de dureza

- (*) en caso de usar acero inoxidable en el sistema, el límite es de 4200 ppm de Cl⁻ como CaCO₃

Indice de Langelier.- este indice fue desarrollado en base a la naturaleza inestable del bicarbonato de calcio, el cual tiende a perder ácido carbónico y a precipitar carbonato de calcio. Este indice determina si el agua reacciona agresivamente, si tiende a precipitar compuestos de calcio ó si se tiene agua en equilibrio.

El Indice de Langelier se obtiene de la diferencia del pH del agua y el índice de saturación de CaCO_3 (pH_s).

El pH_s se obtiene de la siguiente relación empírica:

$$\text{pH}_s = (9.3 + A + B) - (C + D)$$

Donde A = factor que depende de la concentración de los sólidos totales

B = factor que depende de la temperatura

C = factor que depende de la dureza de calcio

D = factor que depende de la alcalinidad

En las tablas No. II-3, II-4, II-5, II-6, II-7 y II-8, se muestran los valores de A, B, C y D respectivamente.

T A B L A No. II-3

FACTOR "A"

(para el cálculo del pHs)

SOLIDOS TOTALES (ppm)	A
50	0.07
75	0.08
100	0.10
150	0.11
200	0.13
300	0.14
400	0.16
500	0.18
1000	0.19
2000	0.20
3000	0.21
4000	0.21
5000	0.21
6000	0.22
7000	0.22
8000	0.22
9000	0.22
10000	0.22

FACTOR "B" (para el cálculo del pHs)
TEMPERATURA (°F)

U N I D A D E S

	0	2	4	6	8
30		2.60	2.57	2.54	2.51
40	2.48	2.45	2.43	2.40	2.37
50	2.31	2.30	2.28	2.25	2.22
60	2.20	2.17	2.14	2.11	2.09
70	2.06	2.04	2.03	2.00	1.97
80	1.95	1.92	1.90	1.88	1.86
90	1.84	1.82	1.80	1.78	1.70
100	1.74	1.72	1.71	1.69	1.67
110	1.65	1.64	1.62	1.60	1.58
120	1.57	1.55	1.53	1.51	1.50
130	1.48	1.46	1.44	1.43	1.41
140	1.40	1.38	1.37	1.35	1.34
150	1.32	1.31	1.29	1.28	1.27
160	1.26	1.24	1.23	1.22	1.21
170	1.19	1.18	1.17	1.16	

D E C E M A S

T A B L A No. II.5

FACTOR "C" (para el cálculo del pHs)

D U R E Z A D E C A L C I O

(ppm de CaCO₃, desde 3 hasta 209)

	U N I D A D E S									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0				0.08	0.20	0.30	0.38	0.45	0.51	0.56
10	0.60	0.64	0.68	0.72	0.75	0.78	0.81	0.83	0.86	0.88
20	0.90	0.92	0.91	0.96	0.98	1.00	1.02	1.03	1.05	1.06
30	1.08	1.09	1.11	1.12	1.13	1.15	1.16	1.17	1.18	1.19
40	1.20	1.21	1.23	1.24	1.25	1.26	1.26	1.27	1.28	1.29
50	1.30	1.31	1.32	1.33	1.34	1.34	1.35	1.36	1.37	1.37
60	1.38	1.39	1.39	1.40	1.41	1.42	1.42	1.43	1.43	1.44
70	1.45	1.45	1.46	1.47	1.47	1.48	1.48	1.49	1.49	1.50
80	1.51	1.51	1.52	1.52	1.53	1.53	1.54	1.54	1.55	1.55
90	1.56	1.56	1.57	1.57	1.58	1.58	1.58	1.59	1.59	1.60
100	1.60	1.61	1.61	1.61	1.62	1.62	1.63	1.63	1.64	1.64
110	1.64	1.65	1.65	1.65	1.66	1.66	1.67	1.67	1.67	1.68
120	1.68	1.68	1.69	1.69	1.70	1.70	1.70	1.71	1.71	1.71
130	1.72	1.72	1.72	1.73	1.73	1.73	1.74	1.74	1.74	1.75
140	1.75	1.75	1.75	1.76	1.76	1.76	1.77	1.77	1.77	1.78
150	1.78	1.78	1.78	1.79	1.79	1.79	1.80	1.80	1.80	1.80
160	1.81	1.81	1.81	1.81	1.82	1.82	1.82	1.82	1.83	1.83
170	1.83	1.84	1.84	1.84	1.84	1.85	1.85	1.85	1.85	1.86
180	1.86	1.86	1.86	1.86	1.87	1.87	1.87	1.87	1.88	1.88
190	1.88	1.88	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.90	1.90	1.90
200	1.90	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.92	1.92	1.92	1.92

D E C R E A S

T A B L A N o . I I - 6
 FACTOR "C" (para el cálculo del pHs)
 DUREZA DE CALCIO (ppm CaCO₃)
 (desde 209 a 990)

		D E C E N A S									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
S A R E F I C	200		1.92	1.94	1.95	1.98	2.00	2.02	2.03	2.05	2.06
	300	2.08	2.09	2.11	2.12	2.13	2.15	2.15	2.17	2.19	2.18
	400	2.20	2.21	2.23	2.24	2.25	2.26	2.26	2.27	2.28	2.29
	500	2.30	2.31	2.32	2.33	2.34	2.34	2.35	2.36	2.37	2.37
	600	2.38	2.39	2.39	2.40	2.41	2.42	2.42	2.43	2.43	2.44
	700	2.45	2.45	2.46	2.47	2.47	2.48	2.48	2.49	2.49	2.50
800	2.51	2.51	2.52	2.52	2.53	2.53	2.54	2.54	2.55	2.55	
900	2.56	2.56	2.57	2.57	2.58	2.58	2.58	2.59	2.59	2.60	

ALCALINIDAD EXPRESADA EN ppm DE CaCO₃

(desde 1 hasta 209)

FACTOR "D" (para el cálculo del pHs)

	U N I D A D E S									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		0.00	0.30	0.48	0.60	0.70	0.78	0.85	0.90	0.95
10	1.00	1.04	1.08	1.11	1.15	1.18	1.20	1.23	1.25	1.29
20	1.30	1.32	1.34	1.36	1.38	1.40	1.42	1.43	1.45	1.46
30	1.48	1.49	1.51	1.52	1.53	1.54	1.56	1.57	1.58	1.59
40	1.60	1.61	1.62	1.63	1.64	1.65	1.66	1.67	1.68	1.69
50	1.70	1.71	1.72	1.72	1.73	1.74	1.75	1.76	1.76	1.77
60	1.78	1.79	1.79	1.80	1.81	1.81	1.82	1.83	1.84	1.84
70	1.85	1.85	1.86	1.86	1.87	1.88	1.88	1.89	1.89	1.89
80	1.90	1.91	1.91	1.92	1.92	1.93	1.93	1.94	1.94	1.95
90	1.95	1.96	1.96	1.97	1.97	1.98	1.98	1.99	1.99	2.00
100	2.00	2.00	2.01	2.01	2.02	2.02	2.03	2.03	2.03	2.04
110	2.04	2.05	2.05	2.05	2.06	2.06	2.06	2.07	2.07	2.08
120	2.08	2.08	2.09	2.09	2.09	2.10	2.10	2.10	2.11	2.11
130	2.11	2.12	2.12	2.12	2.13	2.13	2.13	2.14	2.14	2.14
140	2.15	2.15	2.15	2.16	2.16	2.16	2.16	2.17	2.17	2.17
150	2.18	2.18	2.18	2.18	2.19	2.19	2.19	2.20	2.20	2.20
160	2.20	2.21	2.21	2.21	2.21	2.22	2.22	2.23	2.23	2.23
170	2.23	2.23	2.23	2.24	2.24	2.24	2.24	2.25	2.25	2.25
180	2.25	2.26	2.26	2.26	2.26	2.27	2.27	2.27	2.27	2.28
190	2.28	2.28	2.28	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.30	2.30
200	2.30	2.30	2.30	2.31	2.31	2.31	2.31	2.32	2.32	2.32

D E C E M A S

T A B L A N o . I I - 8
 F A C T O R " D " (p a r a e l c á l c u l o d e l p H _s)
 A L C A L I N I D A D E N p p m C a C O ₃

		D E C E N A S									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
C E N T E N A S	200		2.32	2.34	2.36	2.38	2.40	2.42	2.43	2.45	2.46
	300	2.48	2.49	2.51	2.52	2.53	2.54	2.55	2.57	2.58	2.59
	400	2.60	2.61	2.62	2.63	2.64	2.65	2.66	2.68	2.69	2.70
	500	2.70	2.71	2.72	2.72	2.73	2.74	2.75	2.76	2.76	2.77
	600	2.78	2.78	2.79	2.80	2.81	2.81	2.82	2.82	2.83	2.84
	700	2.85	2.85	2.86	2.86	2.87	2.88	2.88	2.89	2.89	2.90
	800	2.90	2.91	2.91	2.92	2.92	2.93	2.93	2.94	2.94	2.95
900	2.95	2.96	2.96	2.97	2.97	2.98	2.98	2.99	2.99	3.00	

El índice de Langelier queda definido por la fórmula:

$$\text{INDICE} = \text{pH} - \text{pH}_g$$

- si el índice es cero, el agua se encuentra en ba lance químico.
- si el índice es positivo, indica que el agua pre senta tendencia a formar depósitos.
- si el índice es negativo, indica que el agua - tiende a ser corrosivo.

Índice de Estabilidad de Ryznar.- debido a que el índice de Langelier solo indica si el agua es incrustante o corrosiva, pero no indica que tanto, se desarrolló el Índice de Estabilidad que se indica mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Índice de Estabilidad} = 2\text{pH}_g - \text{pH}$$

Donde,

- si el índice es mayor que 7.0, el agua es - corrosiva
- si el índice es menor que 6.5, el agua tiene

tendencia a formar incrustaciones.

-- sí el índice se encuentra entre 6.5 y 7.0
el agua se encuentra en buen rango.

-- el valor óptimo es 6.6

d) FUENTES DE CONTAMINANTES

Las fuentes de contaminantes hacia el agua de
enfriamiento que se mencionan en este trabajo
se observan en la tabla No. II-9 .

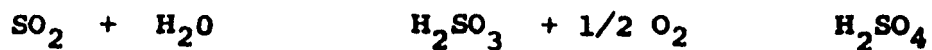
T A B L A II.9

FUENTES DE CONTAMINANTES HACIA EL AGUA DE ENFRIAMIENTO

CONTAMINANTE	DEL AGUA DE REPUESTO	DE LA ADICION DE PRODUCTOS QUIMICOS	DEL AIRE AMBIENTE
pH	X	H ₂ SO ₄ / HCl	gases CO ₂ y SO ₂ (2)
Sólidos suspendidos	Turbidez	fosfatos ligninas y dureza precipitada	polvo (3)
Carbonatos Bicarbonatos Dureza (Ca y Mg)	X	-	-
Sílice	X	-	-
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	X	Por adición de H ₂ SO ₄	SO ₂ (2)
Cloruros (Cl ⁻)	X	Adición de HCl y cloro gas	-
Dióxido de Carbono	X	-	CO ₂ (4)
COD (materia orgánica)	X	Aditivos orgánicos	-

- NOTAS: 1).- La "X" significa que es la fuente principal
- 2).- El aire industrial imparte generalmente, de acuerdo a datos prácticos, cerca de 15 p.p.m. de ión SO₄²⁻ en base al agua de repuesto a partir del SO₂ que trae el aire, como se

observa en la reacción:



3).- Datos experimentales indican que el aire imparte aproximadamente 75 p.p.m. de polvo (base agua de repuesto) de los cuales aproximadamente la quinta parte permanece como sólidos suspendidos y 4/5 precipitan en el cárcamo de la cisterna.

4).- El aire industrial contiene aproximadamente 15 mg CO_2/Ft^3 STD.

e) ESTIMACION DE DOSIFICACION DE REACTIVOS EN UN TRATAMIENTO CONVENCIONAL.

e.1) Estimación del número de ciclos de Concentración:
 Primero se debe estimar el máximo número de ciclos de concentración permitidos. Para esto se estudian todos los contaminantes observando cual es el que nos da el menor valor. Tomando éste como el máximo número de ciclos permitido, ejemplo:

Se tiene un agua con el siguiente análisis de agua de pozo: (agua de repuesto)

T A B L A No. II-10
EJEMPLO DE ANALISIS DE AGUA DE POZO

<u>Cationes</u> (como ppm de CaCO ₃)		<u>Aniones</u> (como ppm de CaCO ₃)	
Calcio	250	Bicarbonatos	460
Magnesio	62	Carbonatos	113
Sodio	420	Hidróxido	0
		Cloruros	65
		Sulfatos	94
TOTAL	732		732

(TABLA No. II-10, cont.)

Dureza total	=	312 ppm como CaCO ₃
Alcalinidad total	=	573 ppm como CaCO ₃
Sílice	=	75 ppm como SiO ₂
pH	=	7.6
Sólidos totales disueltos	=	1148 ppm
Temperatura de retorno	=	40°C
Temperatura de suministro	=	30°C

Sabemos que, No. Ciclos = $\frac{\text{Conc. máxima permitida}}{\text{Conc. agua de repuesto}}$
(ver tabla No. II-2)

$$\text{Base Sílice} = \frac{150 \text{ ppm}}{75 \text{ ppm}} = 2.0 \text{ ciclos}$$

$$\text{Base cloruros} = \frac{3000 \text{ ppm}}{46 \text{ ppm (como Cl}^{-}\text{)}} = 65 \text{ ciclos}$$

Todos los demás conceptos dependen de la adición -
del ácido fuerte.

Podemos considerar entonces que el número máximo per-
misible de ciclos de concentración es igual a 2 base
sílice.

e.2) Estimación de consumo de Acido Sulfúrico.- (recordemos que también puede ser Acido Clorhídrico y análisis químico resultante).

Para este cálculo debemos tener en cuenta los siguientes factores:

-- se debe mantener una alcalinidad residual dentro del agua de circulación con el fin de evitar corrosión y además, para un mejor control de pH. El valor de alcalinidad residual que se debe mantener depende del análisis final del tratamiento, determinando el índice de estabilidad y los límites indicados en la tabla No. II-2, y observando si es posible aumentar la alcalinidad residual porque a mayor alcalinidad residual, menor consumo de ácido.

De la alcalinidad residual depende el pH del agua. En la siguiente tabla se muestra el valor aproximado del pH del agua de recirculación Vs. alcalinidad residual cuando se usa un ácido para controlar la alcalinidad.

ALCALINIDAD RESIDUAL vs pH (aproximada)

<u>pH del agua de Recirculación</u>	<u>Alcalinidad residual como ppm de CaCO₃</u>
6.0	12
6.5	25
7.0	52
7.3	82
7.4	96
7.5	110
7.7	150
8.0	230
8.3	320

-- se debe considerar también las 15 ppm (base agua de repuesto) de SO_4^- que el aire mete al sistema (15.6 ppm como $CaCO_3$). Ver tabla No. II-9

Balance de Materia. (para No. de ciclos = 2)

Pérdidas por evaporación = E

$$E = \frac{\Delta T(^{\circ}F)}{1000} \times \text{agua de recirculación (R)}$$

$$E = \frac{(10^{\circ}C) 1.8^{\circ}F/^{\circ}C}{1000} \times R = 0.018 R \quad (\text{ver II.c.1})$$

$$W = \text{pérdidas por arrastre} = 0.001 R \quad (\text{ver II.c.2})$$

(suponiendo torre de tiro mecánico)

$$P = \text{purga} = \frac{E}{N-1} - W \quad (\text{ver II.c.3})$$

donde N = No. de ciclos = 2

$$P = \frac{0.018 R}{2 - 1} - 0.001 R = 0.017 R$$

$$A = \text{agua de repuesto} = P + E + W$$

$$A = 0.017 R + 0.018 R + 0.001 R = 0.036 R$$

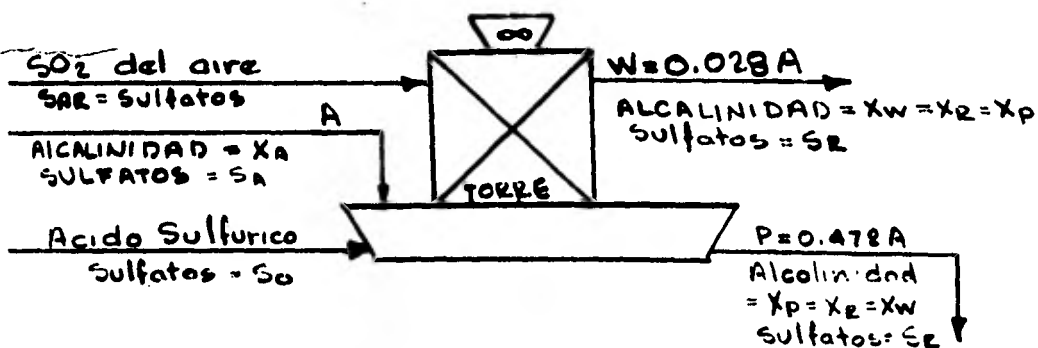
También se pueden expresar en base del agua de re-
puesto,

$$W = 0.028 A$$

$$P = 0.472 A$$

Balace de Materia para el Acido Sulfúrico

(todo como ppm de CaCO_3)



Suponiendo una alcalinidad residual = X_R , podemos escribir el balance de materia para los sulfatos, como: (recordando que la reacción es



Balance para Carbonatos

$$AX_A - AS_{AR} - AS_0 = WX_R + PX_R$$

Balance para Sulfatos

$$AS_{AR} + AS_A + AS_0 = WS_R + PS_R$$

donde X_A , X_R = carbonatos como ppm de CaCO_3

S_{AR} = $\text{SO}_4^{=}$ impartidos por el aire como ppm de CaCO_3

S_A = $\text{SO}_4^{=}$ en agua de repuesto (como ppm de CaCO_3)

S_0 = $\text{SO}_4^{=}$ que es necesario adicionar para controlar la alcalinidad como CaCO_3 base agua de repuesto.

Pasando el balance en base a "A" y despejando S_0 y S_R , queda como sigue:

$$AX_A - AS_{AR} - AS_0 = 0.028AX_R + 0.472AX_R - 0.5X_R$$

$$S_0 = X_A - S_{AR} - 0.5 X_R$$

$$A(S_{AR} + S_A + S_0) = S_R(0.028A + 0.472A)$$

$$S_R = (S_{AR} + S_A + S_0) \times 2$$

Con las ecuaciones anteriores se tantea el valor de la alcalinidad residual, checando el análisis químico del agua de recirculación vs. los límites de control.

Primera suposición:

$$X_R = 52 \quad \text{pH} = 7.0 \quad (\text{ver tabla No. II-11})$$

$$\text{sabemos que, } X_A = 573 \text{ ppm como CaCO}_3$$

$$S_{AR} = 15.6 \text{ ppm como CaCO}_3$$

$$S_A = 94 \text{ ppm como CaCO}_3$$

$$S_0 = 573 - 15.6 - 0.5(52) = 531.4 \text{ SO}_4^{\equiv} \text{ que es necesario adicionar base agua de repuesto como CaCO}_3.$$

$S_R = (15.6 + 94 + 531.4) \cdot 2 = 1282 \text{ SO}_4^{=}$ en el agua de circulación como ppm de CaCO_3

Ahora es necesario estimar el análisis químico del agua de recirculación completo:

CALCIO $X_R = NX_A$ $X_R =$ calcio el agua de circulación
 $X_A =$ calcio en agua de re-
 puesto
 $N =$ ciclos de concentración

$X_R = 2 \times 250 = 500 \text{ ppm de Ca}^{++}$ como CaCO_3

MAGNESIO $X_R = 2 \times 62 = 124 \text{ ppm de Mg}^{++}$ como CaCO_3

SODIO $X_R = 2 \times 420 = 840 \text{ ppm de Na}^+$ como CaCO_3

BICARBONATOS (alcalinidad residual) = 52 ppm como
 CaCO_3

CARBONATOS (se eliminan con el ácido) = 0

$$\text{CLORUROS } X_R = N X_A = 65 \times 2 = 130 \text{ ppm como CaCO}_3$$

$$\begin{aligned} \text{DUREZA } (\text{Ca}^{++}) + (\text{Mg}^{++}) &= 500 + 124 \\ &= 624 \text{ ppm como CaCO}_3 \end{aligned}$$

$$\text{ALCALINIDAD} = \text{Bicarbonatos} = 52 \text{ ppm como CaCO}_3$$

$$\text{SILICE } 75 \text{ ppm} \times 2 = 150 \text{ ppm como SiO}_2$$

SOLIDOS TOTALES (la suma de los anteriores)

$$\begin{aligned} \text{--Sulfatos} &= 1282 \times \frac{\text{PM SO}_4}{\text{PM CaCO}_3} && \text{(ppm)} \\ &= 1282 \times 96/100 &= 1230 \text{ como SO}_4^{2-} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{--Cloruros} &= 130 \times \frac{\text{PM Cl}^-}{\text{PM CaCO}_3} \\ &= 130 \times (2 \times 35.5)/100 = 91 \text{ como Cl}^- \end{aligned}$$

$$\text{--Calcio} = 500 \times \frac{40 (\text{PM Ca})}{100 (\text{PM CaCO}_3)} = 200 \text{ como Ca}^{++}$$

$$\text{Magnesio} = 124 \times \frac{24 \text{ PM Mg}}{100} = 30 \quad \text{como Mg}^{++}$$

$$\text{Sodio} = 840 \times \frac{2 \times 23 \text{ PM Na}}{100} = 384 \quad \text{como Na}^+$$

$$\text{Bicarbonatos} = 52 \times \frac{2 \times 61}{100} = 63 \quad \text{como HCO}_3^-$$

$$\text{Sílice} = 150$$

$$\text{T O T A L Sólidos Totales} = 2148$$

Disueltos

En el tratamiento se adicionan también otros productos químicos para control de corrosión y microbicidas que dan aproximadamente 200 ppm mas, o sea que;

$$\text{sólidos totales disueltos} = 2148 + 200 = 2348 \text{ ppm}$$

Sólidos suspendidos.- (del aire) se supone que el aire imparte aproximadamente 15 ppm como sólidos suspendidos (ver tabla No. II-9) base agua de repuesto.

Ya con el análisis completo podemos checar los límites:

	VALOR ppm	LIMITE ppm	CONCENTRACION
1. Sólidos suspendidos	30	400	BIEN
2. Bicarbonatos como CaCO_3	52	120	BIEN
3. Sulfatos de calcio como CaCO_3	1290.	500	BIEN
4. Sílice	150	150	JUSTO
5. Producto $\text{Mg} \cdot \text{SiO}_2$ (124 x 150)	18600	144000	BIEN
6. Producto $\text{Ca} \cdot \text{SO}_4$ (500 x 1282)	641000	2500000	BIEN
7. Cloruros como Cl^-	91	3000	BIEN

Indice de Langelier.-

$$\text{Indice} = \text{pH} - \text{pH}_s$$

$$\text{pH}_g = (9.30 + A + B) - (C + D)$$

donde, A = 0.2 (STD = 2348, ver tabla No. II-3)

 B = 1.71 (T = 40°C, ver tabla No. II-4)

 C = 2.3 (Ca = 500, ver tabla No. II-6)

 D = 1.72 (alcalinidad = 52, ver tabla No. II-7)

$$\text{pH}_g = 9.30 + 0.2 + 1.71 - 2.3 - 1.72 = 7.19$$

Indice = 7 - 7.19 = - 0.19 (ligera tendencia a ser corrosivo)

Indice de estabilidad.-

$$\text{Indice} = 2 \text{ pH}_g - \text{pH}$$

$$= 2 \times 7.19 - 7 = 7.38 \quad (\text{en base a este índice, el agua presenta tendencia a ser corrosiva})$$

En la siguiente tabla (Nó. II-12) se observan los diferentes valores a diferentes alcalinidades residuales.

T A B L A No. II - 12
COMPARACION PARA DETERMINAR LA ALCALINIDAD RESIDUAL OPTIMA (ejemplo)
 (todos como ppm CaCO₃)

ALCALINIDAD RESIDUAL	52	74	82	97	110
SULFATOS DE LA ADICION DE ACIDO SULFURICO	531.4	520.4	516.4	509.4	502.4
<u>análisis del agua de recirculación</u>					
SULFATOS	1282	1260	1252	1238	1224
BICARBONATOS	52	74	82	96	110
CLORUROS	130	130	130	130	130
CALCIO	500	500	500	500	500
MAGNESIO	124	124	124	124	124
SODIO	840	840	840	840	840
DUREZA	624	624	624	624	624
ALCALINIDAD	52	74	82	96	96
S.T.D.	2348	2355	2359	2360	2364
SILICE	150	150	150	150	150
pH	7.0	7.2	7.3	7.4	7.5
Mg*SiO ₂	18600	18600	18600	18600	18600
Ca*SO ₄	641000	630000	626000	619000	612000
INDICE DE LANGELIER	- 0.19	+ 0.16	+ 0.3	0.47	0.63
INDICE DE ESTABILIDAD	7.38	6.88	6.7	6.46	6.24
COMENTARIOS	ligeramen te corro- sivo	Agua en equili- brio	Agua en equili- brio	Ligera tendencia a formar incrusta- ciones	Tendencia a formar incrusta- ciones

De la tabla anterior se observa que la cantidad óptima de alcalinidad residual es 82, con un pH aproximado de 7.3, ya que es la máxima posible que aún mantiene el agua en un correcto equilibrio.

Para estimar la cantidad de ácido sulfúrico que es necesario adicionar en forma de solución al 98% (densidad = 1.82 gr/ml) podemos seguir la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \frac{\text{LTS Ac. Sulfúrico}}{\text{HORA}} &= S_0 \left(\frac{\text{mg como CaCO}_3}{\text{LT agua repuesto}} \right) \\ &\times \frac{98 \text{ PM H}_2\text{SO}_4}{100 \text{ PM CaCO}_3} \times A \text{ (LTS/MIN)} \\ &\times \frac{1 \text{ KG}}{10^6 \text{ mg}} \times \frac{1}{0.98} \\ &\times \frac{1 \text{ litro}}{1.82 \text{ KG}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hora}} \end{aligned}$$

donde, A = agua de repuesto

e.3) Inhibidores de Corrosión.- existen diferentes productos en el mercado que sirven como inhibidores de corrosión, a continuación se enlistan algunos de los más comunes:

1. Cromatos.- los iones ferrosos producidos por la corrosión son oxidados a óxidos férricos por la reducción de los cromatos, con la formación de una capa protectora de óxidos férrico y crómico. Este es el inhibidor de corrosión mas efectivo pero su uso está restringido debido a su alta toxicidad. Este producto se debe mantener entre 20 y 70 ppm en el agua de circulación para proteger a la capa protectora formada inicialmente. Son efectivos en rango de 6.4 a 7.0 de pH.

La forma de adición de este producto debe ser continua recomendándose el uso de bombas dosificadoras. Para calcular el consumo de este producto basta con conocer la cantidad que se está perdiendo a través de la purga y del arrastre para así reponer la misma cantidad.

La fórmula generalizada para conocer el consumo de cualquier producto que se debe alimentar en forma continua para mantener un nivel adecuado, es la siguiente:

$$\text{KG/HR del producto} = \text{ppm}(P) \times (W + P) \times 6 \times 10^{-5}$$

donde, $\text{ppm}(P)$ = concentración en ppm del producto
 P que se debe mantener en el agua
 de circulación

$W + P$ = pérdidas por purga y arrastre expresadas en LTS/MIN

2. Fosfatos.- (por ejemplo, hexametáfosfato de sodio trifosfato de sodio, polifosfatos, etc...) estos productos protegen al formar una película protectora de metal-calcio-fosfato; mezclados con algunos polímeros funcionan también como inhibidores de incrustaciones. Estos productos tienen la desventaja de que en altas temperaturas disminuyen su eficiencia. Son efectivos en el rango de pH de 7.0 a 8,2.

Su alimentación debe ser continua y deben ser mantenidos de 25 a 100 ppm en el agua de recirculación.

3. Zinc.- es un inhibidor de corrosión débil, pero usado en combinación con otros inhibidores, aumenta su poder. Su acción es similar a la de los cromatos.

4. Silicato de Sodio.- forma una capa protectora gelatinosa sobre la primera capa de corrosión de la superficie del metal.

5. Nitritos.- son pasivadores del acero cuando se usa a pH mayor de 6.0

6. Bórax.- se incorpora en formulación con nitrito para mantener el pH del agua en el rango de 8 a 10.

7. Inhibidores Orgánicos.- forman capas tipo barrera como resultado de la atracción del metal a la parte metálica de la cadena orgánica.

Estos productos se alimentan continuamente para mantener una concentración de 100 a 150 ppm en el agua de recirculación.

e.4) Inhibidores de Incrustaciones.- el principal método usado para inhibir las incrustaciones, es el uso de ácido sulfúrico o clorhídrico para mantener los agentes incrustantes en solución. Existen algunos productos químicos que ayudan a evitar incrustaciones y, a veces, sobre todo en agua de baja dureza y alcalinidad, eliminan la necesidad de usar ácido.

Los antiincrustantes pueden tener alguna de las siguientes tres acciones:

1. Floculación: las partículas individuales son - aglomeradas en flóculos ligeros que permanecen suspendidos en el agua.
2. Dispersión: las partículas individuales se mantienen separadas debido a las cargas electrostáticas.
3. Quelación: ciertos compuestos orgánicos forman - complejos solubles con los iones Fe, Al, Ca y Mg.

Estos productos se alimentan generalmente en forma continua y su concentración residual en el agua, varía dependiendo del fabricante y del tipo de producto.

e.5) Microbicidas (Control Biológico).- el control microbiológico es probablemente la parte más difícil de estimar teóricamente, debido a que los microorganismos que se pueden desarrollar en el agua de enfriamiento son muchos, y el tipo dependen del lugar. Un buen control microbiológico deberá realizarse en campo. Sin embargo, las siguientes reglas generales se pueden seguir para especificar el control microbiológico:

1. Un tratamiento completo debe incluir dos tipos - de microbicidas, uno oxidante (como cloro o hipoclorito) y uno no oxidante (como organotiocianatos).
2. La mayor parte de los microorganismos se puede suponer de que pertenecen a los siguientes cuatro - grupos: algas, hongos, bacterias y lamas.

En la siguiente tabla se podrá observar los microbicidas más comunes y a que tipo de microorganismo controla.

CONTROL DE MICROORGANISMOS

<u>B I O C I D A</u>	<u>T I P O(1)</u>	<u>ORGANISMOS QUE CONTROLA(2)</u>
Cloro	O	Algas, bacterias
Aminas complejas	N	Bacterias, algas, hongos
Clorofenoles	N	Hongos, bacterias, algas
Amonio cuaternario	N	Bacterias, algas
Organo-sulfuros	N	Bacterias, hongos
Organo tiocianatos	N	Bacterias, algas, hongos

(1).- O = oxidante N = no oxidante

(2).- de izquierda a derecha en órden de eficacia

3. La alimentación de estos productos deberá realizarse por medio de "choques", es decir, no se deberán alimentar continuamente, sino por lotes. Esto ahorrará gastos innecesarios y además, evitará que los microorganismos se vuelvan inmunes a él.

La manera de calcular el consumo es en base al volúmen del sistema mediante la siguiente forma:

$$\text{"choque" (KG)} = \frac{\text{Volúmen del sistema (LTS)}}{10^6} \times \text{ppm}$$

donde, ppm = concentración recomendada para un correcto control y depende del fabricante, el tipo de producto y la experiencia.

La adición de microbicida deberá hacerse de una a tres veces por semana; dependiendo de la experiencia, la adición podrá hacerse manualmente o por medio de una bomba programada con un "timer."

4. Como se dijo antes, siempre es necesario clorar para tener un agente oxidante.

La cloración depende de muchos factores debido a que el cloro reacciona no tan sólo con los microorganismos, sino también con cualquier materia o sustancia oxidable como lo es la madera, gases disuel-

tos como el H_2S , materia orgánica suspendida. El efecto oxidante del cloro se debe a que al disolverse en el agua forma ácido clorhídrico (HCl) y ácido hipocloroso ($HClO$), siendo este último el que tiene las propiedades oxidantes. La formación del ácido hipocloroso es una reacción en equilibrio, que depende del pH, debajo de 6.5 se alcanza a formar cerca del 100% de ácido hipocloroso y a pH mayor de 9.0, todo se convierte a ion hipoclorito, el cual tiene muy pobres cualidades biocidas.

La manera de que actúa mejor el cloro, es dejando una parte residual de cloro (solo como ácido hipocloroso, ya que el ión hipoclorito, cloruros y cloruros nitrogenados, no tienen acción alguicida), para evitar la formación de microorganismos, pero esta concentración residual no puede ser muy elevada ya que el ácido es muy oxidante y puede ocasionar corrosión muy fuerte. Cuando más el cloro residual deberá estar de 0.5 a 1 ppm en el agua circulante.

Una estimación práctica conservadora del consumo y adición, es la que establece que se debe adicionar

5 ppm de cloro durante un período de 4 horas una vez al día en base al agua de recirculación. Y esto se deberá mejorar checando en operación el cloro residual, pudiendo así disminuir la velocidad de adición o el tiempo.

Cálculos:

$$F A = R \times \text{ppm} \times \frac{1 \text{ KG}}{10^6 \text{ mg}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hora}}$$

donde, R = flujo de recirculación (LTS/MIN)

ppm = 5 ppm de cloro base el agua de recirculación (o menos).

F A = flujo de adición en KG/HR, este dato nos sirve para estimar el tamaño del equipo dosificador.

$$C = (F A) T$$

donde, T = tiempo que dura la adición (HR/DIA)

C = consumo diario de Cl_2 en KG/DIA (para estimación de costos)

Existen otros productos que también suministran ácido hipocloroso, estos son; hipoclorito de sodio o calcio y cloruros orgánicos. Para calcular su consumo y dosificación, se calcula primero como cloro gas y después se convierte a su equivalente.

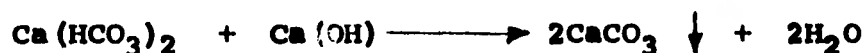
f) TRATAMIENTO DEL AGUA CON CAL-CARBONATO EN FRIO.

Este es un método de ablandamiento muy usado en el tratamiento de agua cruda para caldera, para agua municipal y para agua de repuesto en torres de enfriamiento.

El método consiste en adicionar cal apagada (CaOH) y carbonato de sodio (Na₂CO₃) a el agua, logrando que reaccionen con la dureza del agua formando compuestos mas insolubles que fácilmente precipitan.

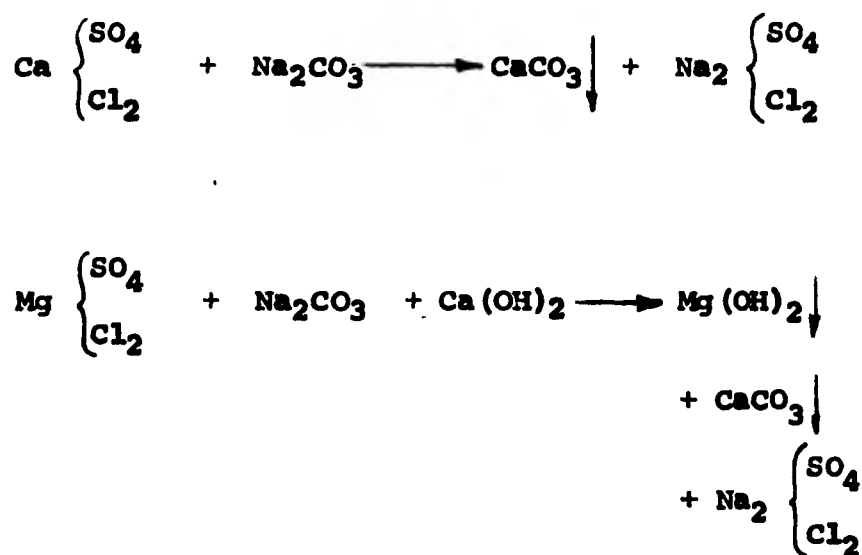
Las reacciones que se llevan a cabo son las siguientes:

Con Bicarbonatos:





Con dureza no alcalina (por ejemplo con sulfatos y cloruros),



La sedimentación de la dureza se logra debido a que el carbonato de calcio y el hidróxido de magnesio son poco solubles, quedando muy poco disuelto. (solubilidad 32°F $\text{CaCO}_3 = 15$ ppm como CaCO_3 y del $\text{Mg}(\text{OH})_2 = 17$ ppm como CaCO_3).

f.1) Remoción de Sílice con el Tratamiento CAL-CARBONATO :
Otro efecto es que con el tratamiento de cal carbonato en frío, se logra eliminar parte de la sílice por el efecto de adsorción que ejercen algunos com-

puestos de magnesio. En los tratamiento convencionales de ablandamiento y eliminación de sílice se acostumbra adicionar óxido de magnesio para ayudar a la eliminación de la sílice.

Es bien conocido que la temperatura ayuda la sedimentación de la dureza por medio del tratamiento de cal carbonato, debido a que las altas temperaturas disminuyen la solubilidad de la mayoría de los compuestos de Mg y Ca, y además, de que la temperatura acelera la velocidad de las reacciones, es por esto que para muchos tratamiento se utiliza el método de cal carbonato en caliente. El tratamiento de cal carbonato en frío tiene su principal aplicación en el tratamiento de aguas municipales donde se manejan altos volúmenes de agua.

Para la ayuda de la floculación y sedimentación en el tratamiento de cal-carbonato, se utilizan agentes coagulantes tales como, sulfato de aluminio, sulfatos férrico y ferroso, coperos, alumbre, aluminatos, etc .

El equipo usado para el tratamiento de cal en tibio son los llamados clarificadores de lecho suspendido y filtros de arena y antracita, posteriormente se mencionarán en capítulos próximos.

Para el correcto diseño de los equipos usados para la eliminación de sílice, deben tomarse en cuenta los siguientes factores:

f.1.1. Efecto de la Temperatura: las altas temperaturas de operación dan como resultado una mas eficiente eliminación de la sílice, tal como lo muestra la figura II-4.

f.1.2. Tiempo de Residencia del Clarificador: es obvio que entre mas tiempo tenga contacto la sílice con las sales de magnesio, mas partículas se absorberan. La figura II-5 muestra un ejemplo del efecto del tiempo de residencia, donde también se observa que a mayor temperatura, menor tiempo de residencia.

f.1.3. Efecto del pH: la influencia del pH en la eliminación de sílice se muestra en la figura II-6, se -

puede notar que el valor óptimo de pH es aproximadamente 10.1. Este valor de pH es fácilmente obtenido con ablandamiento de cal - carbonato.

f.1. 4. Efecto de la Recirculación de Lodos: sí durante el proceso de eliminación de sílice se recircula - una parte de los lodos gastados de óxido de magnesio hacia el agua fresca, de alto contenido de sílice, se obtiene un considerable incremento en la eficiencia. La gráfica II-7 nos muestra un ejemplo de este efecto.

f.1. 5. Efecto del Tipo de Compuesto de Mg: la figura - II-8 nos muestra la comparación de diferentes tipos de compuestos de magnesio. Se puede observar que el óxido de magnesio es el mas efectivo y además, de - que no aumenta el contenido de sólidos en el agua.

f.1. 6. Efecto de la Concentración Inicial de Sílice: - cuanto mas sea concentración de sílice, menor será la cantidad de MgO por ppm de SiO₂ que sea necesario añadir, como lo muestra la figura II-9.

EFFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA ELIMINACION
DE SILICE

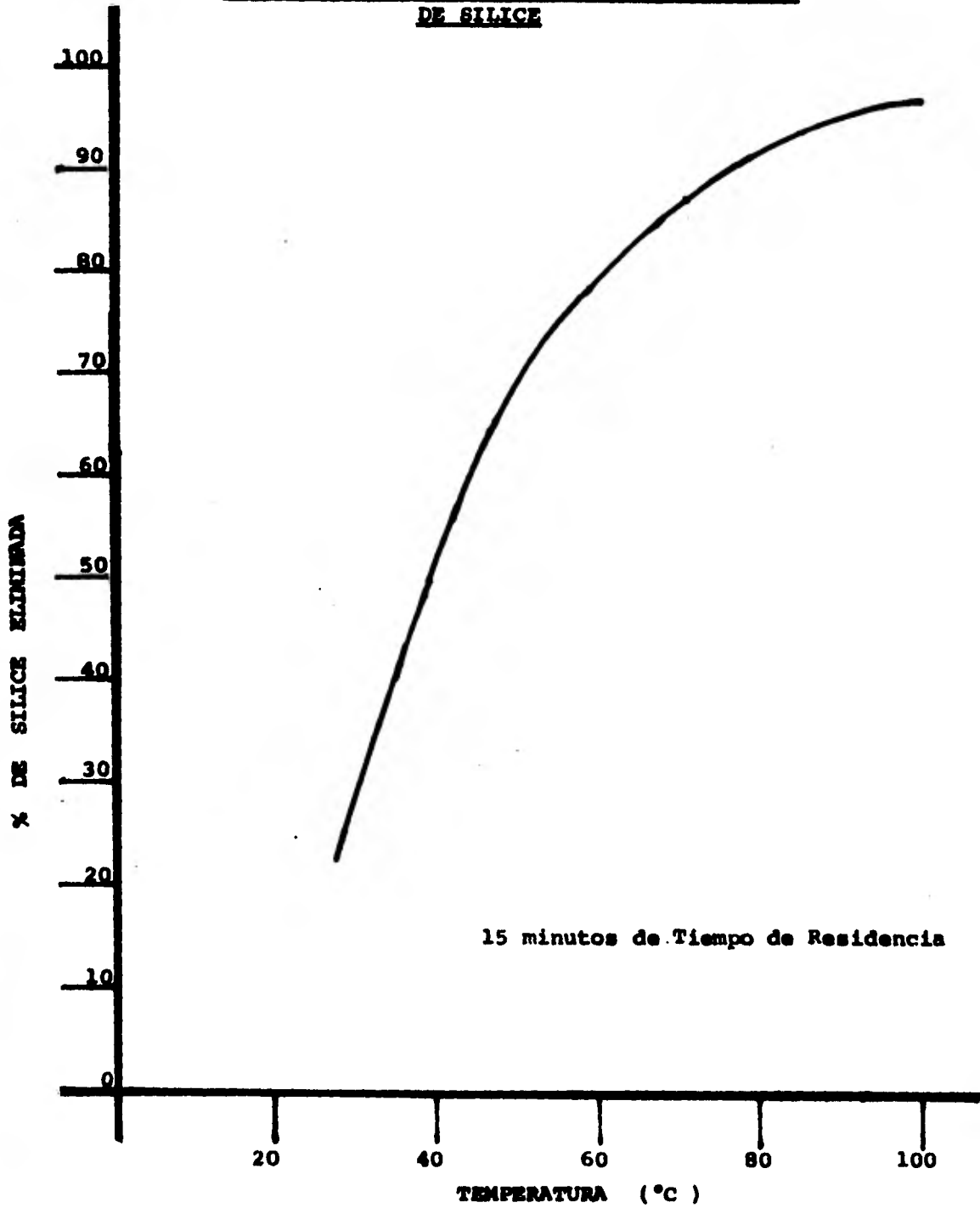


FIGURA No. II-2

EFFECTO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA EN LA ELIMINACION DE SILICE

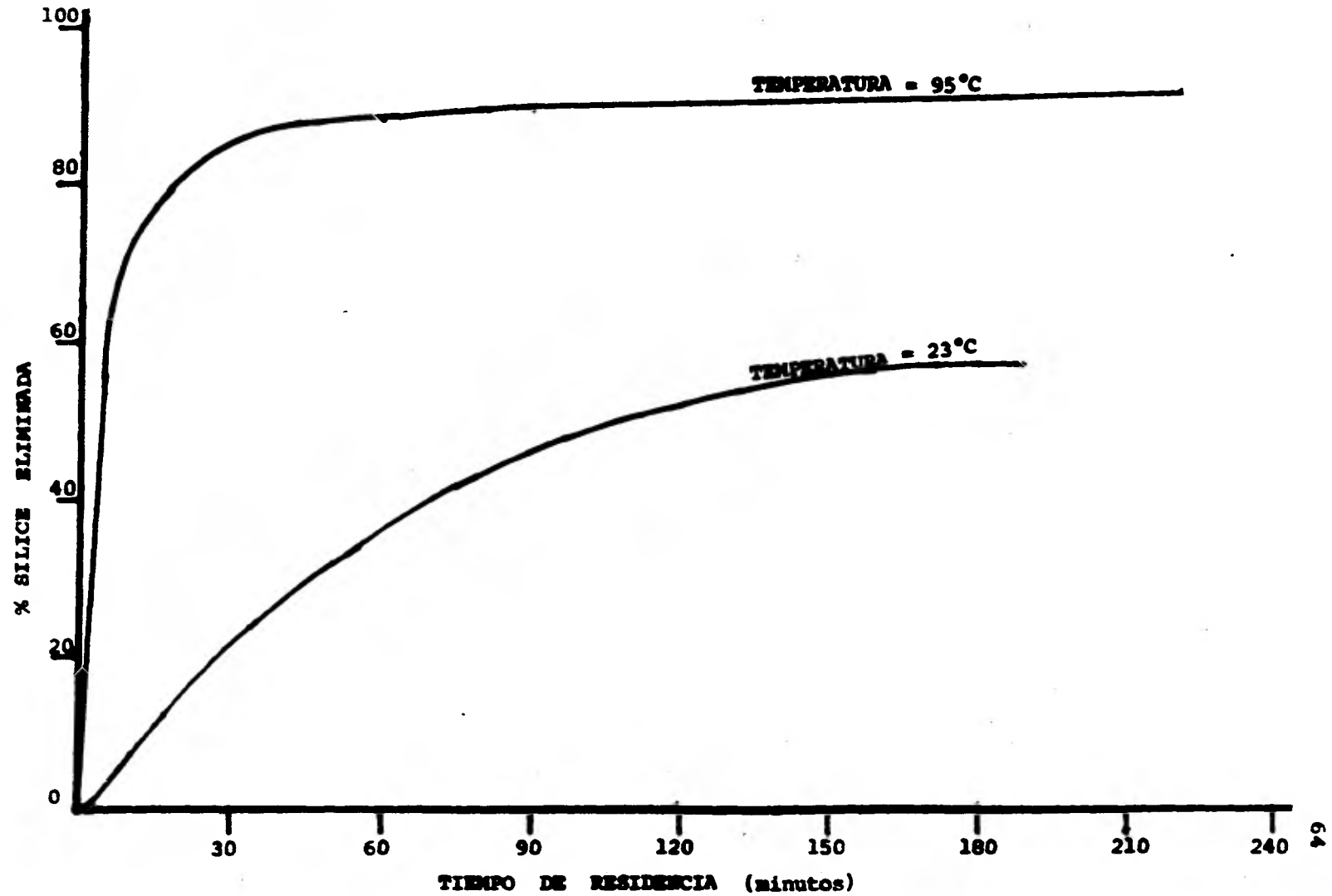


FIGURA No. II-3
EFECTO DEL pH EN LA ELIMINACION DE SILICE
(PROCESO CAL-CARBONATO)

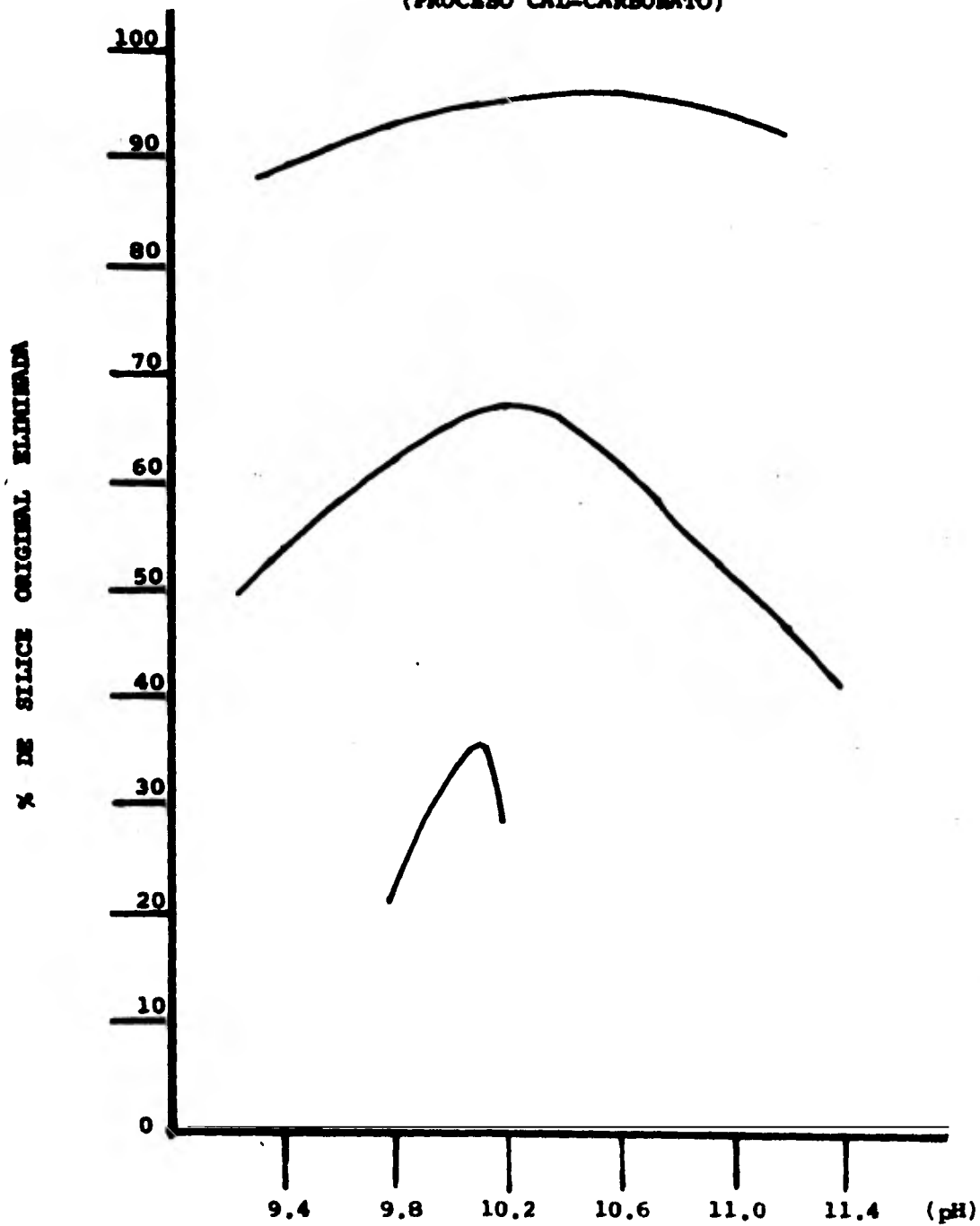


FIGURA No. II-4
EFFECTO DE LA RECIRCULACION DE LODOS EN LA ELIMINACION DE SILICE

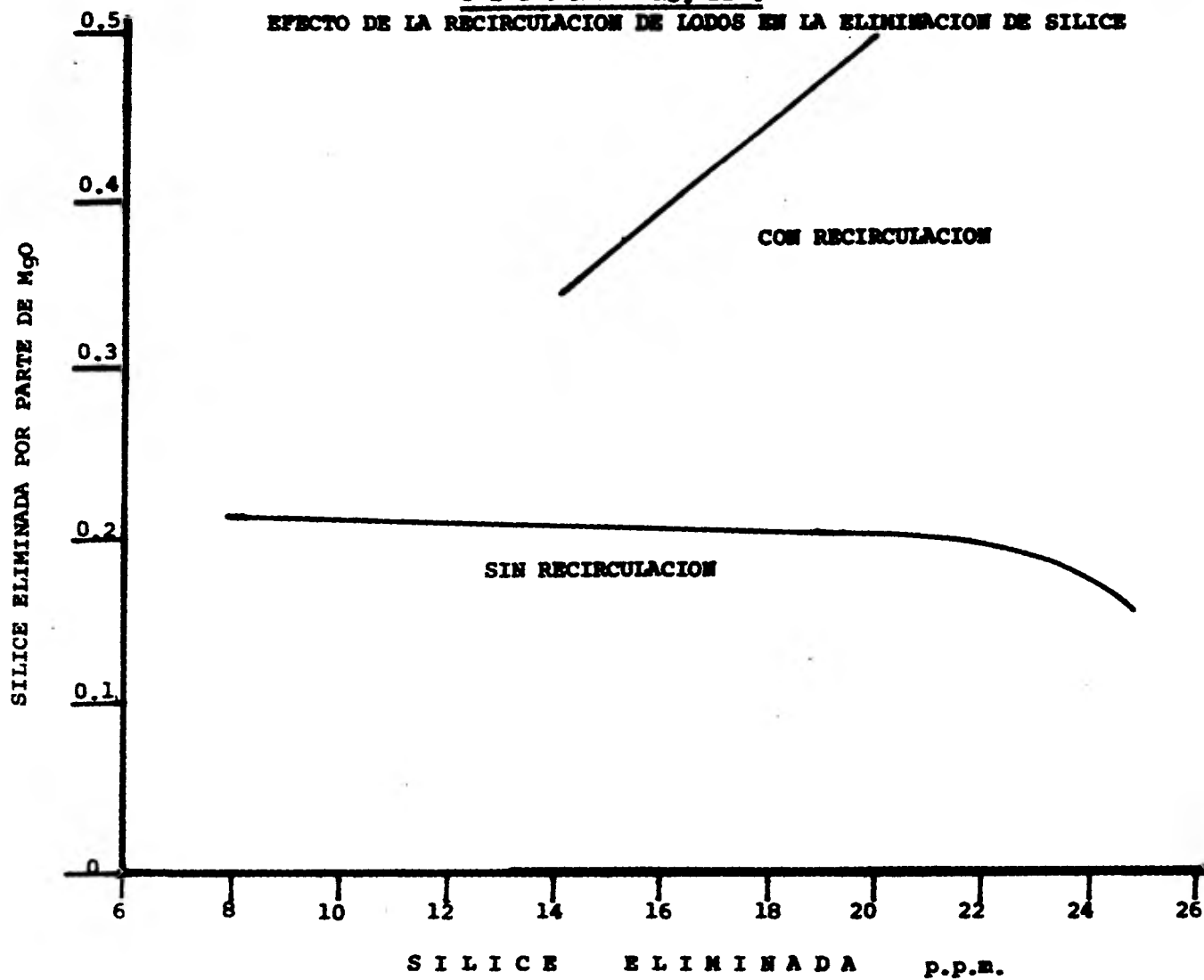


FIGURA No. II-5

EFFECTO DEL TIPO DE COMPUESTO DE MAGNESIO EN LA ELIMINACION DE SILICE.

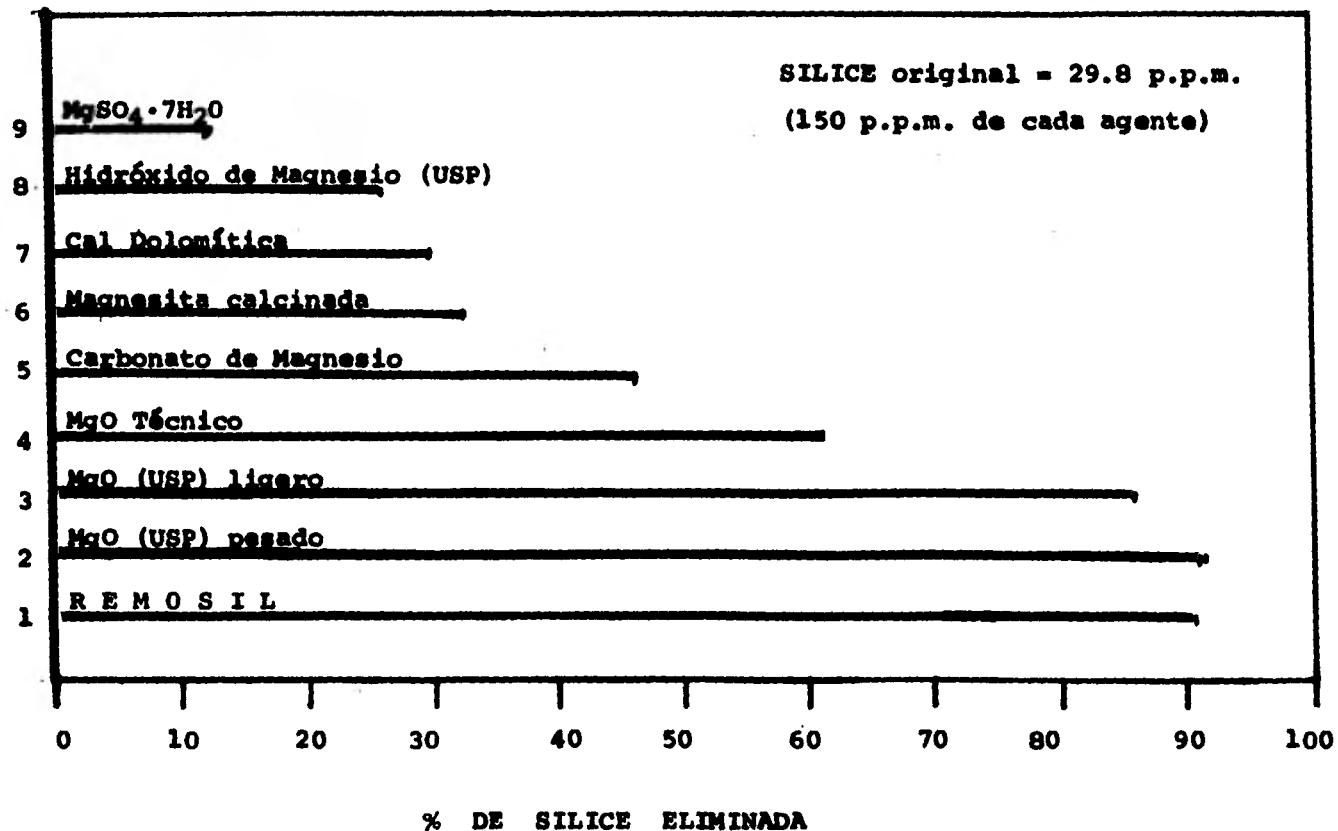
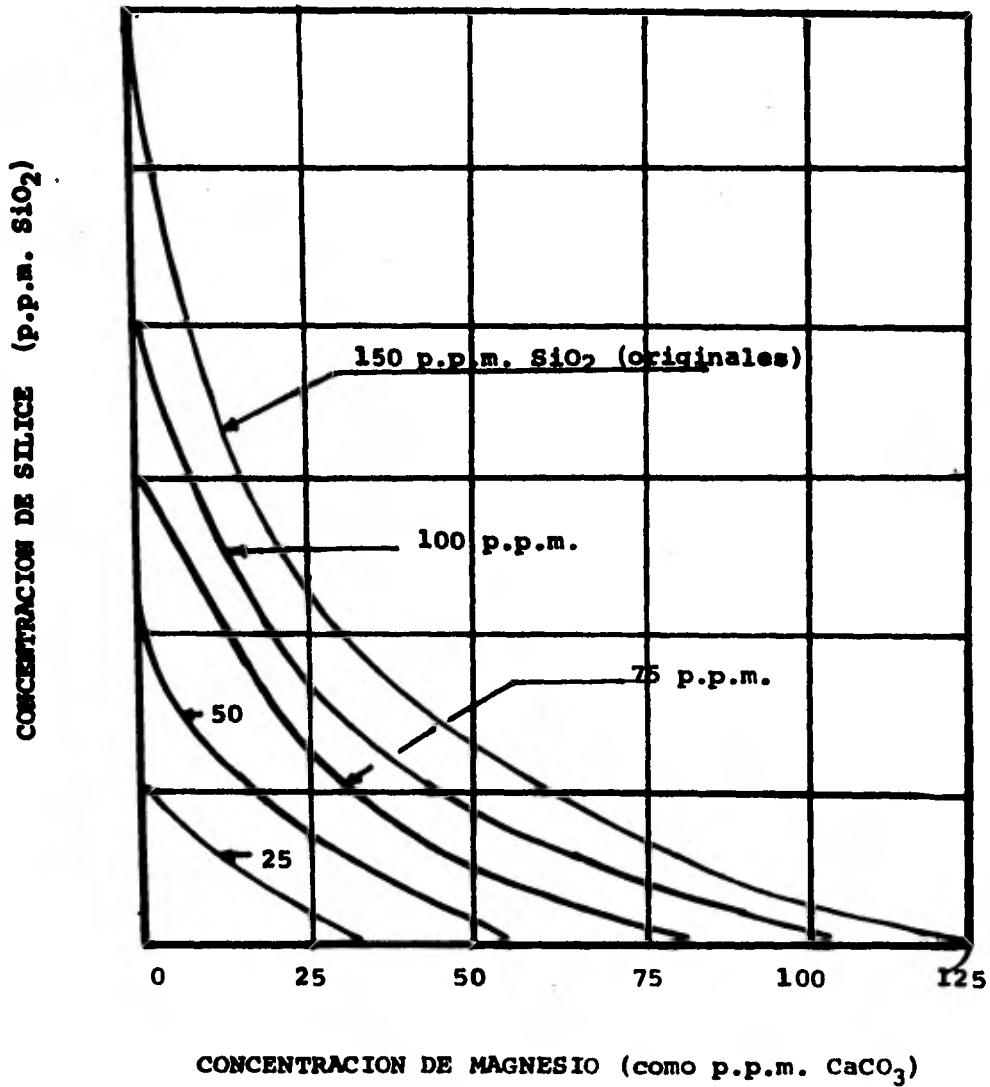


FIGURA No. II-6

EFFECTO DE LA CONCENTRACION INICIAL DE SILICE

Esto se debe probablemente a que al ser mayor la -
concentración inicial, los flóculos inicialmente -
son de mayor tamaño y por lo tanto, tienen mayor su
perficie de absorción inicial.

- g) PORQUE SE DECIDIO USAR EL TRATAMIENTO DE CAL - CARBONATO
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO Y PORQUE EN
CORRIENTE LATERAL.

Se decidió hacer el estudio de este tratamiento de
agua de enfriamiento debido a que en México, sobre
todo en el área del centro, se presentan problemas
por los altos contenidos de sílice, y, aparentemen-
te, este método es el más recomendado para ayudar a
resolver este problema.

A continuación se enumeran algunas ventajas de este
método con respecto a otros y algunos aspectos del -
porque de este tratamiento.

1. Al existir aguas de repuesto con alto contenido de sílice, limitan el número de ciclos de concentración a valores muy bajos, ocasionando con esto que la purga de los sistemas tengan un flujo muy alto y, por lo tanto, alto consumo de productos químicos para su acondicionamiento, aumentando los costos. Es por esto que se hace necesario eliminar la sílice - de alguna manera que nos permita tener ciclos de - concentración mas altos y por lo tanto, menor flujo de purga.

2. El tratamiento de cal-carbonato en frío tiene la ventaja de ser un método mas barato que otros en la eliminación de sílice. Los otros tratamientos pueden ser, ósmosis inversa, desmineralizador de lechos mixtos, etc... Claro que este es solo un análisis - cualitativo y se debería hacer un análisis económico para demostrar la ventaja del método, pero esto no es un objetivo de este trabajo.

3. ¿Porqué en corriente lateral y no en el agua de repuesto?

Como se dijo anteriormente el tratamiento cal carbó

nato se deberá hacer a una parte del agua de retorno a la torre y no al agua de repuesto. A continuación se enumeran algunas ventajas de hacerlo así:

3.1) el agua de retorno está mas caliente que el agua de repuesto y como se vió en el punto f.1.1, la temperatura incrementa la eficiencia en la sedimentación de la sílice.

3.2) el agua de circulación tiene mayor concentración de sílice que el agua de repuesto, obteniendo con ello mas eficiencia tal como se vio en el punto (f.1.1).

3.3) la concentración de la dureza es mayor en el agua de circulación, teniendo como ventaja tratar menor flujo de agua para eliminar la misma cantidad de sílice y por lo tanto, el clarificador sea de menor tamaño.

3.4) el agua de recirculación tiene un mayor contenido de magnesio, por lo que requiere menor cantidad de óxido de magnesio exterior que el agua de repuesto.

4. El hidróxido de magnesio tiene propiedades de coagulante, por lo que en este tratamiento se puede prescindir del uso de un coagulante exterior.

h) EQUIPO USADO EN EL TRATAMIENTO DE CAL - CARBONATO

El equipo usado en el tratamiento de agua por medio de cal carbonato en frío es el llamado clarificador de lecho suspendido. Este tipo de clarificadores se ha fabricado en un número apreciable de diseños diferentes, pero el principio básico en el cual todos difieren del equipo "convencional" antiguo, es que el agua tratada se filtra en flujo ascendente a través de un lecho de lodo suspendido formado de los precipitados previamente sedimentados. Hay varias ventajas obtenidas por este procedimiento. Primero, en la práctica americana, la mayoría de la cal usada en cualquier tipo de equipo, se dosifica en forma de suspensión. La cal hidratada tiene una solubilidad de solamente 0.18 partes por 100 partes de agua a 0°C y de 15% a 30°C. Como la suspensión que usualmente se alimenta es de 5%, es evidente que el 96% de ella está en forma de suspensión.

En el tipo de equipo "convencional" algo de esta suspensión se arrastra por los precipitados formados, antes de tener tiempo de disolverse y reaccionar con la dureza del agua, de manera que algo de la cal se desperdicia. En el tipo de equipo de lecho suspendido esto no sucede, debido a la filtración ascendente a través del lecho de precipitados, resultando en una solución completa y un uso total de la cal que se añade.

Segundo, es muy común que con el uso de equipo de tipo "convencional" ocurran "post-precipitaciones" que se presentan en los gránulos del medio filtrante de los filtros, tuberías o sistemas de distribución. La presencia de estos depósitos se ha achacado a la supersaturación o reacción incompleta en el equipo. En el equipo de lecho suspendido, el íntimo contacto del agua tratada - con grandes masas en la fase sólida, previenen la supersaturación y la formación de post-precipitaciones.

Tercero, la filtración ascendente y la ausencia de post-precipitaciones, conducen a la obtención de efluentes - que son suficientemente claros (menores de 10 ppm) para muchas aplicaciones industriales, de manera que a menudo

la filtración es innecesaria. Cuarto, en el equipo de tipo "convencional", el período de retención es de 2 a 4 ó más horas; con el equipo de lecho suspendido, es suficiente un período de retención de una hora. Esto hace al equipo más compacto y reduce los requerimientos de espacio.

Quinto, en la remoción de sílice, se requiere un contacto íntimo con grandes masas de sólidos reactantes o absorbentes y es obvio que esto se logra mejor en el equipo de lecho suspendido.

La figura II-7 es una vista transversal de un ablandador con cal carbonato en frío de lecho suspendido, con diseño vertical. La cámara exterior puede hacerse ya sea de acero o de concreto, mientras que la interior usualmente se hace de hierro, aunque algunas veces puede también hacerse de concreto.

Como se muestra, la cámara exterior consiste de una sección cónica en la que su parte mayor está dispuesta hacia arriba, mientras que la cámara interior es una sección piramidal cónica que tiene su base hacia abajo. El agua cruda y las sustancias químicas se introducen en la parte superior de la cámara interior donde se mezclan

por medio de un agitador mecánico dispuesto en la parte central. El agitador consiste de una serie de paletas, - montadas en una flecha vertical movido por un motor y un reductor de velocidad. Las revoluciones por minuto varían en los diferentes tamaños, pero la velocidad comúnmente usada en estas paletas es de 50 a 150 pies por minuto.

En las unidades de gran diámetro se usan velocidades variables. A medida que los constituyentes de la dureza - del agua reaccionan con las sustancias químicas que se añaden, se producen precipitados que se mantienen en suspensión por el agitador. El agua tratada, con estos precipitados obtenidos, fluye lentamente hacia el fondo de la cámara interior y ahí emerge por una serie de rendijas y cambia el sentido del flujo, empezando a subir lentamente por la cámara exterior. Frecuentemente se usan deflectores en la parte inferior de la cámara interior - para romper el movimiento de rotación del agua que desciende.

A medida que el agua asciende por la cámara exterior, su velocidad vertical en la parte inferior es suficiente para mantener los precipitados en suspensión. Debido a -

este diseño, el área transversal de la cámara exterior -
aumenta constantemente del fondo a la parte superior.
Consecuentemente, la velocidad vertical del agua tratada
disminuye constantemente también del fondo a la parte su-
perior. Finalmente se llega a un nivel, en el que un vo-
lúmen dado de lodos y un gasto dado de agua, son incapa-
ces de expandir el lecho de lodos suspendidos mas allá
de cierta altura. Esto determina el nivel superior de -
los lodos, y en la práctica hay una clara línea de demar-
cación entre la parte superior de los lodos y el princi-
pio de la zona de aguas claras, las que se colectan en
la parte superior y pasan directamente al servicio o a
los filtros, según se requiera.

El nivel de los lodos se mantiene constante purgando -
cierta cantidad de ellos equivalente a la velocidad con
que se forman; esto se puede hacer automáticamente. La -
operación de la purga de lodos usualmente se efectúa a
través de un concentrador. Esta pieza del aparato se -
muestra en la parte inferior de la cámara exterior en la
figura II-7 . Aumentando el flujo, aumenta la altura -
de los lodos, y bajándolo, disminuye. Sin embargo, debi-
do al aumento del área transversal en el sentido verti-
cal, hay un amplio factor de seguridad en la altura del

lecho suspendido si el flujo se aumenta. Por el contrario, si el flujo se disminuye, el lecho se contrae, pero puesto que la sección transversal disminuye hacia abajo, el lecho se mantiene "vivo" y funciona eficientemente. En general, los límites en los cuales este tipo de equipo funciona satisfactoriamente, es de 20% de su capacidad como límite inferior, y 110% como límite superior. La densidad de los lodos en el lecho suspendido varía de 1 a 2% de sólidos. La densidad de los lodos que salen del concentrador, es de 10 a poco menos de 15%. La purga de estos equipos se estima que debe ser entre 1 a 3% del flujo a tratar.

1) CALCULO DEL CONSUMO DE REACTIVOS EN TRATAMIENTO DE CAL - CARBONATO.

1.1) Conceptos:

primero es necesario analizar el balance químico del agua para conocer que tipo de dureza y alcalinidad se encuentran presentes.

Alcalinidades de Calcio, Magnesio y Sodio: aunque las sales en una solución tan diluida como en el -

agua no existen como tales sino en forma de iones, es conveniente representar el radical bicarbonato - como unido primero al calcio y luego al magnesio, ya que éste es el orden en el cual ocurre la precipitación cuando se añade cal al agua que contiene estos bicarbonatos. Esto es, el carbonato de calcio precipita primero debido a su baja solubilidad; siendo el carbonato de magnesio aproximadamente seis veces mas soluble, no precipitará como carbonato - excepto por la cantidad que exceda a su solubilidad.

Con la adición continuada de cal, precipitará el hidróxido de magnesio debido a su baja solubilidad. Las sales de sodio son extremadamente solubles.

Por esto, al inspeccionar un análisis de agua, la alcalinidad se calcula primero como unida al calcio y se le denomina alcalinidad de calcio. Si hay alguna alcalinidad sobrante, se calcula como unida al magnesio y se le llama alcalinidad de magnesio. Con un número relativamente pequeño de aguas naturales, puede estar presente un exceso de alcalinidad superior a las alcalinidades de calcio y magnesio.

En estos casos, se calcula como unida al sodio y se le llama alcalinidad de sodio. Si la dureza total, - dureza de calcio, magnesio, sodio y alcalinidad total (alcalinidad al anaranjado de metilo) se expresan como sus equivalentes en CaCO_3 , la aplicación de las siguientes reglas mostrará qué alcalinidades están presentes y en qué cantidades:

- (1) Alcalinidad de Calcio = a la dureza de calcio o alcalinidad total, cualquiera que sea menor (obviamente, si son iguales, cualquiera.)

- (2a) Alcalinidad de magnesio = a la dureza de magnesio si la alcalinidad total es igual a/o mayor que la dureza total.

- (2b) Alcalinidad de magnesio = a la alcalinidad total - dureza de calcio si la alcalinidad total es mayor que la dureza de calcio pero menos - que la dureza total.

- (3) Alcalinidad de sodio = alcalinidad total - dureza total.

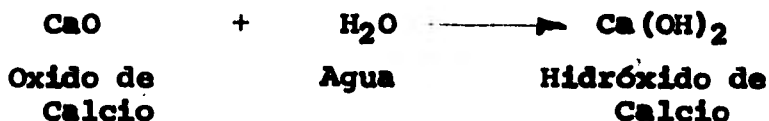
Si de las reglas anteriores se obtiene un valor de cero o un dato negativo en cualquiera de los resultados, ninguna de tal forma de alcalinidad está presente.

Dureza de no Carbonatos: la dureza de no carbonatos está presente si la dureza total es mayor que la alcalinidad total. Si está presente, se considera primeramente al magnesio, y segundo, al calcio, de manera que si hay cualquiera alcalinidad de magnesio presente no habrá dureza de no carbonatos debido al calcio.

i.2) Sustancias Químicas usadas; la cal añadida puede ser cal viva, cal hidratada, o para ciertos usos especiales tales como eliminación de sílice, dolomita o cal dolomítica hidratada.

Cal Viva: la adición de cal viva (CaO) es mucho más barata, en bases equivalentes, que el hidróxido de calcio o cal hidratada Ca(OH)_2 . Sin embargo, la -

cal viva requiere más cuidado en su almacenaje y manejo y debe ser apagada a $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con cantidades limitadas de agua antes de alimentarse.



La cal viva también se conoce como cal quemada. Un buen promedio de pureza en esta cal comercial es de 90% de CaO .

Cal Hidratada: la cal hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$, es más fácil de manejar que la cal sin apagar, puede almacenarse en almacenes de madera, y no requiere que se apague antes de usarse. La pureza promedio de la cal hidratada comercial es de 93% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Cal Dolomítica y Cal Dolomítica Hidratada: estos reactivos varían algo en las cantidades de magnesio que contienen. Para la eliminación de sílice, la cal dolomítica deberá ser de 58% de CaO y 40% de MgO , la cal dolomítica hidratada deberá tener 62% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y 32% de MgO .

Soda ash: el grado comercial usado es la soda ash - ligera, con 58% de Na_2O (que es equivalente a 99.2% de Na_2CO_3).

i.3) Cálculo de Reactivos: existen dos casos usados para el tratamiento de cal-carbonato en frío.

-- para la reducción de la dureza de bicarbonato y no carbonato, sin exceso de reactivos.

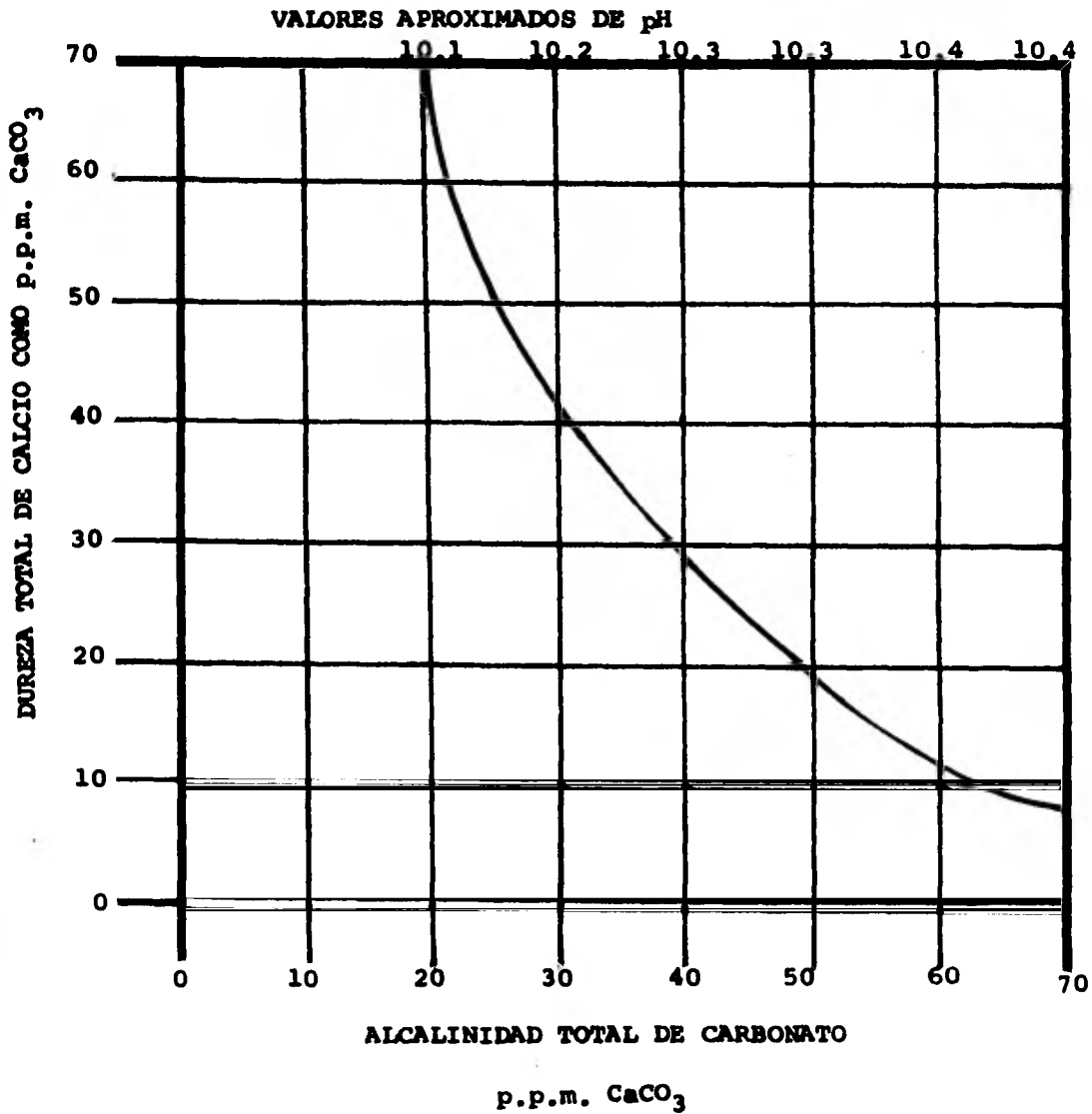
-- para la reducción de dureza total a cantidades muy bajas (16 ppm) usando exceso de reactivos.

Como nuestro caso es el fin del tratamiento del agua de enfriamiento, requiere mas de la eliminación de la sílice que de la dureza, y solo estudiaremos el primer caso.

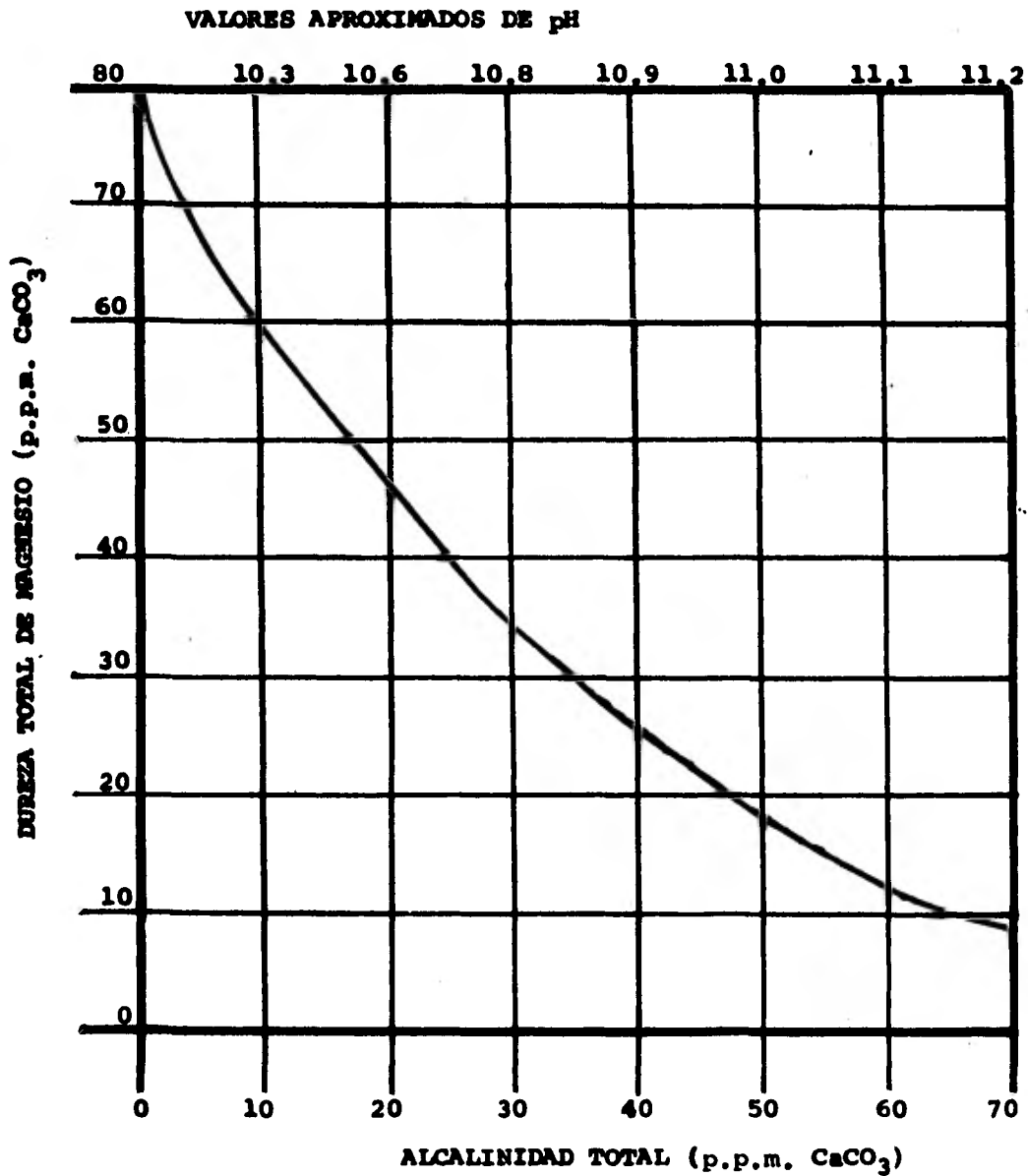
Residuos Garantizados: la curva de las figuras II-8 y II-9 , muestran las cantidades residuales de carbonato de calcio y de hidróxido de magnesio máximas garantizadas para este tipo de tratamiento con cal-carbonato.

F I G U R A No. II-8CANTIDAD RESIDUAL DE Ca^{++}

(PROCESO CAL - CARBONATO)



CANTIDAD RESIDUAL DE Mg^{++}
(PROCESO CAL - CARBONATO)



Hay que hacer notar que las gráficas están hechas a partir de la solubilidad de los productos y que en la práctica pueden ser menores debido principalmente al efecto del ión común. Para datos de diseño se puede tomar que la cantidad máxima de carbonato de calcio residual sea de 35 ppm y de MgOH como CaCO_3 , de 33 ppm, cuando no existan excesos de alcalinidad.

Símbolos que se usan: todas las cantidades usadas están en ppm.

DT	=	dureza total
DNC	=	dureza no carbonatos
Alc	=	alcalinidad anaranjado de Metilo (total)
Ca Alc	=	alcalinidad de calcio
DCa	=	dureza de calcio
DCaN	=	dureza de calcio no carbonatos
Mg Alc	=	alcalinidad de magnesio
DMg	=	dureza de magnesio
DMgN	=	dureza de magnesio no carbonatos
Na Alc	=	alcalinidad de sodio

Análisis del efluente y Objetivos: se elimina el CO_2 .
La dureza de calcio se reduce a 35 ppm. La dureza de magnesio no carbonato se reduce al límite deseado (véase la figura II-9). La alcalinidad de magnesio será la cantidad determinada de la figura II-9 . La alcalinidad restante será alcalinidad de carbonato.

Los siguientes valores de consumo están dados en base a los balances de materiales a partir de las ecuaciones de reacción química (tabla No. II-13).

T A B L A N o . I I - 1 3

**PROCESO DE CAL SODADA EN FRIO PARA LA REDUCCION DE
 ALCALINIDAD Y DUREZA DE NO CARBONATO: DOSIS
 DE CAL HIDRATADA Y CARBONATO DE SODIO
 REQUERIDOS.**

_____ KG/M³ _____

	CAL HIDRATADA (al 93%)	CARBONATO DE SODIO (al 98%)
CO ₂ LIBRE (ppm CO ₂)	x 0.00181	NO
Alc (ppm CaCO ₃)	x 0.0008	NO
DMgN para ser eliminada (ppm CaCO ₃)	x 0.0008	x 0.00108
ALCALINIDAD Mg (como CaCO ₃)		
RESIDUAL EN EL EFLUENTE	x 0.00080	x 0.00108
DCaN (ppm CaCO ₃)	NO	x 0.00108

El análisis del efluente se calculará como sigue:

dureza de calcio = 35 ppm como CaCO_3

dureza de magnesio = cantidad deseada (ver figura II-9)

dureza total = dureza de calcio + dureza de magnesio

Alcalinidad = 35 + alcalinidad de magnesio como $\text{Mg}(\text{OH})_2$

1.4) SILICE RESIDUAL

Para estimar la cantidad de sílice residual en el efluente se puede estimar de la gráfica No. II-6, entrando con el dato de sílice inicial comparado vs hidróxido de magnesio formado, se puede obtener el valor de sílice residual.

Se puede considerar que un valor de sílice residual de 20 ppm es un valor óptimo conservador para el diseño del tratamiento del agua de enfriamiento con cal carbonato.

DESARROLLO DE UN EJEMPLO CON EL USO DEL TRATAMIENTO CALCARBONATO EN CORRIENTE LATERALa) D A T O S:

1.- Condiciones de operación del sistema de enfriamiento del ejemplo:

-- flujo de circulación de agua de enfriamiento	150,000 lts/min
-- tipo de torres	Tiro mecánico de doble flujo cruzado con relleno plástico.
-- volúmen del sistema de enfriamiento (incluyendo cisterna de agua fría, tuberías y equipos de transferencia de calor).	2800 M ³
-- pérdidas por arrastre garantizado	0.1% de la recirculación
-- temperatura de suministro	30°C
-- temperatura de retorno	40°C
-- presión de suministro	4 KG/cm ²
-- presión de retorno	1.5 KG/cm ²
-- presión barométrica del lugar	600 mmHg

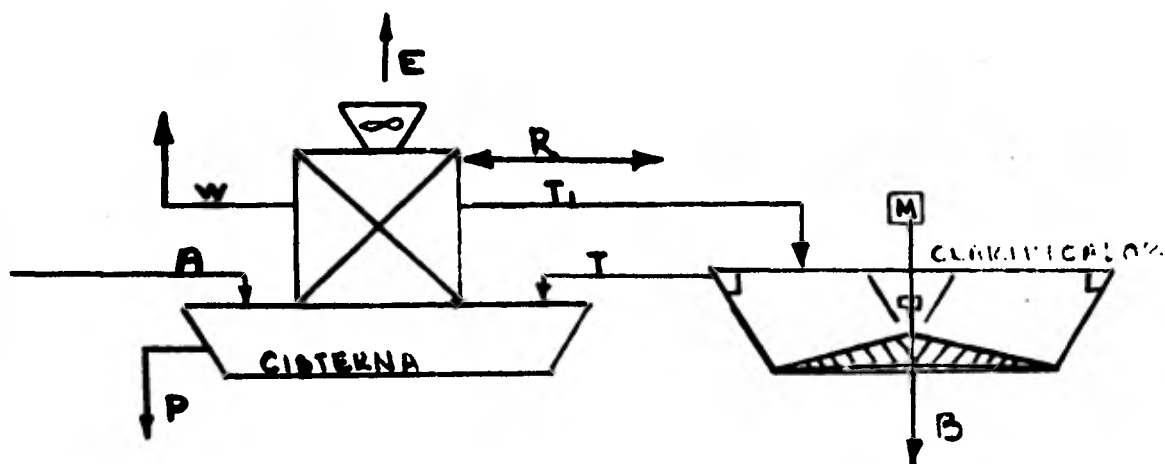
2) ANALISIS DEL AGUA DE POZO (AGUA DE REPUESTO)

CATIONES (como ppm CaCO_3)		ANIONES (como ppm CaCO_3)	
Calcio	250	Bicarbonatos	460
Magnesio	62	Carbonatos	113
Sodio	420	Cloruros	65
		Sulfatos	94
T O T A L	732	T O T A L	732

Dureza total	= 312 ppm como CaCO_3
Alcalinidad total	= 573 ppm como CaCO_3
Sílice	= 75 ppm como SiO_2
pH	= 7.6
Sólidos Disueltos	= 1148 ppm

Nota; este análisis de agua de pozo es típico para la zona del Bajío en la República Mexicana. Es de hacer notar que el agua de pozo de la zona centro, presenta altos contenidos de Sílice y generalmente, es muy dura.

b) BALANCE DE MATERIA Y CALCULO DE REACTIVOS



DONDE:

- A = Agua de repuesto (lts/min)
- W = Pérdidas por arrastre (lts/min)
- E = Pérdidas por evaporación (lts/min)
- R = Agua de recirculación (lts/min)
- T₁ = Agua a tratar (lts/min)
- T = Efluente tratado (lts/min)
- P = Purga del sistema de recirculación del agua (lts/min)
- B = Purga del clarificador continuo (lts/min)

Como se puede observar del análisis de agua de repuesto la cantidad de sílice nos limita a dos ciclos de concentración (sílice máxima per. = 150), por lo que es necesario eliminar

sílice para poder aumentar el número de ciclos de concentración. Supongamos que queremos elevar a diez el número de ciclos de concentración, entonces el balance lo podemos hacer por pasos.

PASO No. 1) Realizar Balance Total de Aguas.

DATOS: Agua de Recirculación, $R = 150\ 000$ lts/min

$$E = 0.001 \Delta T(^{\circ}F) \times R = 0.001 \times 10^{\circ}C \times 1.8 \text{ }^{\circ}F/^{\circ}C \\ \times 150\ 000 \text{ lts/min} \\ = 2700 \text{ lts/min}$$

$$W = 0.0001 R = 0.001 \times 150\ 000 \text{ lts/min} = 150 \text{ lts/min}$$

$$B + P = \frac{E}{N - 1} - W = \frac{2700}{10 - 1} - 150 = 150 \text{ lts/min}$$

Donde $N = \text{No. de ciclos} = 10$

$$A = E + W + P + B = 2700 + 150 + 150 = 3000 \text{ lts/min}$$

PASO No. 2) Estimar Cantidad de Agua a Tratar en Corriente Lateral.

Para este paso usamos la sílice como compuesto de correlación, sabiendo que SiO_2 max. perm. en el agua de re-

circulación es de 150 ppm.

De acuerdo a nuestro esquema de balance podemos escribir las siguientes ecuaciones:

$$P + B = \text{purga total} = 1200 \text{ lts/min}$$

$$A(S_A) = W(S_W) + P(S_P) + B(S_B)$$

$$T_1(S_{T_1}) = T(S_T) + B(S_B)$$

$$T_1 = T + B$$

También recordemos del párrafo II-h que la purga del clarificador debe ser alrededor del 1%--3% del agua a tratar, entonces, también podemos escribir que: (tomando el valor más alto)

$$B = 0.03 T_1$$

$$T = 0.97 T_1$$

Donde: $S_A = \text{SiO}_2$ ppm en agua de repuesto = 75

$S_W = \text{SiO}_2$ en arrastre = 150 ppm

$$S_P = \text{SiO}_2 \text{ en purga del sistema} = 150 \text{ ppm}$$

$$S_A = \text{SiO}_2 \text{ en purga del clarificador} \\ \text{(suspendido + disuelto)}$$

$$S_{T_1} = \text{SiO}_2 \text{ en agua a tratar} = 150 \text{ ppm}$$

$$S_T = \text{SiO}_2 \text{ en efluente del tratamiento} = 20 \text{ ppm} \\ \text{(ver punto II-i.4)}$$

$$S_R = \text{SiO}_2 \text{ en agua de recirculación} = 150 \text{ ppm}$$

$$= S_W = S_P = S_{T_1}$$

Despejando obtenemos que:

$$T_1 = \frac{A(S_A) - (W + B + P) S_R}{0.97 (S_R - S_T)}$$

$$= \frac{3000(75) - (150 + 150) 150}{0.97 (150 - 20)}$$

$$= 1427.4 \text{ lts/min de agua de recirculación a tratar}$$

$$B = 0.03 T_1 = (0.03) (1427.4) = 42.8 \text{ lts/min de agua de} \\ \text{purga del clarificador}$$

$$T = 0.97 (T_1) = (1427.4) (0.97)$$

$$= 1384.6 \text{ lts/min de efluente tratado}$$

$P = 150 - B = 150 - 42.8 = 107.2$ lts/min de purga del
sistema de enfriamiento.

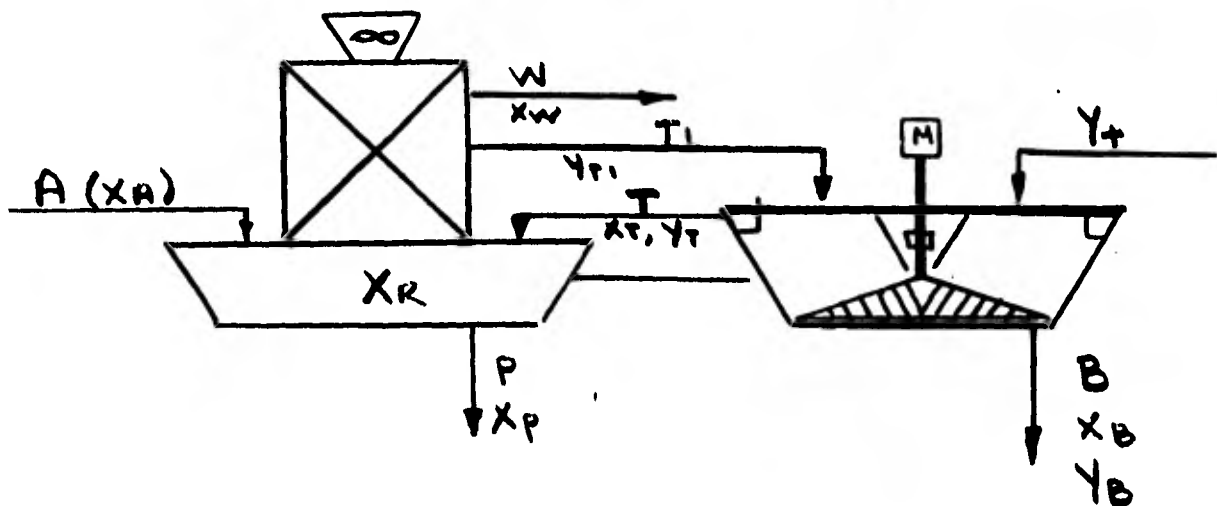
$$S_B = \frac{(T_1) ST_1 - TS_T}{B}$$

$$= \frac{(1427.4)(150) - (1384.6)(20)}{42.8}$$

= 4355.6 ppm de sílice que se elimina por la purga
del clarificador

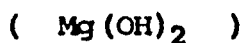
PASO No. 3

DETERMINAR EL BALANCE DE Mg COMO CaCO_3 (se establece un balance similar al del Silice).



Donde: $Y = \text{ppm de Mg(OH)}_2 \text{ como CaCO}_3$

$X = \text{ppm dureza de Mg no alcalino como CaCO}_3$

BALANCE DE DUREZA DE NO CARBONATO Y ALCALINIDAD DE Mg

Para hacer este balance se postulan las siguientes suposiciones que deben comprobarse al final:

- el agua de circulación y repuesto sólo tiene Mg en forma de dureza no alcalina, y, además,
 $X_p = X_w = X_R$ (la dureza en recirculación= purga y la purga=arrastre).

- es necesario convertir toda la dureza del agua a tratar (T) a $\text{Mg}(\text{OH})_2$ para poder eliminar la sílice, por lo tanto, $Y_{T1} = M_R$ (dureza en circulación= dureza convertida a $\text{Mg}(\text{OH})_2$ en el tratamiento).

- es necesario adicionar MgO al tratamiento para obtener el límite de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ requerido para tener 20 ppm de Sílice en el efluente (se requieren - 175 ppm de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ como CaCO_3 presentes en el agua a tratar para reducir a la sílice hasta 20 ppm, partiendo de una concentración inicial de

150 ppm según gráfica II-6).

-- la dureza de Mg a la salida del efluente es -
 igual a la alcalinidad residual de Mg (esto sucede a dureza residual de 33 ppm como CaCO_3 y a un pH de 10.8), por lo tanto $X_T=0$, $Y_T=33$ ppm, y ,
 además en la purga, $X_B = 0$.

-- Y_+ es la cantidad de MgO en ppm de CaCO_3 base -
 agua a tratar que es necesario adicionar.

Teniendo todo lo anterior en mente, podemos realizar los siguientes balances: (todo como CaCO_3 de Mg^{++}).

$$A(X_A) + T_1(Y_+) = (P + W)X_R + BY_B$$

$$T_1(X_R + Y_+) = TY_T + BY_B$$

$$X_R + Y_+ = 175 \text{ ppm}$$

$$Y_T = 33 \text{ ppm}$$

Entonces,

$$Y_B = \frac{T_1 (X_R + Y_+) - T Y_T}{B}$$

$$Y_B = \frac{1427.4(175) - 1384.6(33)}{42.8}$$

$Y_B = 4768.8$ ppm de $Mg(OH)_2$ como $CaCO_3$ que salen por la purga del clarificador

$$X_R = \frac{A(X_A) + T_1(175) - BY_B}{P + W + T_1}$$

$$X_R = \frac{3000(62) + 1427.4(175) - 4768.8(42.8)}{107.2 + 150 + 1429.4}$$

$X_R = 137.5$ ppm de Mg^{++} como dureza no alcalina en el agua de circulación = ppm de Mg que se convierten a $Mg(OH)_2$ en el agua a tratar

$$Y_+ = 175 - X_R$$

$$Y_+ = 175 - 137.5$$

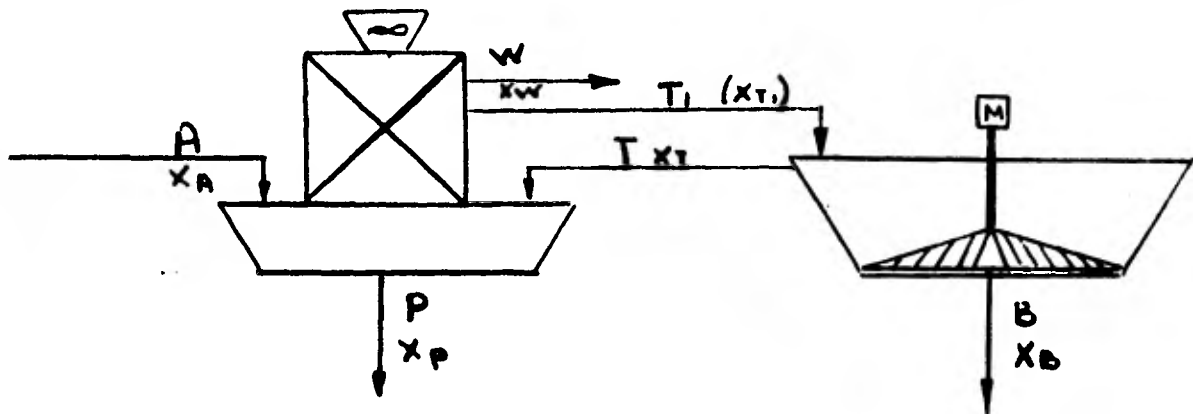
$Y_+ = 37.5$ ppm de MgO como CaCO_3 en base agua a tratar que es necesario adicionar para obtener 20 ppm de sílice en el efluente.

PASO No. 4

DETERMINACION DE DUREZA DE CALCIO

Para este caso sabemos que es necesario pasar todo el calcio a CaCO_3 mediante la adición de cal y carbonato, para así poder actuar sobre el ión Mg, por lo tanto podemos estimar que a la salida del tratamiento la dureza (alcalinidad) debida a Ca^{++} será igual a 35 ppm como CaCO_3 (de la gráfica II-8).

El balance quedaría como sigue:



Donde: X_x = ppm de Calcio como CaCO_3 en la corriente X

$$X_W = X_P = X_{T_1} = X_R$$

Los balances los podemos escribir como:

$$AX_A = (W + P) X_R + BX_B$$

$$T_1 X_R = TX_T + BX_B$$

$$X_T = 35 \text{ ppm como dureza} = \text{alcalinidad total de Ca}^{++}$$

Despejando:

$$X_R = \frac{AX_A + TX_T}{W + P + T_1}$$

$$X_R = \frac{3000(250) + 1384.6 (35)}{150 + 107.2 + 1427.4}$$

$$X_R = 474 \text{ ppm de Ca}^{++} \text{ en el agua de recirculación}$$

$$X_B = \frac{T_1 X_R - TX_T}{B}$$

$$X_B = \frac{1427.4 (474) - 1384.6 (35)}{42.8}$$

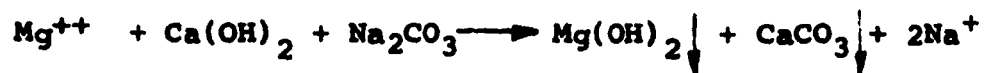
$$X_B = 14675.1 \text{ ppm de Ca}^{++} \text{ que se van en la corriente de purga del clarificador.}$$

PASO No. 5DETERMINACION DE LA CONCENTRACION DEL ION Na^+

En este caso tenemos que considerar que se adiciona Sodio a travez del tratamiento de cal carbonato.

-- Estimación de sodio por concepto de tratamiento para convertir la dureza de Mg^{++} a hidróxido de magnesio.

De la reacción entre carbonato de sodio y el ión Mg^{++} en forma de dureza no alcalina:



Observamos que 1 ppm de Mg^{++} como CaCO_3 nos da 1 ppm de Na^+ como CaCO_3 en base al agua a tratar, y como la cantidad de Mg^{++} a tratar es igual a la dureza de Mg en la corriente de circulación, entonces la cantidad de Na^+ adicional es igual a 137.5 ppm como CaCO_3 (del paso No. 3).

-- Estimación por concepto de tratar la dureza de calcio no alcalina con Na_2CO_3 ;

De la reacción vemos que:



Por lo tanto, 1 ppm de dureza de calcio no alcalina a tratar (como CaCO_3) produce 1 ppm de Na^+ como ppm CaCO_3

También debemos tomar en cuenta que no toda la dureza de Ca^{++} en el agua a tratar es dureza no alcalina, sino que una parte viene como alcalinidad residual que ayuda a mantener el control en el agua de recirculación y además que el carbonato de sodio no reacciona con ella.

Podemos suponer que la alcalinidad residual es igual a 110 ppm y que nos da un Ph aproximado de 7.5 (ver tabla No. II - 11), esto lo debemos checar al final - del análisis con el índice de estabilidad.

Podemos establecer que la cantidad de Na^+ suministrado por el tratamiento es igual a Ca^{++} total en agua a tratar - alcalinidad residual.

ppm como CaCO_3 de Na^+ = $474 - 110 = 364$ ppm (del paso 4)

Por lo tanto, Na^+ adicional por tratamiento = $137.5 + 364$
 = 501.5 ppm

como CaCO_3 base agua a tratar.

Con la anterior información establecida, podemos escribir las siguientes ecuaciones:

$$A(X_A) = (P + W) X_R + BX_B$$

$$X_R + X_+ = X_B$$

X_+ = 501.5 ppm CaCO_3 de Na^+ adicionales

X_R = Na^+ en agua de circulación = arrastre = purga

X_B = Na^+ en purga de clarificador = Na^+ en efluente tratado

X_A = en agua de repuesto

$$X_B = \frac{A(X_A) + (P + W) X_+}{P + W + B}$$

$$X_B = \frac{(3000)(420) + (150 + 107.2)(501.5)}{(150 + 107.2 + 42.8)}$$

$X_B = 4630$ ppm de Na^+ como CaCO_3 en la purga del clarificador = Na^+ en agua tratada

$$X_R = X_B - X_+$$

$X_R = 4630 - 501.5 = 4128.5$ ppm como CaCO_3 de Na^+ en el agua de circulación.

PASO No. 6

ESTIMACION DE CLORUROS EN EL AGUA DE CIRCULACION.

Como no se modifica por tratamiento, la ecuación de balance será como sigue:

$$X_R = NX_A$$

N = número de ciclos de concentración

X_R = Cl^- como CaCO_3 en el agua de circulación = purgas y agua tratada y arrastre

$$X_A = \text{Cl}^- \text{ en A como ppm como CaCO}_3$$

$$X_R = 10(65) = 650 \text{ ppm de Cl}^- \text{ como CaCO}_3$$

PASO No. 7

ALCALINIDAD: Como se vio en el paso no. 5, la alcalinidad en el agua de circulación = alcalinidad residual = 110 ppm como CaCO_3 . Esta alcalinidad la podemos suponer debida solo a bicarbonato de calcio debido al tratamiento con ácido sulfúrico.

En el efluente del tratamiento la alcalinidad se deberá a las ppm de CaCO_3 y Mg(OH)_2 residuales = $35 + 33 = 68$ también = dureza total.

PASO No. 8

DETERMINACION DE SULFATOS

Estos se calculan a partir de los $\text{SO}_4^{=}$ del agua de repurg + los debidos a la adición de ácido sulfúrico,; para calcularlos basta con determinar el faltante de aniones en el balance químico del agua.

$$X_R = NX_A$$

Donde: X_A = sulfatos en el agua de repuesto = 94+15.6*

*impartidos por el aire, ppm de CaCO_3

(ver tabla No. II-9)

X_R = sulfatos en el agua de recirculación debidos al agua de repuesto

$$X_R = 10(109.6) = 1096 \text{ ppm de sulfatos como ppm de } \text{CaCO}_3$$

BALANCE QUIMICO EN EL AGUA DE CIRCULACION

(como ppm CaCO_3)

<u>C A T I O N E S</u>		<u>A N I O N E S</u>	
Calcio	474	Cloruro	650
Magnesio	137.5	Bicarbonato	110
Sodio	4128.5	Sulfato	1096
	<hr/> 4740		<hr/> 1856

El faltante se debe a los sulfatos adicionados como ácido sulfúrico.

Sulfatos por ácido sulfúrico = 4740 - 1856

= 2884 ppm como CaCO_3

Sulfatos totales = 2884 + 1096 = 3980 ppm

Para comprobación, el balance químico del agua de efluente del tratamiento debe chequear con la misma cantidad de sulfatos ya que no se modifican por el tratamiento.

(todo como ppm de CaCO_3)

Calcio	35	Cloruro	650
Magnesio	33	Carbonatos	35
Sodio	4630	Hidróxidos	33
		Sulfatos	3980
	<hr/>		<hr/>
	4698		4698

PASO No. 9

DETERMINACION DEL CO_2 DISUELTO EN EL AGUA DE CIRCULACION

De la tabla mostrada en el inciso II.e.2 se obtiene que - para una alcalinidad residual de 110 y un pH de 7.5, la cantidad de CO_2 será de 7 ppm como CO_2 .

PASO NO. 10

CONSUMO DE REACTIVOS

10.1) C A L

De la tabla No. II-13

x CO ₂ libre = 7 ppm x 0.00181	0.01267
x alcalinidad residual de bicarbonato = 110 x 0.0008	0.088
x dureza de Mg = 137.5 x 0.0008	0.11
	<hr/> 0.21067
	Kg al 93%/m ³ de agua a tratar.

$$\text{Consumo por día} = 0.21067 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 1.4274 \text{ m}^3/\text{min} \times 1440 \text{ min/día}$$

$$= 433.0 \text{ Kg de cal 93\%/día}$$

10.2) Carbonato de Sodio

De la tabla No. II-13

Por dureza de Mg 137.5 x 0.00108	0.1485
Por dureza de Ca 364 x 0.00108	0.39312
	<hr/> 0.54162
	Kg de Na ₂ CO ₃ al 98% por m ³ de agua tratada

$$\text{Consumo/día} = 0.54162 \text{ Kg/m}^3 \times 1.4274 \text{ m}^3/\text{min} \times 1440 \text{ min/día}$$

$$= 1113.3 \text{ Kg/día de Na}_2\text{CO}_3 \text{ al 98\%}$$

10.3) Oxido de Calcio

Del paso No. 3 se requieren 137.5 ppm de MgO para el tratamiento suponiendo 90%, tenemos lo siguiente:

$$\frac{\text{Kg MgO}}{\text{m}^3 \text{ agua tratada.}} = 137.5 \text{ mg/litro} \times 10^3 \text{ lts/m}^3 \times \text{Kg}/10^6 \text{ mg} \times \frac{\text{pureza}}{0.9}$$

$$\times \frac{\text{PM MgO} = 40}{\text{PM CaCO}_3 = 100} = 6.11 \times 10^{-2} \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Consumo Kg/día} = 6.11 \times 10^{-2} \text{ Kg/m}^3 \times 1.4274 \text{ m}^3/\text{min} \times 1440 \text{ min/día}$$

$$= 125.6 \text{ Kg/día}$$

10.4) Acido Sulfúrico Base 98%

La cantidad de sulfatos en el agua de recirculación adicionales es de 2884 ppm del punto 7. Sólo es necesario reponer el que se pierde en el agua de purgas + arrastre.

$$\begin{aligned}
 \text{Consumo Kg/día} &= \text{ppm} \times (\text{W}+\text{P}+\text{B}) \times \frac{\text{PM H}_2\text{SO}_4 = 98}{\text{PM CaCO}_3 = 100} \\
 &\times \frac{\text{pureza}}{0.98} \times 1\text{Kg}/10^6 \text{ mg} \times 1440 \text{ min/día} \\
 &= 1.44 \times 10^{-3} \text{ ppm (W+P+B)} \\
 &= 1.44 \times 10^{-3} \times 2884 \times (150+107.2+42.8) \\
 &= 1245.9 \text{ Kg/día de ácido al 98\%}
 \end{aligned}$$

10.5) Inhibidor de Corrosión e Incrustaciones

En este caso usaremos el producto del fabricante Nalcomex, Nalco-7350, con un costo aprox. de \$53.50/Kg. Dicho producto está fabricado a base de polifosfatos orgánicos y se debe mantener de 30 - 70 ppm en el agua de circulación, con una dosificación promedio de 50 ppm.

$$\begin{aligned}
 \text{Consumo Kg/día} &= \text{ppm} \times (\text{W}+\text{P}+\text{B}) \times \text{Kg}/10^6 \text{ mg} \times 1440 \text{ min/día} \\
 &= 50(150+107.2+42.8) \times 1/10^6 \times 1440 \\
 &= 21.6 \text{ Kg/día}
 \end{aligned}$$

10.6) Dosificación de Biocida

Para este dato es necesario conocer el volúmen total del sistema.

$$\begin{aligned} \text{volúmen del sistema} &= 2800 \text{ m}^3 + \text{volúmen del clarifi} \\ &\text{cador en base de dos horas de tiempo de residencia} \\ &= 2 \text{ hr} \times 1.4274 \text{ m}^3/\text{min} \times 60 \text{ min/hr} = 171 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{VOLUMEN TOTAL} = 171 \text{ m}^3 + 2800 \text{ m}^3 = 2971 \text{ m}^3$$

Para este caso se usará el producto Nalco-7328 que tiene un costo aprox. de \$78.20/Kg, que se debe dosificar una vez por semana a razón de 200 ppm con respecto al volúmen del sistema.

$$\begin{aligned} \text{Consumo/día} &= 2971 \text{ m}^3 \times 200 \text{ mg/lt semana} \times 1000\text{lt}/\text{m}^3 \\ &\quad \times 1\text{Kg}/10^6 \text{ mg} \times \text{semana}/7 \text{ días} \\ &= 8.49 \text{ Kg/día} \end{aligned}$$

10.7) Consumo de Cloro

Del punto No. II-e.5, tenemos que:

$$\text{F.A.} = R \times \text{ppm} \times 6 \times 10^{-5}$$

$$C = F.A. \times T$$

Donde : F.A. = alimentación de cloro gas en Kg/hr (razón de flujo)

R = agua de recirculación = 150000 lts/min

ppm = cloro inicial generalmente = 5 ppm

C = consumo diario de cloro gas en Kg/día

T = duración de la dosificación en Hr/día, generalmente = 4 horas/día

$$F.A. = 150000 \text{ lts/min} \times 5 \times 6 \times 10^{-5} = 45 \text{ Kg/hr}$$

$$C = 45 \text{ Kg/hr} \times 4 \text{ Hr/día} = 180 \text{ Kg/día}$$

PUNTO No. 11

CALCULO DE SOLIDOS SUSPENDIDOS

Como se vió en la tabla No. II-9, el aire suministra aprox. 15 ppm de sólidos suspendidos en base el agua de repuesto. Además conocemos que el clarificador garantiza un flujo de agua tratada con solo 10 ppm de sólidos suspendidos.

También la cal, el carbonato y el MgO tienen sólidos en suspensión pero supondremos que éstos son depositados en el clarificador y eliminados por la purga, entonces un balance queda como sigue:

$$A(X_A) = (W+P)X_R + B(X_B)$$

$$T_1(X_R) = TX_T + B(X_B)$$

$$X_A = 15$$

$$X_T = 10$$

Despejando:

$$X_R = \frac{AX_A + TX_T}{W + P + T_1}$$

$$X_R = \frac{3000 \times 15 + 1384.6 \times 10}{107.2 + 150 + 1427.4}$$

= 34.9 ppm de sólidos en suspensión en el agua de recirculación

$$X_B = \frac{T_1(X_R) - TX_T}{B}$$

$$X_B = \frac{1427.4 \times 34.9 - 1384.6 \times 10}{42.8}$$

$X_B = 840.4$ ppm de sólidos suspendidos que se van por la purga del clarificador.

PUNTO No. 12

SOLIDOS TOTALES EN EL AGUA DE RECIRCULACION

<u>C O N C E P T O</u>	<u>ppm</u>
Sílice	150
Calcio = $474 \times 40/100$	190
Magnesio = $137.5 \times 24/100$	33
Sodio = $4128.5 \times (2 \times 23.3)/100$	1924
Cloruro = $650 \times (2 \times 35.5/100)$	462
Bicarbonato = $110 \times (2 \times 61)/100$	134
Sulfato = $3980 \times 96/100$	3821
Nalco 7350	50
Nalco 7328	200
CO ₂	7
TOTAL SOLIDOS DISUELTOS	6992
sólidos suspendidos	35
SOLIDOS TOTALES	<u>7027</u>

PUNTO No. 13

CHEQUEO DE LA ESTABILIDAD DEL AGUA DE RECIRCULACION Y LIMITES

Indice de estabilidad = $2pH_s - pH$

$pH_s = (9.3 + A + B) - (C + D)$

A = 0.22 (sólidos totales = 7027 ppm, ver tabla II-3)

B = 1.71 (T=40°C, ver tabla II-4)

C = 2.275 (dureza de calcio = 474 ppm, ver tabla II-6)

D = 2.04 (alcalinidad = 110, ver tabla II-7)

pH = 7.5 (corresponde a alcalinidad = 110)

$pH_s = 9.3 + 0.22 + 1.71 - 2.27 - 2.04 = 6.92$

Indice = $2(6.92) - 7.5 = 6.31$ (índice entre 6.5 y 7)

agua ligeramente incrustante pero
se puede corregir disminuyendo la
cantidad de alcalinidad residual.

Y de la tabla II-2, el límite $MgXSIO_2 = 144000$

$137.5 \times 150 = 20625$ O.K.

Sulfato de calcio = 1290

suponiendo todo el calcio como $\text{CaSO}_4 = 474$ O.K.

Producto $\text{Ca} \times \text{SO}_4 = 1500000 - 2500000$

$474 \times 3980 = 1886520$ O.K.

Cloruros = 4200 como CaCO_3

Cloruros = 650 O.K.

Sulfato de magnesio = 170000

Suponiendo todo el magnesio como $\text{MgSO}_4 = 137.5$ O.K.

CONCLUSION: el agua es estable aunque hay que disminuir la concentración de la alcalinidad residual a 96 ppm, con lo que se obtiene un pH = 7.4 (ver tabla No. II-11). Entonces, el valor D se modifica a 1.98 y el índice,

$$\begin{aligned} \text{índice} &= 2(9.3 + 0.22 + 1.71 - 2.27 - 1.98) - 7.4 \\ &= 6.56 \text{ índice correcto, agua estable} \end{aligned}$$

(NOTA: es necesario corregir el balance anterior)

c .- TABULACION DE RESULTADOS

B A S E S

- 1.- Mantener 150 ppm de SiO_2 en el agua de circulación
- 2.- Flujo de circulación = 150 000 LPM

Pérdidas por arrastre = 150 LPM

Pérdidas por evaporación = 2700 LPM
- 3.- $T = 40^\circ\text{C}$
- 4.- Para mantener 150 ppm en el agua de circulación se requiere agua tratada con 20 ppm de Sílice.
- 5.- Análisis del agua de repuesto es el mostrado en el inciso III.b
- 6.- Límites de Control

Indice de estabilidad = 6.5 - 7

Sulfato de calcio = 1290 ppm como CaCO_3

Producto $\text{Mg} \times \text{SiO}_2 = 144\ 000$

Producto $\text{Ca} \times \text{SO}_4 = 1\ 500\ 000 - 2\ 500\ 000$

T A B L A I I I . 1

TABLA COMPARATIVA A DIFERENTE NUMERO DE CICLOS DE CONCENTRACION (DATOS DE OPERACION)

No. Ciclos	No.	2	4	6	8	10	12	14
Agua de repuesto	LPM	5400	3600	3240	3085.7	3000	2945.5	2907.7
Purga total	LPM	2550	750	390	235.7	150	95.5	57.7
Agua a tratar	LPM	0	1070.6	1284.7	1376.5	1427.4	1459.9	1482.3
Purga del Clarificador	LPM	0	32.1	38.5	41.3	42.8	43.8	44.5
Purga del Sistema	LPM	2550	717.9	351.5	194.4	107.2	51.7	13.2
Agua tratada	LPM	0	1038.5	1246.2	1335.2	1384.6	1416.1	1437.8

	A N A L I S I S	A G U A	C I R C U L A C I O N					
Silice	ppm SiO ₂	150	150	150	150	150	150	150
Ca ⁺⁺	ppm CaCO ₃	500	483	477.9	475.4	474	473	472.4
Mg ⁺⁺	ppm CaCO ₃	124	132.8	135.5	136.8	137.5	138	138.4
Na ⁺	ppm CaCO ₃	840	1661.4	2483	3304.6	4126.2	4946.9	5769.1
Cl ⁻	ppm CaCO ₃	130	260	390	520	650	780	910
HCO ₃ ⁻	ppm CaCO ₃	82	94	94	94	94	94	94
SO ₄ ⁻	ppm CaCO ₃	1252	1923.2	2612.4	3302.8	3993.7	4683.9	5375.9

CO ₂	ppm CO ₂	8.5	8	8	8	8	8	8
Sólidos totales	ppm	2423	3593	4728	5866	7004	8141	9280
pH	-	7.3	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4

		ANÁLISIS			AGUA		TRATADA	
Sílice	ppm SiO ₂	-	20	20	20	20	20	20
Ca ⁺⁺	ppm CaCO ₃	-	35	35	35	35	35	35
Mg ⁺⁺	ppm CaCO ₃	-	33	33	33	33	33	33
Na ⁺	ppm CaCO ₃	-	2183.2	3002.4	3822.8	4643.7	5463.9	6285.9
Cl ⁻	ppm CaCO ₃	-	260	390	520	650	780	910
OH ⁻	ppm CaCO ₃	-	33	33	33	33	33	33
CO ₃ ⁼	ppm CaCO ₃	-	35	35	35	35	35	35
SO ₄ ⁼	ppm CaCO ₃	-	1923.2	2612.4	3302.8	3993.7	4683.9	5375.9
pH	-	-	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8

INDICES		DE ESTABILIDAD			AGUA		CIRCULACION	
Estabilidad	-	6.7	6.56	6.56	6.56	6.58	6.58	6.58
Mg x SiO ₂	ppm CaCO ₃ x ppm SiO ₂	18600	19920	20325	20520	20625	20700	20760
Ca x SO ₄	ppm CaCO ₃	626000	928906	1248466	1570251	1893014	2215484	2539575
CaSO ₄	ppm CaCO ₃	500	483	477.9	475.4	474.0	473	472.4

T A B L A No. III-2

TABLA COMPARATIVA A DIFERENTES No. DE CICLOS DE CONCENTRACION (Datos de Costos)

			NUMERO DE CICLOS DE CONCENTRACION							
			2	4	6	8	10	12	14	
			unidades	costo unitario						
AGUA	Consumo	m ³ /día	\$5.75	7776	5184	4666	4443	4320	4242	4187
	Costo	\$/día		44712	29808	26830	25547	24840	24392	24075
	Del total	%		57.2	52.5	51.1	50.4	50.0	49.7	49.5
Acido Sulfurico 98 REPST.	Consumo	Kg/día	\$4.25	3516	1861	1541	1404	1328	1280	1247
	Costo	\$/día		14943	7909	6549	5967	5644	5440	5300
	Del total	%		19.1	13.9	12.5	11.8	11.4	11.1	10.9
GAS	Consumo	Kg/día	\$10.50	180	180	180	180	180	180	180
	Costo	\$/día		1890	1890	1890	1890	1890	1890	1890
	Del total	%		2.4	3.3	3.6	3.7	3.8	3.9	3.9
Micro bicida	Consumo	Kg/día	\$78.20	80.0	83.7	84.4	84.7	84.9	85.0	85.1
	Costo	\$/día		6256	6543	6600	6625	6639	6647	6653
	Del total	%		8.0	11.5	12.6	13.1	13.4	13.6	13.7
inhibidor de corros.	Consumo	Kg/día	\$53.50/Kg	194.4	64.80	38.90	27.80	21.6	17.7	15.0
	Costo	\$/día		10400	3467	2081	1487	1156	947	803
	Del total	%		13.3	6.1	4.0	2.9	2.3	1.9	1.6
CAL al 93%	Consumo	Kg/día	\$ 3.25		302	366.4	394.7	410.4	420.6	427.8
	Costo	\$/día			982	1191	1283	1334	1365	1390
	Del total	%			1.8	2.2	2.5	2.7	2.8	2.9
Carbo nato al 98%	Consumo	Kg/día	\$6.20		868.8	1037.7	1109.3	1148.8	1173.8	1191.4
	Costo	\$/día			5387	6434	6878	7123	7278	7387
	Del total	%			9.5	12.2	13.6	14.3	14.8	15.2
MgO al 90%	Consumo	Kg/día	\$8.50		91	111.4	120.5	125.6	128.9	131.4
	Costo	\$/día			774	947	1024	1068	1096	1117
	Del total	%			1.4	1.8	2.0	2.1	2.2	2.3
COSTO TOTAL			\$/día	78201	56760	52522	50701	49694	49055	48615
COSTO x M ³ de R			\$/m ³	0.362	0.263	0.243	0.235	0.230	0.227	0.225

NOTA: (\$) = pesos

d.- DIAGRAMA DE TUBERIA E INSTRUMENTACION

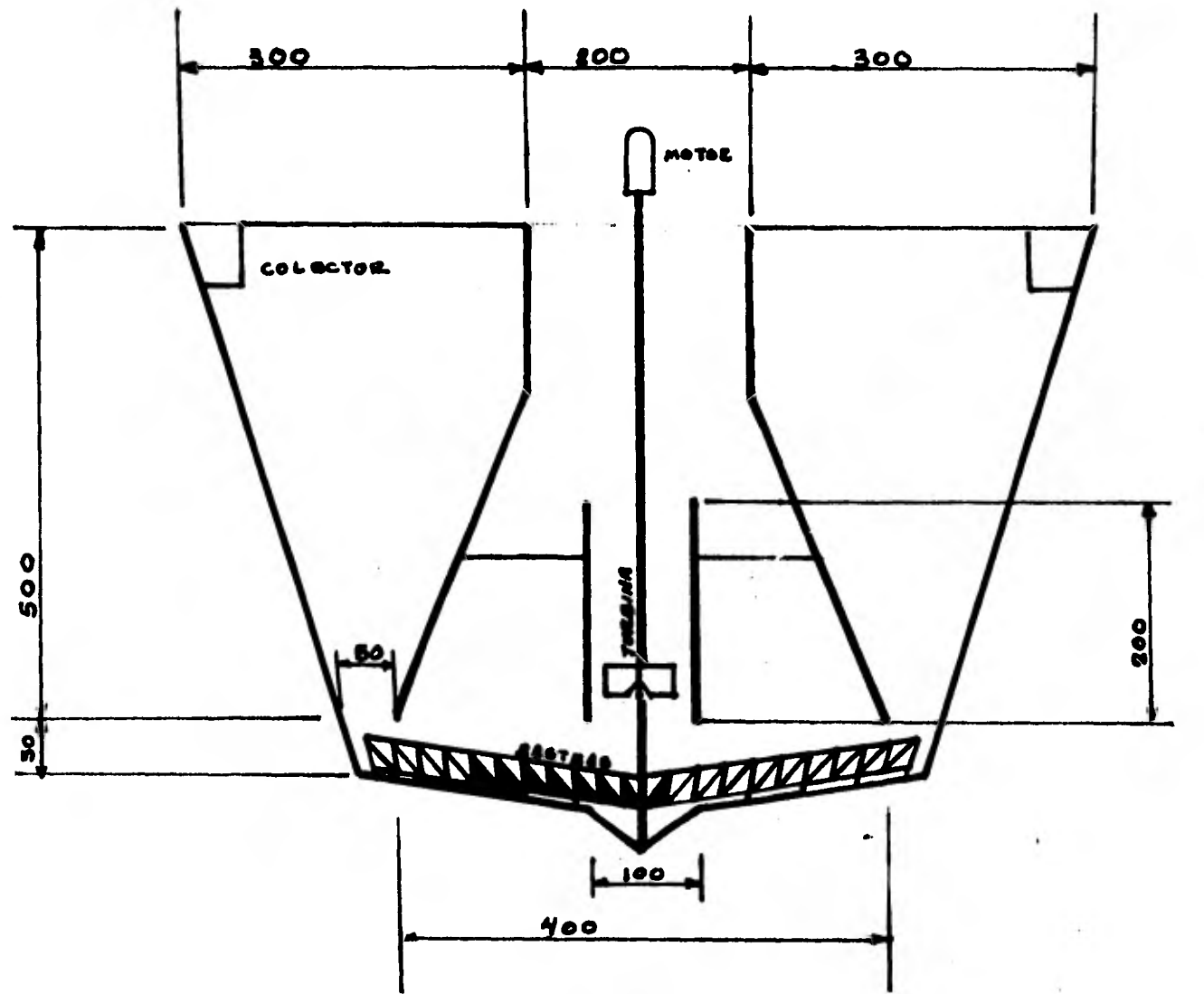
El diagrama de flujo JAC-1 es el propuesto para la correcta operación del tratamiento. El balance de materia está basado en un número de ciclos igual a 10 (ver tablas III-1 y III-2), esto es debido a que consideramos que a mayor número de ciclos, el costo del tratamiento no cambia demasiado y además, de que la concentración de sulfatos empieza a ser demasiado alta y se pueden tener problemas con el concreto de la cisterna de agua.

El número de ciclos igual a 10 servirá también como base para el cálculo del tamaño de los equipos y para terminar el análisis económico.

e.- DATOS DE EQUIPOS

e.1) Clarificador E.C.1

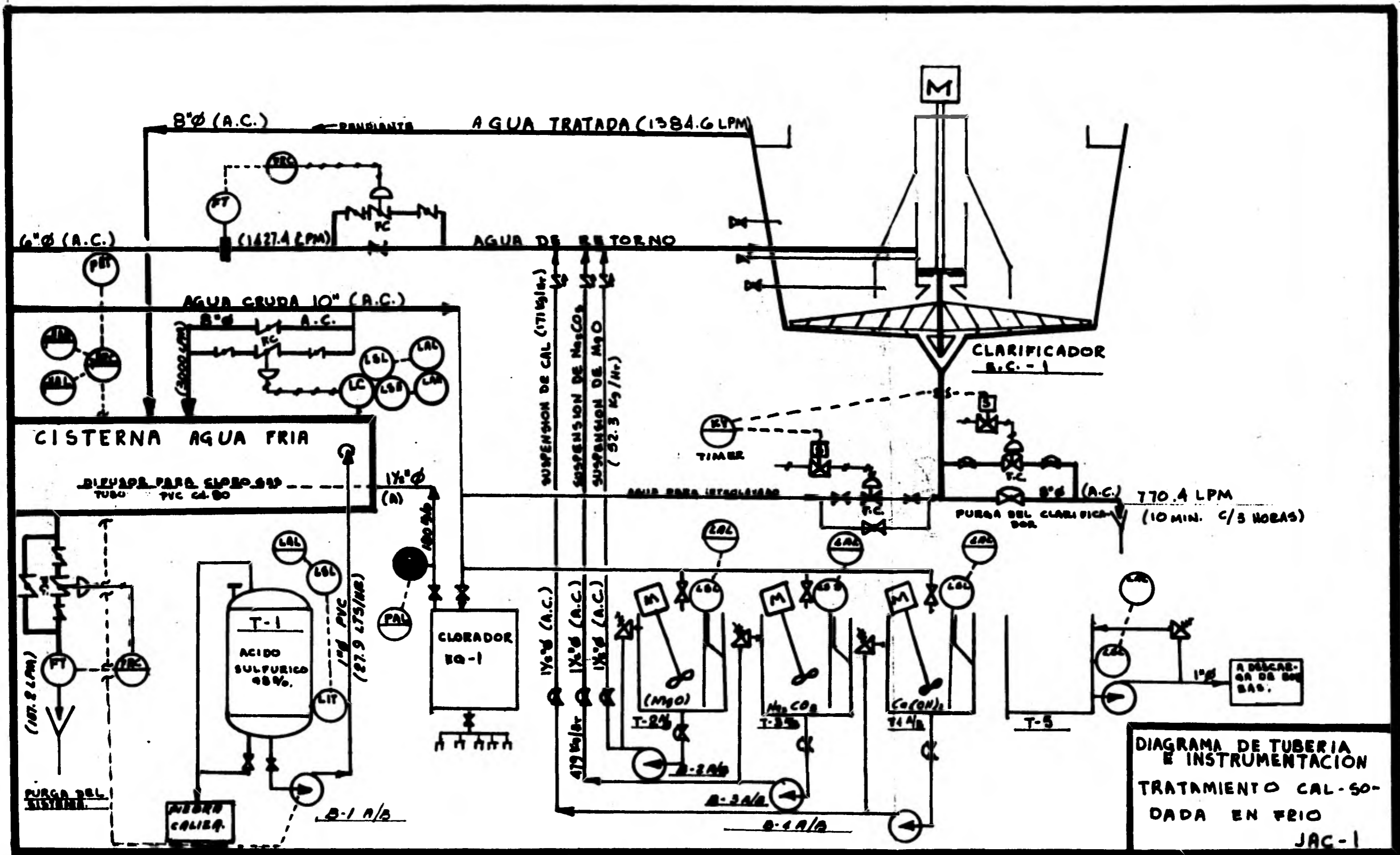
De acuerdo a la Tesis "Metodología Para El Cálculo de Floculadores" del Ing. José Landeros Caballero (1980 UNAM Fac. de Química), las bases del Diseño para la correcta operación de un clarificador de lecho suspendido son las siguientes:



CLARIFICADOR EC-1

UNIDADES = CM

FIGURA III-1



Velocidad en la superficie
de Derrame = 4.5×10^{-2} Mts/min

Velocidad de entrada a el
lecho suspendido = de 1.52×10^{-1} a 6.1×10^{-1} Mts/min

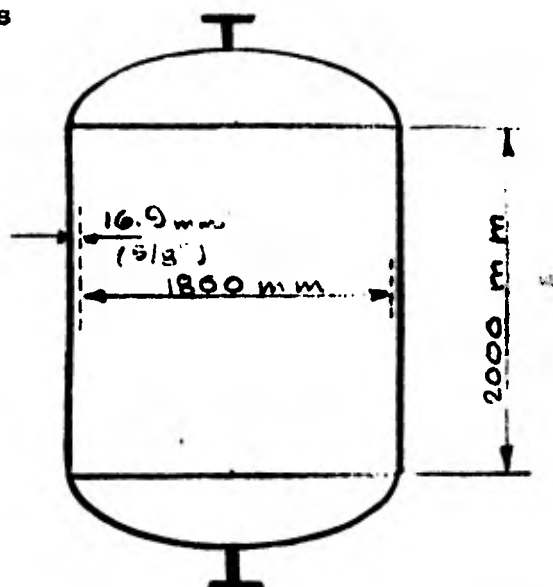
Tiempo de residencia = de 1 a 2 horas

Con estos datos se obtiene un clarificador con las dimensiones aproximadas que se muestran en el dibujo III-1 .

(Datos aproximados adicionales)

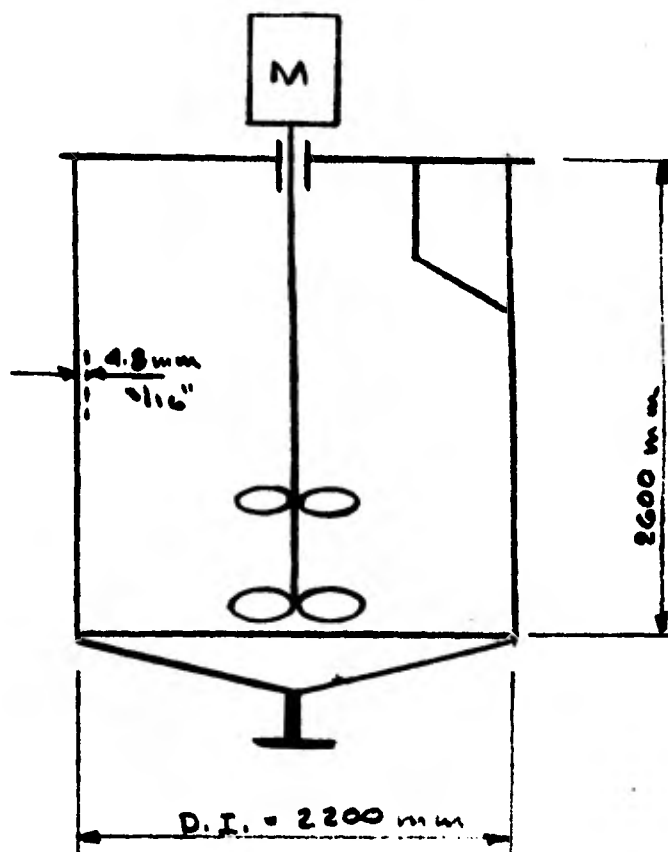
- Material de la cubierta e interiores: Acero al Carbón
- Agitador de la cámara de dilución : Tipo Turbina con 6 aspas de 60 cm de diámetro, con motoreductor variable de 2 - 20 RPM, motor de 2 HP .
- Rastras: de acero estructural (2 rastras) de 4.8 metros de diámetro para trabajar a 20 RPH con motor y motoreductor de 3 HP .

e.2) Tanques



Nombre	T - i
Cantidad	1
Servicio	Almacén H_2SO_4
Volúmen total	5.2 m ³
Material	Acero al carbón (placa 5/8)
Tiempo de residencia	una semana

Tanques de Reactivos



Identificación	T 2 A/B , T 3 A/B , T 4 A/B
Cantidad	6
Volúmen aprox.	12 m ³
Material	Placa de acero al carbón
Agitador	3 HP a 350 RPM

e.3) Bombas

Tipo: dosificadora de diafragma adecuado para manejar suspensiones sólidas-líquidas (por ejemplo una marca sería WALLANCE AND TIERNAN modelo 44-315 con motor de 1/4 HP .)

e.4) Clorador EQ-1

Tipo: evaporador + eductor (Wallance and Tiernan)

F.- ESTIMADO DE INVERSION.

BASE: Tabla No. 25-10 del libro CHEMICAL ENGINEER'S HANDBOOK (quinta edición) . Esta tabla se basa en darle un porcentaje del estimado total al costo del equipo, y en base a éste, estimar los demás conceptos. Esto lleva consigo un error de aproximadamente $\pm 30\%$, suficiente para el desarrollo de este trabajo.

F.1) COSTO DEL EQUIPO PARA EL TRATAMIENTO CAL EN TIBIO

Clarificador

En base a la Tesis del Sr. Ing. José Landeros (1980 UNAM) se tiene un costo de 50 000 pesos por metro cuadrado de superficie de asentamiento y tenemos una superficie de 50.24 m², por lo tanto el costo total es 2 500 000 pesos .

Tanques

T - 1 (peso aproximado de 1400 Kg vacio) \$ 125 000

Tanques T2,T3,T4 (peso de 1350 Kg c/u) \$ 845 000

(de la fórmula aproximada para 1981, costo= 995 (peso)^{2/3})

Clorador

Aproximadamente tendrá un costo de \$ 100 000

Bombas Dosificadoras

A un costo aproximado de \$ 40 000 c/u, se utilizarán 9 bombas, por lo tanto el costo total = \$ 360 000

Agitadores

Con un costo aproximado de \$ 50 000 c/u y se utilizarán 6 agitadores, por lo que el costo total = \$ 300 000 .

COSTO TOTAL DEL EQUIPO PARA TRATAMIENTO CAL EN TIBIO

\$ 4 105 000

f.2 COSTO DE EQUIPO USANDO TRATAMIENTO CONVENCIONAL

En este caso solo se usará el tanque T-1, una bomba y el Clorador, por lo tanto el costo total de equipo es de:

\$ 265 000

f.3 ESTIMADO DE MAGNITUD DE INVERSION

Sólo tomando en cuenta el Tratamiento sin considerar Torre de Enfriamiento, Bombas de Circulación, etc...

(ver la siguiente tabla)

f.3 ESTIMADO DE MAGNITUD DE INVERSION

TABLA No. III-3

135

C O N C E P T O	% SOBRE INVER SION TOTAL .	TRATAMIENTO CONVENCIONAL (miles de \$)	TRATAMIENTO CAL EN TIBIO (miles de \$)
C O S T O S D I R E C T O S			
1.- Equipo de Proceso	34	4105	265
2.- Instalación de Equipos	5	604	39
3.- Material de Proceso	15	1811	117
- tuberías			
- instrumentos			
- edificios			
- cimentaciones			
- eléctrico			
- etc...			
4.- Instalación de Material de Proceso	10	1207	78
C O S T O S I N D I R E C T O S			
5.- Trabajo de Oficina (incluye OVER HEAD)	24	2898	187
- Ingeniería			
- Dibujo			
- Compra			
- viajes			
- inspección			
- etc...			
6.- Trabajo de Campo (incluye OVER HEAD)	12	1449	93
- construcciones temporales			
- renta y compra de maquinaria y herramientas			
- permisos			
- etc...			
T O T A L	100	12074	779

g.- COSTOS DE PRODUCCION

(base un año)*

C O N C E P T O	TRATAMIENTO CONVENCIONAL	TRATAMIENTO CAL EN TIBIO
(No. ciclos de concentración = 10)		
1.- Materia Prima (ver tabla III-2)	28152	17890
2.- Consumo Eléctrico	1	58
- para tratamiento convencional, un motor de 114 HP.		
- para tratamiento de cal en tibio,		
- costo por KW-H = \$0.60		
3.- Costo por inversión inicial (depreciación + amortización, 10% sobre I.I.)	71	1182
4.- Mano de Obra	526	1577
- suponiendo 3 trabajadores por día para el tratamiento convencional y 9 para el tratamiento de cal en tibio, a razón de \$60/Hr.		
5.- Mantenimiento	35	591
- 5% sobre I.I. al año		
6.- Seguros	7	118
- 1.0 % sobre I.I. al año		
7.- OVER HEAD	5058	3784
- 15% sobre el costo total		
C O S T O T O T A L	33850	25200

DIFERENCIA= \$8 650 000 al año

* año de 330 días

Los costos fueron estimados en base a la experiencia.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1.- De acuerdo al presente trabajo se obtienen las siguientes ventajas al utilizar el tratamiento de Cal-Sodada en Tibio y en Corriente Lateral para el agua de enfriamiento:

- A) se requiere menor consumo de agua de repuesto con respecto al tratamiento convencional, esto es importante para aquellos lugares donde se sufre de escases de agua.
- B) se obtiene un buen control de sílice (problema muy común en agua Mexicanas) permitiendo mayor número de ciclos de concentración.
- C) tiene un costo de producción mas bajo que el tratamiento convencional (relación de aproximadamente 1.34 para el ejemplo desarrollado en este trabajo.

D) los reactivos usados son de fácil obtención en el mercado y además no son contaminantes del ambiente.

E) se obtiene menor cantidad de agua de desecho, por lo tanto, menor contaminación.

2.- Desventajas (con respecto al tratamiento convencional)

A) requiere mayor supervisión y control del proceso, debido a la alta concentración de sales,

B) dependiendo del análisis del agua de repuesto se puede requerir del uso de Acido Clorhídrico en lugar de Acido Sulfúrico para el control de pH, esto debido a una concentración inicial muy alta de sulfatos, lo cual encarece el tratamiento.

C) se requiere de mayor cantidad de equipo, por lo tanto se requiere mayor costo por inversión ini-

cial, operación y mantenimiento (relación 16.7 a 1, 3 a 1, y, 16.7 a 1 respectivamente, y de acuerdo al ejemplo desarrollado en este trabajo).

- D) requiere de mayor tiempo de arranque debido a que lo calculado en este trabajo es solo estimativo, debiéndose encontrar la operación óptima con pruebas en campo.

3.- RECOMENDACIONES

- A) este tratamiento se recomienda para plantas grandes con alto consumo de agua de enfriamiento y/o que además el producto final sea de mucho uso en la industria tal como, plantas productoras de ácido sulfúrico, fertilizantes, refinerías, petroquímica básica, generadoras de electricidad , etc...
- B) no se recomienda este tratamiento para plantas pequeñas y de bajo consumo de agua de enfriamiento debido a que la inversión inicial es relativamente alta.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- G. J. CRITS, G. GLOVER
"ZERO BLOWDOWN FROM COOLING TOWER"
Presentado en la Conferencia sobre Agua en Pittsburg
Pensilvania en el año de 1973
FOLLETO DE LA COMPAÑIA "CRANE"

- 2.- C. H. THORBERG, CARMEN F. VERRONE
"A GUIDE TO THE CHEMICAL TREATMENT OF OPEN RECIRCULATING
COOLING WATER SYSTEMS"
Manual de la Compañía de Tratamiento de Agua "DREW"

- 3.- ESKEL NORDELL
"TRATAMIENTO DE AGUA PARA LA INDUSTRIA Y OTROS USOS"
Traducción a la segunda edición (INGLES)

- 4.- BETZ HANDBOOK

- 5.- J. LANDEROS CABALLERO
"METODOLOGIA PARA EL CALCULO DE FLOCULADORES"
TESIS PROFESIONAL, FAC. DE QUIMICA, U.N.A.M.

- 6.- R. H. PERRY/C. H. CHILTON
"CHEMICAL ENGINEER'S HANDBOOK"
Quinta Edición