



## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la vida que me dio, la familia que me permite compartir, por la fuerza y la fe durante este camino que no soltaste mi mano y me mantuviste a tu lado.

A mis padres Magnolia Santiago Domínguez y Adalberto Jiménez Hernández, quienes me dieron la vida y educación. Por sus sabios consejos, valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, por la confianza que en mí tuvieron y con lo cual he logrado terminar mis estudios profesionales que constituyen el legado más grande que pudiera recibir.

A mi hermana María del Carmen Jiménez Santiago y a mi hermano José Luis Jiménez Santiago por haberme apoyado en todo momento, pero sobre todo por su amor.

A mi directora de tesis la MIPA Noemí Méndez de los Santos por su paciencia, sus asesorías, sus consejos, su apoyo y su amistad. Así como a mi codirector el MI José Reyes Osorio, a mi tutora la MIPA María Berzabé Vázquez González y a mi tutora la MI Alicia Sosa Medina.

A los profesores del departamento de estudios de posgrado e investigación por sus sugerencias, enseñanzas, consejos, por su apoyo, por demostrar su responsabilidad y siempre dar lo mejor en clases y por los conocimientos transmitidos hasta el final.

A todas las personas que de una u otra forma hicieron posible la elaboración de este proyecto.

## **RESUMEN**

El dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) es una alternativa al uso de hipocloritos útil para la desinfección del agua de enfriamiento, es un desinfectante cuya capacidad biocida sobrepasa a la del cloro y sus derivados, de esto deriva que este sea el oxidante más selectivo y que además permite una menor dosificación para conseguir los resultados deseados.

El uso de este compuesto ha sido limitado debido a razones económicas y a la explosividad en su forma de gas, sin embargo, el desarrollo de formulaciones comerciales y estabilizadas le ha permitido reintroducir al dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) en solución acuosa como una opción viable para la eliminación de agentes patógenos.

El objetivo de esta investigación fue la de evaluar la capacidad del dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) en solución acuosa como un tratamiento alternativo para sistemas de agua de enfriamiento y pueda ser una mejor opción para los procesos industriales modernos.

## **ABSTRACT**

Chlorine dioxide ( $\text{ClO}_2$ ) is an alternative to the use of hypochlorites useful for disinfection of cooling water, it is a disinfectant, the ability to use hypochlorites, chlorine waste ( $\text{ClO}_2$ ). It also allows a lower dosage to achieve the desired results.

The use of this compound has been limited due to economic reasons and explosiveness in its gaseous form, however, the development of commercial and stabilized formulas has allowed the reintroduction of chlorine dioxide ( $\text{ClO}_2$ ) into the solution as a viable option for the pathogen elimination.

The objective of this research was the ability to evaluate the capacity of chlorine dioxide ( $\text{ClO}_2$ ) in the solution as an alternative treatment for cooling water systems and a better option for modern industrial processes.

# ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO I. FUNDAMENTO TEÓRICO	11
1.1 Agua	11
1.1.1 Usos del agua	13
1.1.2 Agua para uso industrial	15
1.2 Dióxido de cloro	17
1.2.1 Propiedades del dióxido de cloro como desinfectante	18
1.2.2 Mecanismos de desinfección del dióxido de cloro	20
1.2.3 Subproductos de la desinfección con dióxido de cloro	21
1.2.4 Generación de dióxido de cloro	23
1.3 Hipoclorito de sodio	26
1.4 Torres de enfriamiento	27
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	32
2.1 Uso del agua en el Complejo Procesador de Gas Nuevo Pemex	32
2.2 Técnicas de caracterización del agua de la torre de enfriamiento	33
2.2.1 Determinación de los puntos de muestreo	33
2.2.2 Determinación del pH y conductividad eléctrica	36
2.2.3 Concentración del dióxido de cloro (ClO <sub>2</sub> )	38
2.2.4 Residual del dióxido de cloro (ClO <sub>2</sub> )	41
2.2.5 Cuenta total bacteriana (CTB)	43
2.2.6 Bacterias sulfato reductoras (BSR)	46
CAPÍTULO III. RESULTADOS	48
3.1 Conductividad eléctrica y pH expuestos a diferente ppm de dióxido de cloro	48
3.2 Cuenta total bacteriana expuesto a diferente ppm de ClO <sub>2</sub>	55
3.3 Bacterias sulfato reductoras expuesto a diferente ppm de ClO <sub>2</sub>	58
CONCLUSIÓN	59
BIBLIOGRAFÍAS	61
ANEXOS	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Distribución global del agua	11
Figura 1.2 Valores anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México	12
Figura 1.3 Uso agrícola del agua	14
Figura 1.4 Uso público del agua	14
Figura 1.5 Dióxido de cloro	17
Figura 1.6 Generador de dióxido de cloro (Sistema de dos componentes)	24
Figura 1.7 Generador de dióxido de cloro (Sistema de tres componentes)	25
Figura 1.8 Esquema general de una torre de enfriamiento	27
Figura 1.9 Torre de enfriamiento atmosférica	28
Figura 1.10 Torre de enfriamiento de tiro natural	29
Figura 1.11 Torre de enfriamiento de tiro forzado	30
Figura 1.12 Torre de enfriamiento de tiro inducido	31
Figura 2.1 Diagrama de flujo del CPG Nuevo Pemex	32
Figura 2.2 Puntos de muestreo de la torre de enfriamiento CT-2601	34
Figura 2.3 Torre de enfriamiento CT-2601 del CPG Nuevo Pemex	35
Figura 2.4 Precursores para la generación de dióxido de cloro	40
Figura 2.5 Equipo para determinar el residual de dióxido de cloro	42
Figura 2.6 Método de siembra y conteo de microorganismos mesófilos	45
Figura 3.1 Medición de pH y conductividad eléctrica	48
Figura 3.2 Conteo de microorganismos mesófilos aeróbicos	55
Figura 3.3 Conteo de bacterias sulfato reductoras	58

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Distribución de los usos del agua	13
Tabla 1.2 Clasificación del uso del agua en la industria	16
Tabla 1.3 Características fisicoquímicas del dióxido de cloro	19
Tabla 1.4 Eficacia biocida, estabilidad y efecto del pH	21
Tabla 2.1 Especificaciones para el control del agua de enfriamiento	36
Tabla 2.2 Tiempo y temperatura requerido según el tipo de microorganismo	45

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 3.1 pH en el agua expuesto a 0.2ppm de ClO <sub>2</sub>	49
Gráfica 3.2 pH en el agua expuesto a 0.3ppm de ClO <sub>2</sub>	49
Gráfica 3.3 pH en el agua expuesto a 0.4ppm de ClO <sub>2</sub>	50
Gráfica 3.4 Conductividad en el agua expuesto a 0.2ppm de ClO <sub>2</sub>	50
Gráfica 3.5 Conductividad en el agua expuesto a 0.3ppm de ClO <sub>2</sub>	51
Gráfica 3.6 Conductividad en el agua expuesto a 0.4ppm de ClO <sub>2</sub>	51
Gráfica 3.7 pH vs Conductividad expuesto a 0.2ppm de ClO <sub>2</sub>	52
Gráfica 3.8 pH vs Conductividad expuesto a 0.3ppm de ClO <sub>2</sub>	52
Gráfica 3.9 pH vs Conductividad expuesto a 0.4ppm de ClO <sub>2</sub>	53
Gráfica 3.10 pH vs Residual de ClO <sub>2</sub> expuesto a 0.2ppm de ClO <sub>2</sub>	54
Gráfica 3.11 pH vs Residual de ClO <sub>2</sub> expuesto a 0.3ppm de ClO <sub>2</sub>	54
Gráfica 3.12 pH vs Residual de ClO <sub>2</sub> expuesto a 0.4ppm de ClO <sub>2</sub>	54
Gráfica 3.13 Comportamiento de CTB expuesto a 0.2ppm de ClO <sub>2</sub>	56
Gráfica 3.13 Comportamiento de CTB expuesto a 0.3ppm de ClO <sub>2</sub>	56
Gráfica 3.13 Comportamiento de CTB expuesto a 0.4ppm de ClO <sub>2</sub>	56

# INTRODUCCIÓN

El cloro uno de los principales biocidas es un desinfectante de gran poder bactericida, aún en dosis pequeñas, es económico y de fácil empleo, aunque requiere precaución en su manejo. Es el reactivo más usado a nivel mundial tanto en los sistemas de agua potable como residual (CNA, 2007). Es utilizado ampliamente en procesos industriales, sistemas de agua, sistemas de refrigeración y aire acondicionado, mediante el control de los organismos nocivos (DOF, 2014).

En todo el mundo, el mecanismo de desinfección más aplicado en los sistemas de abastecimiento de agua es el que emplea el cloro y sus compuestos derivados como agentes desinfectantes. Fue introducido masivamente a principios del siglo XX y constituyó una revolución tecnológica, que complementó el proceso de filtración que ya era conocido y utilizado para el tratamiento del agua (Deininger y colaboradores, 1998).

El gas cloro es una sustancia que ayuda mucho a reducir los gastos de operación relacionados con la desinfección del agua para el organismo. Se debe tener especial cuidado en su manejo, la mayoría de los casos de muerte por intoxicación aguda se ha producido por derrames masivos o explosiones de envase del gas, por lo que dentro de las medidas de seguridad que se emplean para el manejo de este producto es el uso de equipos con trajes encapsulados para el personal (SEAPAL, 2018).

A nivel internacional se han desarrollado diversos trabajos de investigación tendientes a encontrar el mejor biocida para la eliminación de microorganismos patógenos para poder ser utilizados como medio de soporte en el tratamiento de aguas residuales, industriales y domésticas.

En un estudio integral del cloro realizado en desinfectantes hospitalarios, se observó la importancia de este en el proceso de desinfección, ya que reduce de manera muy



importante la desactivación de la disolución desinfectante debido a la presencia de materia orgánica (Casanova y colaboradores, 2005).

En el año 2005 se evaluó la efectividad del dióxido de cloro, en función de la concentración, pH y tiempo de exposición, en el control de *Botrytis cinerea*, *Penicillium expansum* y *Rhizopus stolonifer*, concluyendo que el dióxido de cloro formulado comercialmente es una alternativa para el control de *Botrytis cinerea*, *Penicillium expansum* y *Rhizopus stolonifer* en postcosecha, se recomienda corregir la dosis en función de los patógenos predominantes y verificar el pH de la solución de modo que permanezca entre 7 y 8 (Zoffoli y colaboradores, 2005).

Se estudió el efecto del ClO<sub>2</sub> gaseoso, para inactivar y matar hongos como, *Stachybotrys chartarum*, *Chaetomium globosum*, *Cladosporium Cladosporium*, *Penicillium chrysogenum*. El dióxido de cloro sirvió de nuevo como un poderoso oxidante que afecta la integridad de la membrana celular de los microorganismos, la prevención de la germinación de hongos. Siendo que 500 ppm es suficiente para impedir el crecimiento de la misma. Las ascosporas de *Chaetomium globosum* no se inactivaron con dióxido de cloro e hicieron una especie de barrera contra el gas. En este estudio, se observa que sólo el procedimiento de desinfección se realizó utilizando ClO<sub>2</sub> gaseoso, no hay manera de concluir el caso de uso de ClO<sub>2</sub> en solución acuosa, pero es probable que vienen más fácilmente a estructuras más aisladas o difícil acceder de manera más eficaz, tal vez si podrían mejorar la desinfección y la inactivación de todo tipo (Wilson, 2005).

Se llevó a cabo un estudio para verificar la acción ClO<sub>2</sub> gaseoso en bacterias *Campylobacter jejuni* y se encontró que el compuesto provocó una disminución de aproximadamente el 97% de la población de *Campylobacter jejuni*, un resultado muy satisfactorio también se confirma referencias que este es un biocida muy efectivo (Cowley, 2002).

En el 2010 se describe la eficacia de  $\text{ClO}_2$  gaseoso contra algunos virus, y calicivirus felino, virus de la influenza humana, virus del sarampión, el virus del moquillo canino, el virus del herpes humano, adenovirus humano y canino y parvovirus canino, siendo este biocida, de nuevo, muy eficaz en la inactivación de todos estos virus (Izquierdo, 2010).

La evaluación del dióxido de cloro de la eficacia del virus de la gripe, obteniendo una confirmación que la solución de  $\text{ClO}_2$  se utilizan en caso de infección por contacto con virus de la gripe, demuestra 10 veces la actividad antiviral de la solución de hipoclorito de sodio, ambos de los cuales son lixiviados compuestos que consiste en cloro. El dióxido de cloro también demostró la actividad viricida no afectados por la presencia de materia orgánica, ni por el aumento de la concentración de sal, o variaciones de la temperatura o el pH (Olivieri, 2010).

A pesar de los usos del dióxido de cloro, en los complejos petroquímicos del estado de Tabasco no se encuentran reportes sobre el uso del dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) a nivel industrial para la desinfección del agua de enfriamiento y así poder determinar su efecto.

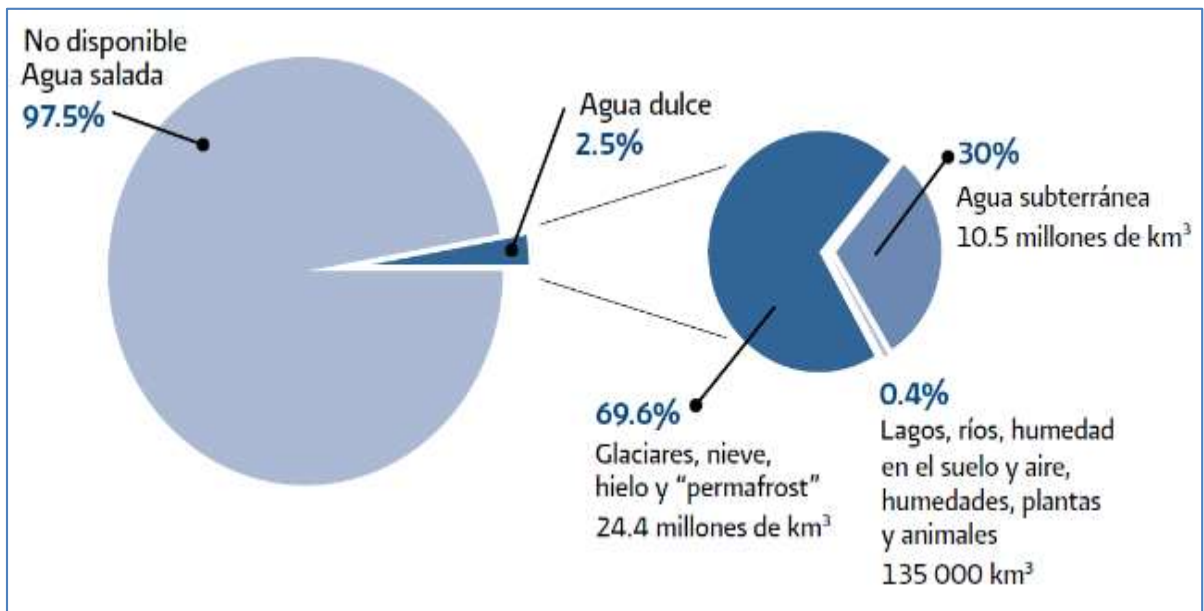
El objetivo de este trabajo es evaluar la aplicación del  $\text{ClO}_2$  en el agua de la torre de enfriamiento CT-2601 del Complejo Procesador de Gas Nuevo Pemex.

# CAPÍTULO I. FUNDAMENTO TEÓRICO

## 1.1 El agua.

El agua es parte esencial de los seres vivos: hombre, animal y vegetal, cuyos cuerpos se componen de aproximadamente un 72% de agua. El agua abunda en la tierra y es fundamental en la producción de alimentos, en el crecimiento y vida de las plantas, en la cría de animales, en la industria, en la construcción, en el movimiento y mantenimiento de máquinas, en la extinción de incendios y en el aseo en general (CONAGUA, 2017).

Toda el agua que utiliza la humanidad procede de la precipitación del vapor acuoso de la atmósfera en forma de lluvia, granizo o nieve y escarcha, captada en una de las diversas etapas que recorre dicho líquido para volver a formar el vapor acuoso, por la evaporación del agua de ríos, suelo, estanques, lagos, mar, y vegetación.

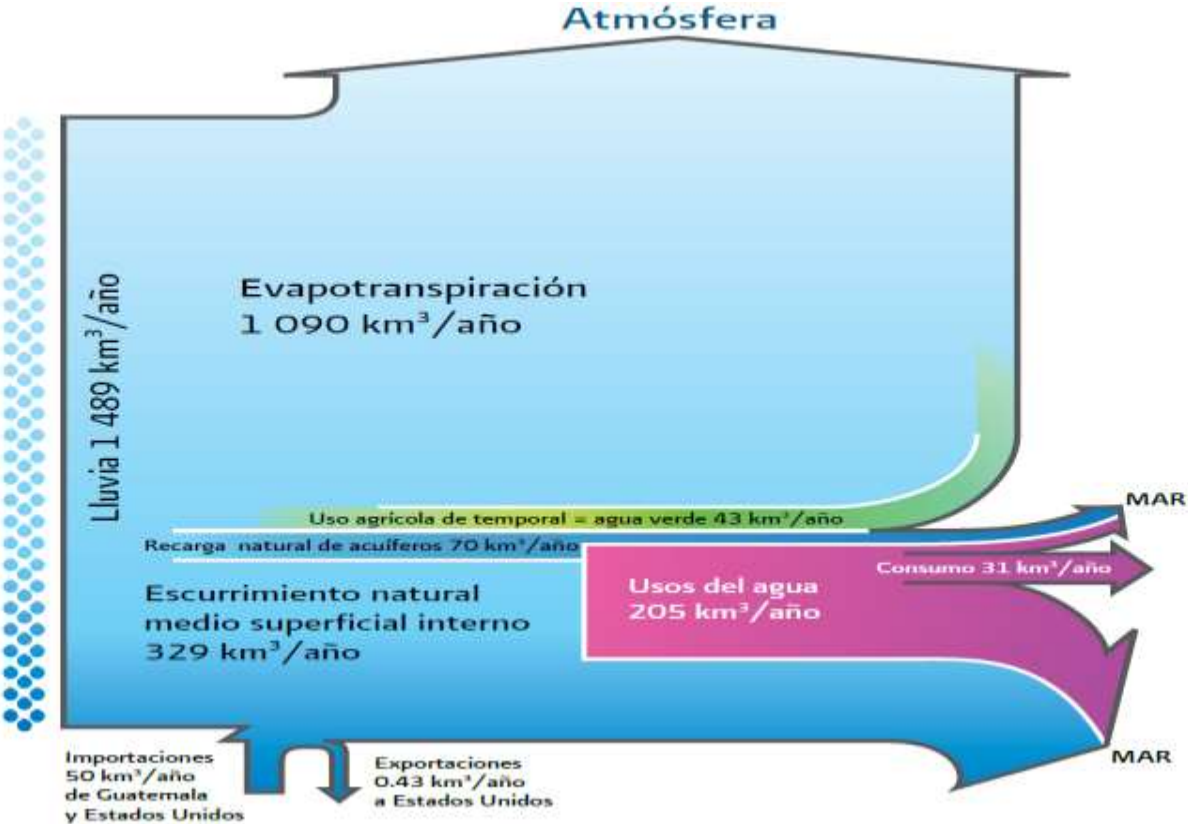


FUENTE: CONAGUA, 2017.

Figura 1.1 Distribución global del agua.

En la figura 1.1 se muestra la disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1,386 mil millones de m<sup>3</sup>, de los cuales el 97.5% es agua salada y sólo el 2.5%, o 35 mil millones de m<sup>3</sup>, es agua dulce, de esta cantidad casi el 70% no está disponible para consumo humano porque se encuentra en los glaciares, en la nieve y en el hielo (CONAGUA, 2017).

México recibe del orden de 1,489 mil millones de m<sup>3</sup> de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 73.2% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 22.1% escurre por los ríos o arroyos, y el 4.7% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos, esto se muestra en la figura 1.2. Tomando en cuenta las exportaciones e importaciones de agua con los países vecinos, así como la recarga incidental, anualmente el país cuenta con 459 mil millones de m<sup>3</sup> de agua dulce renovable (CONAGUA, 2017)



FUENTE: CONAGUA, 2017.

Figura 1.2 Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México.

Las principales fuentes de abastecimiento de agua para la industria en México son los ríos, manantiales y el subsuelo. La disponibilidad de estos recursos es muy variable en todo el territorio nacional, una estimación de la capacidad anual de estas fuentes reporta las siguientes cifras: la precipitación promedio de las lluvias en el país es de 1.53 billones de metros cúbicos anuales y el escurrimiento en los ríos es de 410 millones de metros cúbicos (CONAGUA, 2017).

### 1.1.1 Usos del agua.

Se define al uso como la aplicación del agua a una actividad. Cuando existe consumo, entendido como la diferencia entre el volumen suministrado y el volumen descargado, se trata de un uso consuntivo. El agua es empleada de diversas formas prácticamente en todas las actividades humanas, ya sea para subsistir o para producir e intercambiar bienes y servicios, en la tabla 1.1 se muestra la distribución de los usos del agua (Instituto del agua y medio ambiente, 2007).

**Tabla 1.1 Distribución de los usos del agua.**

Uso	Origen		Volumen total	Porcentaje de Extracción
	Superficial	Subterráneo		
Agrícola	40.7 m <sup>3</sup>	20.5 m <sup>3</sup>	61.2 m <sup>3</sup>	76.8 %
Público	4.2 m <sup>3</sup>	7.0 m <sup>3</sup>	11.2 m <sup>3</sup>	14.0 %
Industria	1.6 m <sup>3</sup>	1.6 m <sup>3</sup>	3.3 m <sup>3</sup>	4.1 %
Termoeléctricas	3.6 m <sup>3</sup>	0.4 m <sup>3</sup>	4.1 m <sup>3</sup>	5.1 %
TOTAL	50.2 m <sup>3</sup>	29.5 m <sup>3</sup>	79.8 m <sup>3</sup>	100 %

*FUENTE: Instituto del agua y medio ambiente, 2007.*

*Uso agrícola:* Es el principal uso del agua en México, el cual en términos de uso de aguas nacionales se refiere principalmente al agua utilizada para el riego de cultivos. En la figura 1.3 se muestra el uso del agua para riegos de cultivos, una tercera parte del agua concesionada para el uso agropecuario, que agrupa los usos agrícolas, acuacultura, pecuario, múltiple y otros, es de origen subterráneo (Instituto del agua y medio ambiente, 2007).



*FUENTE: El productor, El periódico del campo.*

**Figura 1.3 Uso agrícola del agua**

*Uso público:* El uso para abastecimiento público incluye la totalidad del agua entregada a través de las redes de agua potable, las cuales abastecen a los usuarios domésticos (domicilios) como se observa en la figura 1.4, así como a las diversas industrias y servicios conectados a dichas redes. Para el abastecimiento público, que agrupa al uso público urbano y al doméstico, el tipo de fuente predominante es la subterránea con el 62% del volumen (Instituto del agua y medio ambiente, 2007).



*FUENTE: El productor, El periódico del campo.*

**Figura 1.4 Uso público del agua**

### **1.1.2 Agua para uso industrial.**

Los principales subsectores que integran a la industria, sin considerar los orientados a la generación de electricidad son extracción de petróleo y de gas, fabricación de equipo de transporte, industria química, e industria alimentaria. Si bien representa solamente el 4% del uso total, el uso industrial que agrupa al industrial, servicios, agroindustrial y comercio, presenta una fuerte dinámica de crecimiento (Instituto del agua y medio ambiente, 2007).

La cantidad de agua utilizada en la mayor parte de las industrias primarias y secundarias es considerable en procesos de elaboración, transformación, calderas, enfriamiento, y servicios generales. La demanda depende del tipo de industria.

El tratamiento de agua permite optimizar operaciones de producción, tener un mejor producto si este contiene agua o simplemente mantener en buen estado las tuberías y recipientes que lo contienen. Desde una simple filtración mecánica para eliminar sedimentos; hasta tratamiento especiales para eliminar dureza o desmineralizar el agua. Los generadores de vapor pueden tener incrustaciones o corroerse, lo que significa que necesitan más combustible para calentar la misma cantidad de agua. Las torres enfriamiento también pueden evitarse mantenimientos constantes o hacer paros en las plantas, el agua almacenada o de uso humano puede tener presencia de bacterias.

En la tabla 1.2 se muestra el uso del agua que la industria demanda, esta puede clasificarse en cuatro principales actividades que se llevan a cabo en la mayoría de las industrias.

**Tabla 1.2 Clasificación del uso del agua en la industria.**

Clasificación	Descripción
<i>Agua de enfriamiento</i>	La industria demanda grandes volúmenes de agua para enfriamiento en diversos procesos, como puede ser el de condensadores de plantas generadoras de energía, refinamiento, refinamiento de petróleo, plantas químicas, destilerías y otras.
<i>Agua para calderas</i>	El agua que se utiliza para calderas permite la generación de vapor o energía. En general, la calidad del agua debe ser tal que no deposite sustancias incrustantes, no corroa el metal de las calderas o de las líneas de conducción. Agua de tales características es difícil de encontrar en estado natural, por lo que las condiciones de calidad se logran mediante tratamiento.
<i>Agua para proceso</i>	Es el agua que se incorpora en la manufactura del producto, o que pasa a formar parte del producto terminado, o el agua empleada como medio de transporte de productos. Para cada caso en particular, los procesos industriales demandan agua definida bajo normas específicas.
<i>Agua para servicios generales</i>	En este caso se incluye la limpieza de las instalaciones, servicios sanitarios, usos personales y en ocasiones riego de áreas verdes. El agua de servicios requiere de cierta calidad, sobre todo cuando ésta tiene usos sanitarios y personales, pues la calidad debe ser potable.

FUENTE: Instituto del agua y medio ambiente, 2007.



## 1.2 Dióxido de cloro.

El dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) se ha utilizado como alternativa al momento de usar un desinfectante en aguas. Una de las principales características por la cual el dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) se destaca, es su gran capacidad biocida. Comparado con el cloro y sus derivados, es más eficiente. Posee cualidades que le permiten ser selectivo dado que mejora la calidad del agua a nivel organoléptico. Por otro lado el dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) no permite la formación de trihalometanos (THM). Su uso en plantas de tratamiento se vuelve complejo dado su sensibilidad al momento de producirse y su elevado costo (G.E. Betz, 2014). En la figura 1.5 se muestra la composición química de la molécula de dióxido de cloro.

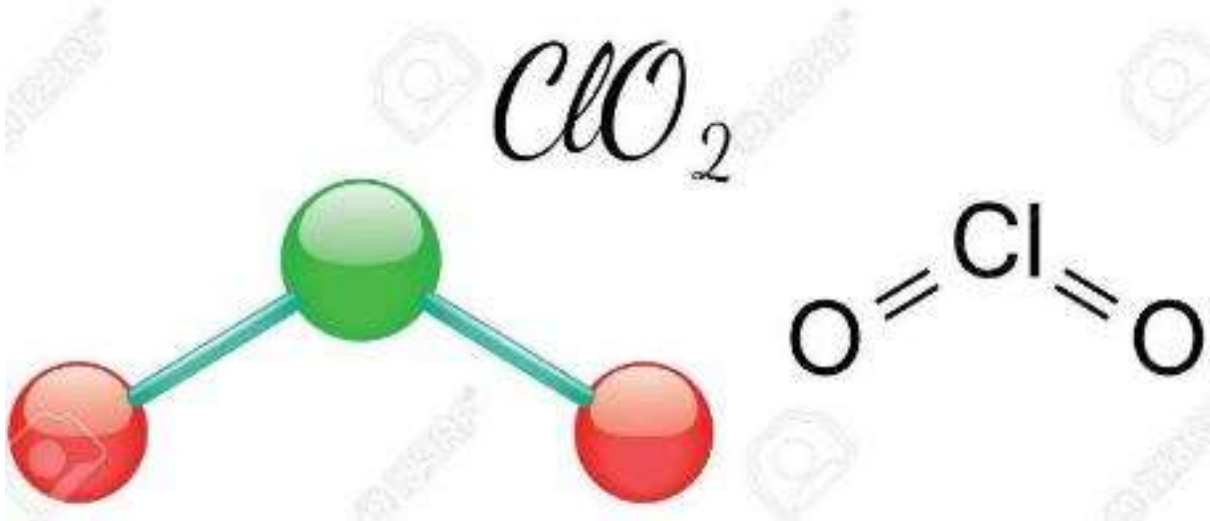


Figura 1.5 Dióxido de cloro. G.E. Betz, 2014

Entre los usos del dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) se encuentran:

- Eliminación de películas biológicas: La película biológica protege a los patógenos de biocidas que los pueden matar o inhibir sus funciones, el dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) rompe esta película eliminando dichos patógenos y no permite que vuelvan a generarse.

- Es usado en el tratamiento de aguas para consumo humano, en la remoción de magnesio, hierro, olores y sabores del agua, garantizando una excelente calidad al consumidor.
- Elimina la colaboración de la lignina en la pulpa del papel, obteniéndose resultados óptimos en la fabricación de papel de alta calidad.
- En campos petroleros, se está evaluando su eficiencia para romper emulsiones y geles en las fases de perforación y exploración de los pozos.
- En la industria de alimentos, el dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>) se ha utilizado con mejores resultados que el cloro, evitando formación de trihalometanos y otros compuestos que pueden afectar la calidad de la vida de los consumidores.

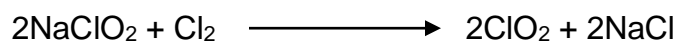
### 1.2.1 Propiedades del dióxido de cloro como desinfectante.

El dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>) es un gas de color verde amarillento, estable y sumamente soluble en agua hasta alcanzar concentraciones de 2%. Una de las propiedades más interesantes del dióxido de cloro es su eficiencia biocida en un amplio rango de pH que va de 3 a 10 (mejor de 4 a 9). Además de sus propiedades desinfectantes, el dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>) mejora la calidad del agua potable, es decir, neutraliza olores, remueve el color y oxida el hierro y manganeso. El dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>) es sensible a la luz ultravioleta (Deininger y colaboradores, 1998).

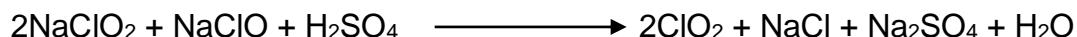
El dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>) no puede comprimirse ni distribuirse en cilindros como el cloro gaseoso ni puede transportarse debido a su inestabilidad. El producto, por lo tanto, debe producirse *in situ* mediante el uso de generaciones especiales.

Comúnmente se genera mediante dos mecanismos:

- La reacción de clorito de sodio (NaClO<sub>2</sub>) con cloro gaseoso (Cl<sub>2</sub>), sistema de dos compuestos químicos.



- La reacción de clorito de sodio (NaClO<sub>2</sub>) con hipoclorito de sodio (NaClO) y ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), sistema de tres compuestos químicos.



Estrictamente como desinfectante, el dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>) presenta las siguientes ventajas:

- Su potencial bactericida es relativamente independiente del pH entre 4 y 10.
- Es mejor que el cloro para el tratamiento de esporas.
- Requiere poco tiempo de contacto.
- Tiene buena solubilidad.
- No hay corrosión en altas concentraciones, lo que reduce los costos de mantenimiento.
- No reacciona con amoníaco o sales de amonio.
- Mejora la coagulación.
- Remueve hierro y manganeso mejor que el cloro.

Las propiedades fisicoquímicas del dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>) mostradas en la tabla 1.3 son limitadas, por tal motivo, suele emplearse el cloro como desinfectante secundario para asegurar protección adicional en el sistema de distribución (G.E. Betz, 2014).

**Tabla 1.3 Características fisicoquímicas del dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>).**

Propiedades	Características
Aspecto	Gas
Color	Verde amarillento
Olor	Arce
Presión de vapor	101Kpa a 20°C
Densidad relativa de vapor	2.3
Solubilidad en agua	0.8gr/100ml a 20°C
Punto de ebullición	11°C
Punto de fusión	-59°C
Peso molecular	67.5

FUENTE: G.E. Betz, 2014.

Como oxidante el dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) es muy selectivo. Ataca el centro rico en electrones de las moléculas orgánicas, de esta manera se transfiere un electrón y el dióxido de cloro se reduce a un ion clorito ( $\text{ClO}_2^-$ ). Es más efectivo a bajas concentraciones; no es tan reactivo como el ozono o el cloro y solo reacciona con sustancias sulfúricas, aminas y otras sustancias orgánicas reactivas. En comparación con el cloro y el ozono se requiere menos dióxido de cloro para obtener una concentración de desinfectante residual efectiva. También se puede utilizar cuando la concentración de materia orgánica es alta (Lenntech, 2012).

La fuerza de oxidación describe como de fuerte son las reacciones de oxidación cuando tiene lugar una reacción con una sustancia oxidable. El ozono tiene la mayor fuerza de oxidación y reacciona con cualquier sustancia susceptible de ser oxidada. El dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) es débil, tiene una menor fuerza que el ácido hipocloroso o ácido hipobromoso.

La capacidad de oxidación muestra como los electrones son transferidos en una reacción de oxidación reducción. El átomo cloro en el dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) tiene un número de oxidación de +4. Por eso el dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) puede aceptar hasta 5 electrones cuando es reducido a cloro (Lenntech, 2012).

### **1.2.2 Mecanismos de desinfección del dióxido de cloro.**

El dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) existe en el agua (poca o ninguna disociación) y, por lo tanto, puede pasar a través de las membranas celulares de las bacterias y destruirlas. El efecto que tiene sobre los virus incluye su adsorción y penetración en la capa proteica de la de la cápside viral y su reacción con el ácido ribonucleico (ARN) del virus. Como resultado, el dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) daña la capacidad genética del virus (Izquierdo, 2010).

El dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>) tiene menor efecto microbicida que el ozono, pero es un desinfectante más potente que el cloro, destruye enterovirus, *E. coli* y amebas y es efectivo contra los quistes de *Cryptosporidium* (Cowley, 2010).

En la tabla 1.4 se muestra de manera comparativa la eficacia biocida, la estabilidad y el efecto del pH del dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>) frente a tres desinfectantes comunes.

**Tabla 1.4 Eficacia biocida, estabilidad y efecto del pH.**

Desinfectante	Eficacia biocida	Estabilidad	Efecto del pH en la eficacia
Ozono	1	4	Poca influencia
Dióxido de cloro	2	2	Poca influencia
Cloro	3	3	Disminuye al aumentar el pH
Cloraminas	4	1	Poca influencia

1=Más, 4=Menos FUENTE: G.E. Betz, 2014.

Este cuadro permite identificar que el ozono, con un potencial de oxidación más fuerte, es el menos estable de los cuatro compuestos. También se ha observado que las cloraminas pueden tener la menor efectividad biocida, pero presentan un efecto residual más prolongado.

El dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>) reacciona en el agua con compuestos fenólicos, sustancias húmicas, iones metálicos y sustancias orgánicas. Esta acción oxidante a menudo mejora el gusto, olor y color del agua, además elimina la probabilidad de producción de trihalometanos (THM) cuando se realiza una adecuada dosificación in situ de los elementos constituyentes del dióxido de cloro en el agua (Lenntech, 2012).

### 1.2.3 Subproductos de la desinfección con dióxido de cloro.

Mientras los desinfectantes que contienen cloro reaccionan con diversas sustancias mediante la oxidación y sustitución electrofílica, el dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>) solo reacciona mediante la oxidación.

Esta es la razón por la cual el uso de dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) puede disminuir la formación de trihalometanos (THM) en el agua tratada. Si eventualmente se producen niveles considerables de trihalometanos (THM) en las aguas tratadas con dióxido de cloro, esto a menudo se debe a problemas en los generadores de dióxido de cloro, generalmente por exceso en el suministro de cloro, sustancia que participa en la formación de esos trihalometanos (THM) (Lenntech, 2012).

En muchos casos, los productos de la oxidación con dióxido de cloro no contienen átomos de halógeno y específicamente el dióxido de cloro en presencia de sustancias húmicas no da lugar a niveles significativos de trihalometanos (THM). No se ha observado la formación de trihalometanos que contengan bromo al tratar materiales húmicos con dióxido de cloro. Tampoco reacciona con el amoníaco para formar cloraminas (García y Castro, 2011).

De cualquier modo, no se puede negar la existencia de subproductos de desinfección y los productos de la reacción del dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) con material orgánico en el agua incluyen cloro fenoles y los ácidos maleicos, fumáricos y oxálicos. Un estudio de los subproductos de la reacción del dióxido de cloro en un tratamiento piloto reveló más de 40 subproductos de desinfección, aunque su toxicidad en la mayor parte es desconocida. Durante la oxidación de la materia orgánica, el dióxido de cloro se reduce al ion clorito. Es precisamente el clorito y también los cloratos los más importantes SPD producidos con el uso de este desinfectante (García y Castro, 2011).

La OMS no ha establecido un valor guía para el dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) debido a su deterioro rápido a clorito, clorato y cloruro, y porque el valor guía provisional de la OMS para el clorito, 200 ppm, es un protector adecuado contra la toxicidad potencial del dióxido de cloro.

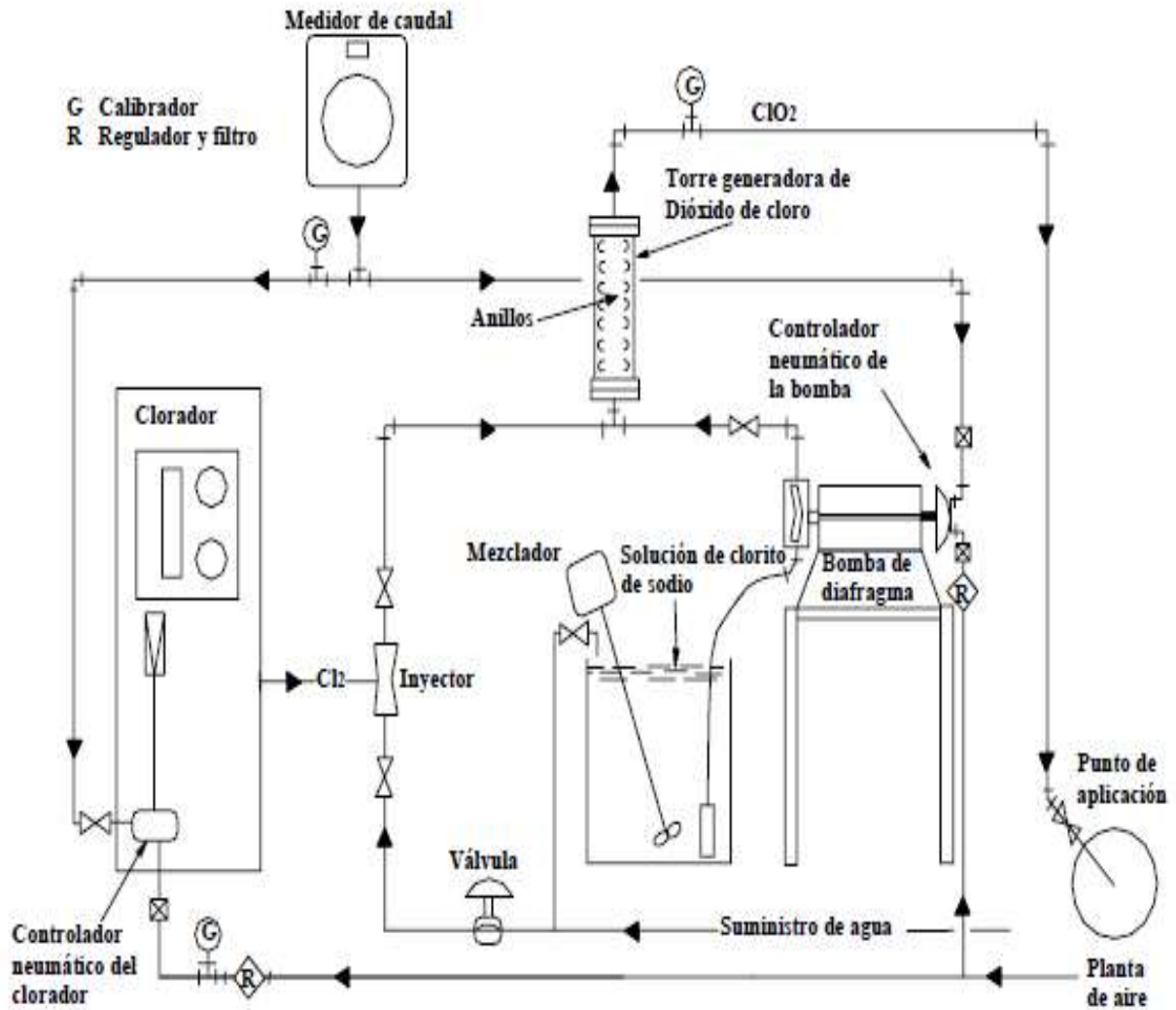
### **1.2.4 Generación de dióxido de cloro.**

No existe ningún estándar industrial para el rendimiento de los generadores de dióxido de cloro. La eficiencia del generador se define no solo en función de la conversión del clorito de sodio en dióxido de cloro, sino también en función de la generación de subproductos como ion clorato, cloro libre y clorito sobrante. Cuando el generador no funciona adecuadamente, estos subproductos pueden salir del generador de  $\text{ClO}_2$  en cantidades excesivas y disminuir los resultados esperados. Además, el rendimiento deficiente de los generadores dará como resultado costos de operación superiores a los deseados (G.E. Betz, 2014).

Los generadores modernos de dióxido de cloro son capaces de funcionar sistemáticamente en los niveles deseados.

Se recomienda para ciudades donde se pueda contar con recursos humanos y materiales necesarios para una buena operación y mantenimiento, así como para el seguimiento de apropiadas medidas de seguridad. A pesar de que cada integrante de una planta de generación de dióxido de cloro es relativamente sencillo (bombas, caudalímetros, mezcladores, inyectoros, etc.), el conjunto representa un sistema complejo que requiere personal técnico capacitado para entenderlo, operarlo, mantenerlo y repararlo (G.E. Betz, 2014).

La figura 1.6 ilustra una instalación típica de dióxido de cloro que utiliza una señal de presión de aire para lograr un control proporcional del suministro de sustancias químicas. Si se cambian algunos componentes internos del sistema neumático a eléctrico se pueden obtener los mismos resultados.



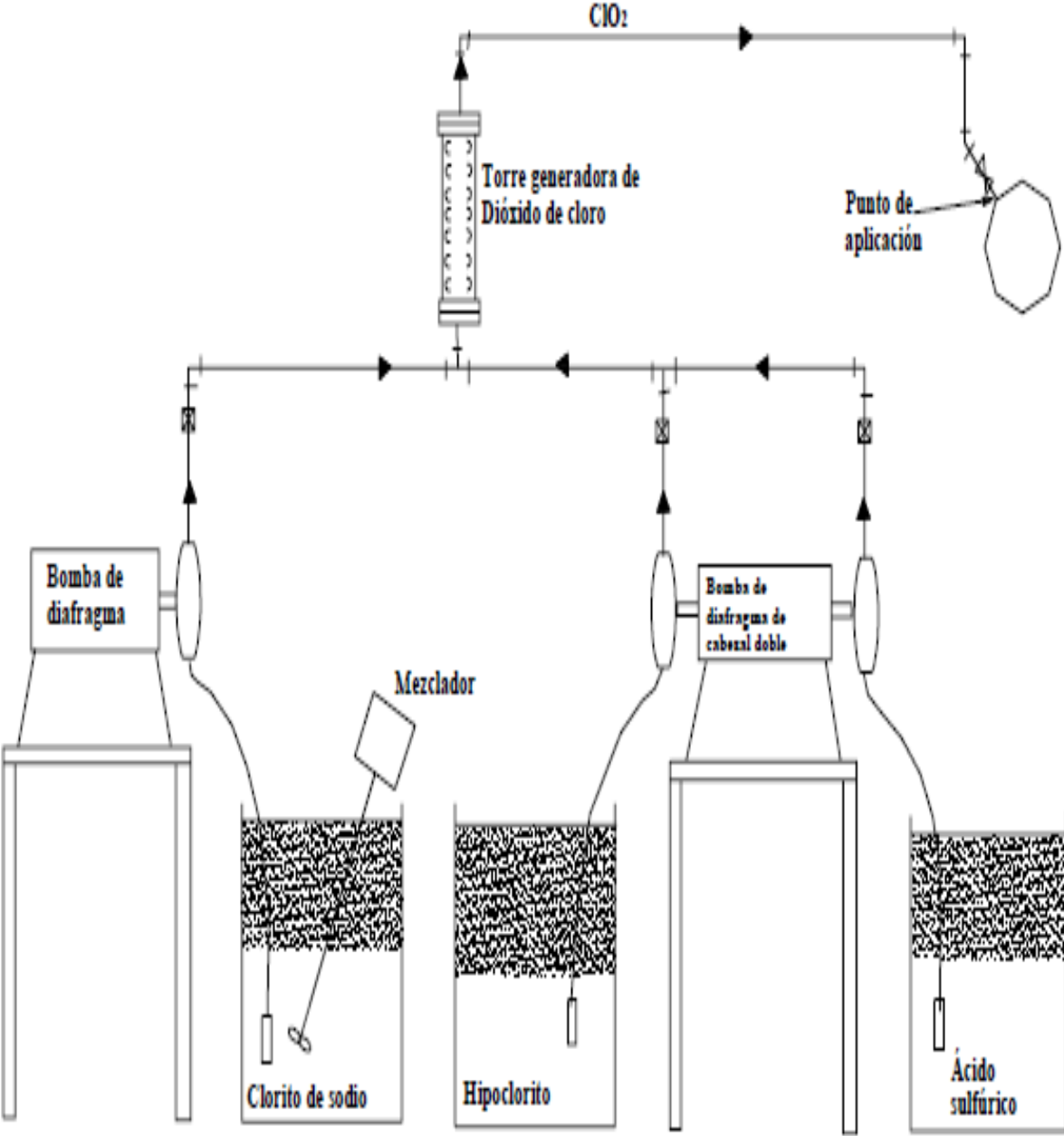
FUENTE: G.E. Betz, 2014.

Figura 1.6 Generador de dióxido de cloro (Sistema de dos componentes).

Puede ser que la estación de cloración consista en una bomba de diafragma que suministre una solución de clorito de sodio a la torre de reacción, instalada en la línea de descarga de solución de dióxido de cloro. La bomba de diafragma se controla neumáticamente, de tal manera que sea compatible con el control automático proporcional del dosificador. El caudal de agua tratada por la estación de dióxido de cloro se rige por el grado de concentración de la solución de cloro. La concentración máxima posible bajo condiciones hidráulicas ideales alcanza las 5.000 ppm. Mientras que el límite inferior es 500 ppm, para producir la reacción necesaria.



La figura 1.7 ilustra el equipo para las instalaciones que utilizan hipoclorito. Estas instalaciones usualmente se limitan a tratar un caudal de 30 a 45 l/s, lo que equivale a una población máxima entre 30,000 y 40,000 habitantes. Tales instalaciones pueden ser utilizadas en pequeños suministros de agua por pozo, con únicamente una operación de arranque y parada automática.



FUENTE: G.E. Betz, 2014.

Figura 1.7 Generador de dióxido de cloro (Sistema de tres componentes).

### 1.3 Hipoclorito de sodio.

Los hipocloritos son agentes oxidantes fuertes con mayor fuerza que el peróxido de hidrogeno o el dióxido de cloro. Su carácter oxidante fuerte le permite actuar como agente de blanqueo y desinfección; estas propiedades se aprovechan para el tratamiento de fibras y la eliminación de microorganismos.

Con la adición de hipoclorito de sodio en el agua se genera ácido hipocloroso; el ácido hipocloroso se divide en ácido clorhídrico y oxígeno. El átomo de oxígeno es un oxidante muy fuerte. El hipoclorito de sodio es muy efectivo contra las bacterias, virus y hongos manteniendo desinfectada y limpia el agua (W. Roeske y colaboradores, 2004).

Las soluciones de hipoclorito de sodio caen dentro de dos clasificaciones:

- Blanqueadores de uso doméstico, que contiene entre 5 y 5.5% de cloro disponible.
- Soluciones fuertes o comerciales, que contienen entre 12 y 15% de cloro disponible

El término “contenido de cloro disponible”, es también denominado cloro activo (Estrella y colaboradores, 2003).

En colaboración de los volúmenes más pequeños de agua, se puede usar hipoclorito de sodio para la desinfección de agua potable. Estas soluciones de hipoclorito se pueden almacenar sólo por un período de tiempo limitado. Se descomponen gradualmente y el grado de cloro efectivo disminuye. La descomposición se acelera por la exposición a la luz, el calor y por impurezas tales como trazas de metal.

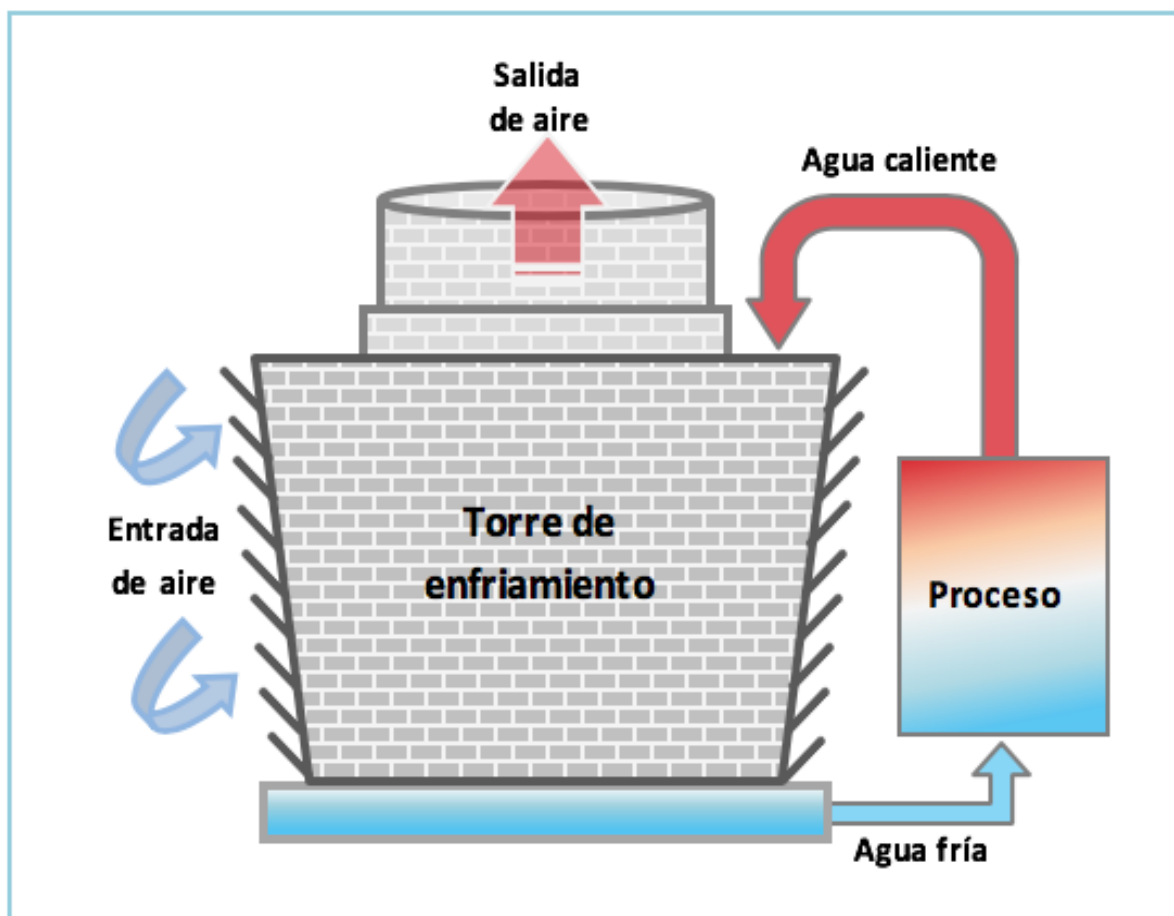
El hipoclorito de sodio se utiliza comúnmente en: blanqueado, desinfección, control de olor, cloración de aguas de procesos o para bebida, eliminación de lógamo y algas en piscinas (W. Roeske y colaboradores, 2004).

## 1.4 Torres de enfriamiento.

La torre de enfriamiento es un dispositivo que tiene por objeto enfriar cierta cantidad de agua, aprovechando el proceso de humidificación.

Dentro de la torre de enfriamiento el aire tiene un íntimo contacto con el agua y se satura de humedad, incrementando su calor latente de vaporización, el cual finalmente ha sido absorbido del agua.

El objetivo que se persigue en la torre de enfriamiento es que el agua este el mayor tiempo posible en contacto con el aire, lo cual se logra con la altura de la misma y además interponiendo obstáculos (el relleno), que la van deteniendo y al mismo tiempo la van fragmentando facilitando más el proceso de evaporación como se muestra en la figura 1.8.



FUENTE: IDAE, 2007.

Figura 1.8 Esquema general de una torre de enfriamiento.

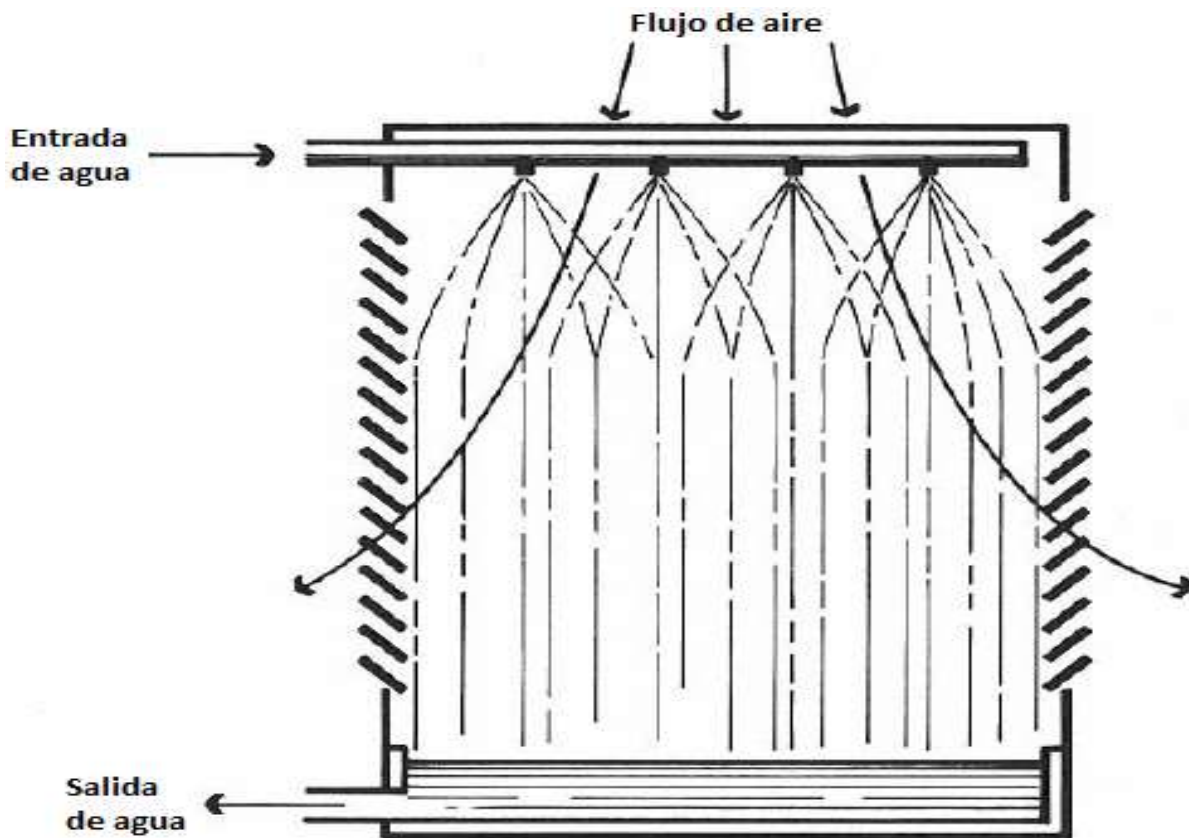
La clasificación de las torres de enfriamiento es de acuerdo al medio utilizado para suministrar aire a la torre las cuales pueden ser:

➤ **Circulación Natural.**

Se clasifican, a su vez, en torres atmosféricas y en torres de tiro natural.

➤ **Torre atmosférica.**

Las torres atmosféricas utilizan las corrientes de aire de la atmósfera. El aire se mueve de forma horizontal y el agua cae verticalmente (flujo cruzado). Son torres de gran altura y pequeña sección transversal. Tienen un costo inicial alto debido a su gran tamaño, pero el costo de mantenimiento es reducido, al no existir partes mecánicas móviles. Actualmente, las torres atmosféricas están en desuso, la figura 1.9 muestra el funcionamiento de una torre de enfriamiento atmosférica (IDAE, 2007).



FUENTE: IDAE, 2007.

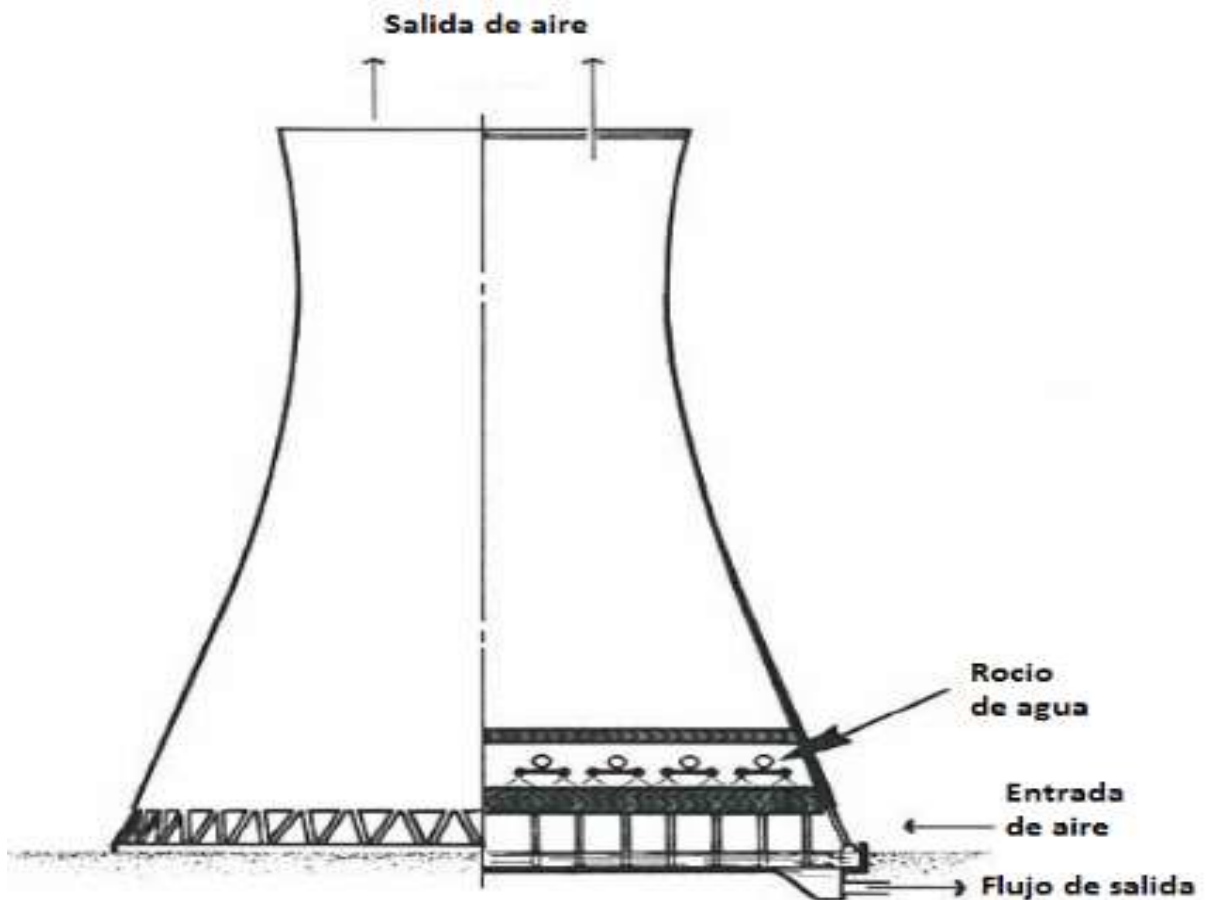
Figura 1.9 Torre de enfriamiento atmosférica.

➤ **Torre de tiro natural.**

Una torre de tiro natural es aquella en la que el aire es inducido por una gran chimenea situada sobre el relleno como se muestra en la figura 1.10.

La diferencia de densidades entre el aire húmedo caliente y el aire atmosférico es el principal motivo por el cual se crea el tiro de aire a través de la torre. La diferencia de velocidades entre el viento circulante a nivel del suelo y el viento que circula por la parte superior de la chimenea también ayuda a establecer el flujo de aire. Por ambos motivos, las torres de tiro natural han de ser altas y, además, deben tener una sección transversal grande para facilitar el movimiento ascendente del aire.

Tiene bajos costos de mantenimiento y son muy indicadas para enfriar grandes caudales de agua. Al igual que las torres atmosféricas, no tienen partes mecánicas. Son muy utilizadas en centrales térmicas; muy pocas veces son aplicables a plantas industriales debido a la fuerte inversión inicial necesaria (IDAE, 2007).



FUENTE: IDEA, 2007.

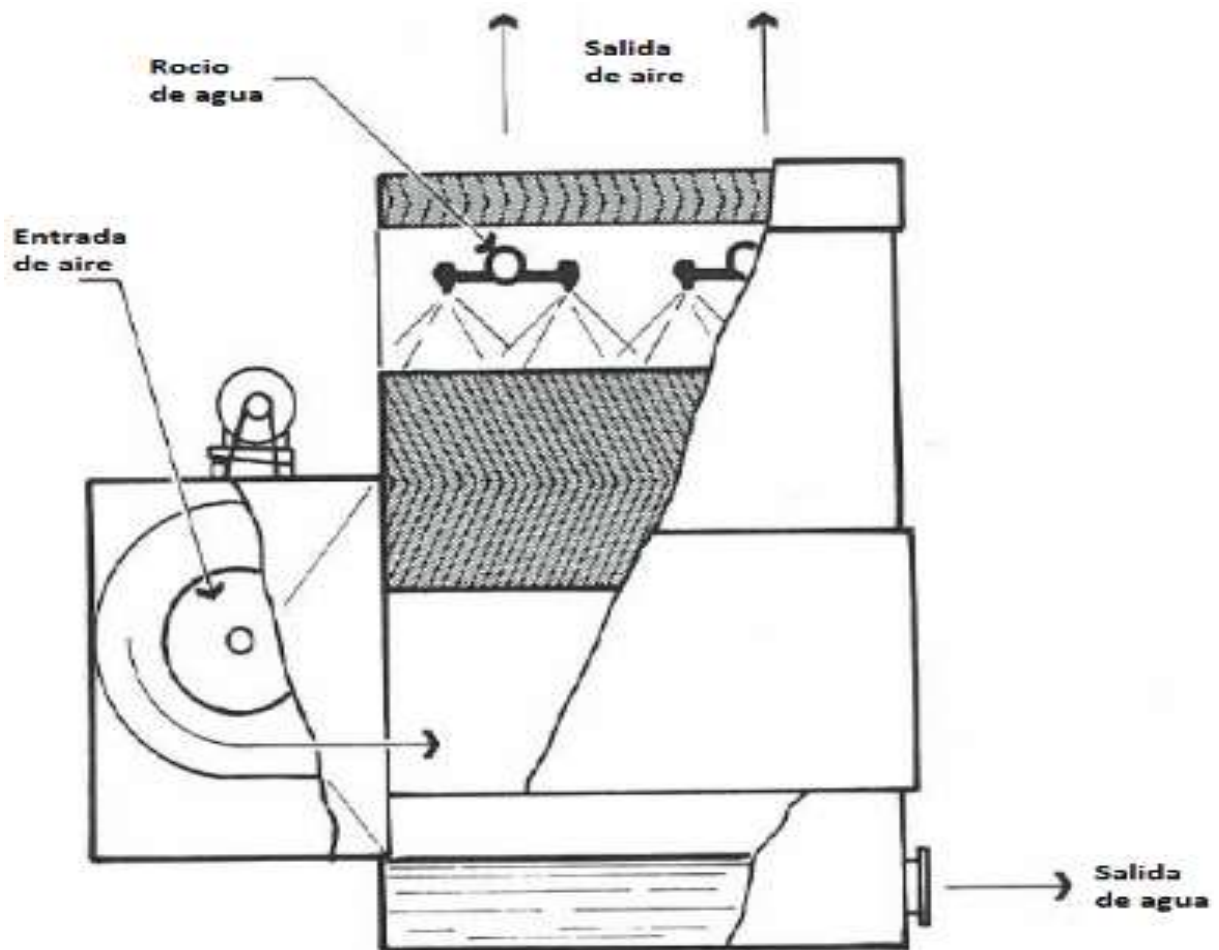
Figura 1.10 Torre de enfriamiento de tiro natural.

➤ **Circulación mecánica.**

Las torres de enfriamiento de tipo mecánico utilizan ventiladores para mover el aire a través de la torre sin depender del tiro natural o del viento. Si el ventilador se encuentra situado en la entrada de aire, el tiro es forzado. Cuando el ventilador se ubica en la zona de descarga del aire, se habla de tiro inducido (IDAE, 2007).

➤ **Torre de tiro forzado.**

En las torres de tiro forzado el aire se descarga a baja velocidad por la parte superior de la torre como se muestra en la figura 1.11. Estas torres de enfriamiento son, casi siempre, de flujo a contracorriente. Son más eficientes que las torres de tiro inducido, puesto que la presión dinámica convertida a estática realiza un trabajo útil (IDAE, 2007).



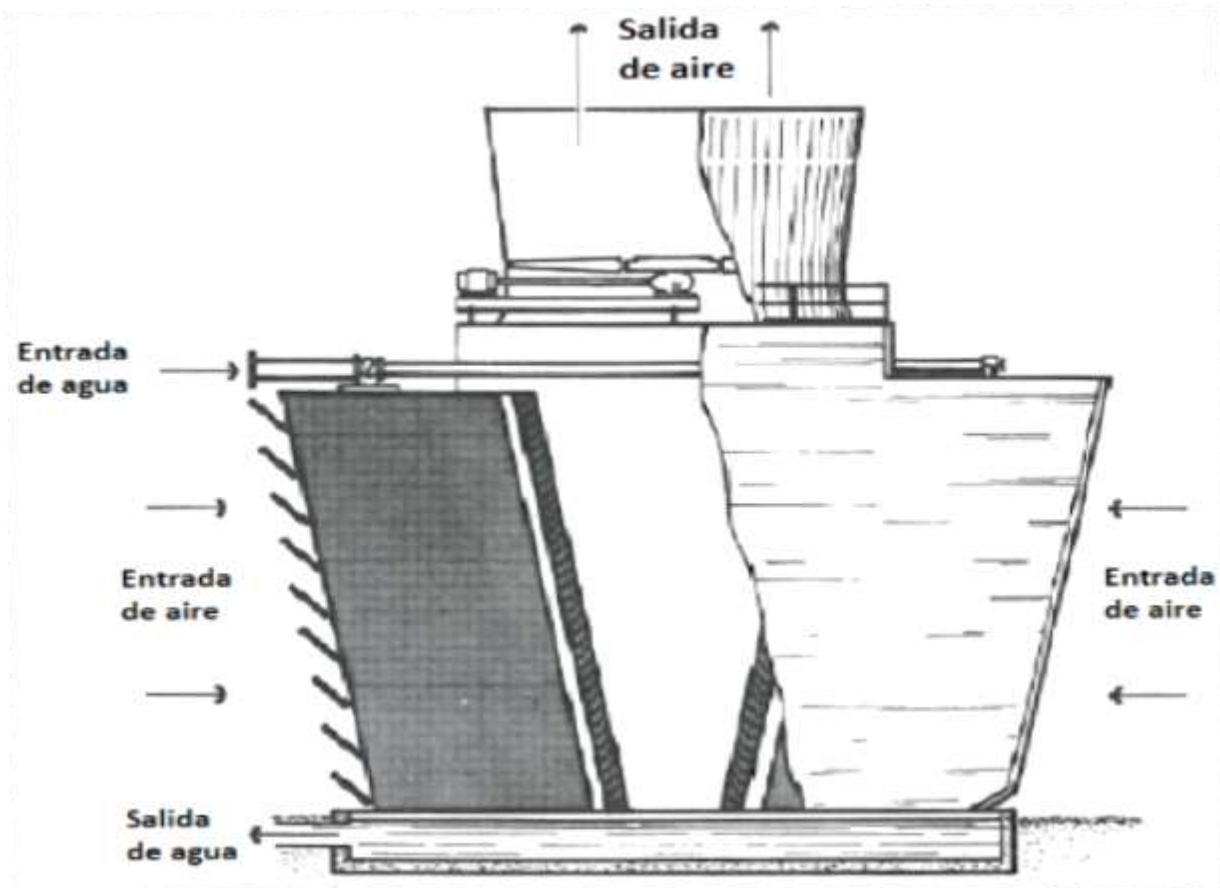
FUENTE: IDEA, 2007.

Figura 1.11 Torre de enfriamiento de tiro forzado.

➤ **Torre de tiro inducido.**

Las torres de tiro inducido pueden ser de flujo a contracorriente o de flujo cruzado. El flujo a contracorriente significa que el aire se mueve verticalmente a través del relleno, de manera que los flujos de agua y de aire tienen la misma dirección, pero sentido opuesto como se muestra en la figura 1.12.

La ventaja que tiene este tipo de torres es que el agua más fría se pone en contacto con el aire más seco, lográndose un máximo rendimiento. En éstas, el aire puede entrar a través de una o más paredes de la torre, con lo cual se consigue reducir en gran medida la altura de la entrada de aire. Además, la elevada velocidad con la que entra el aire hace que exista el riesgo de arrastre de suciedad y cuerpos extraños dentro de la torre. La resistencia del aire que asciende contra el agua que cae se traduce en una gran pérdida de presión estática y en un aumento de la potencia de ventilación en comparación con las torres de flujo cruzado (IDAE, 2007).



FUENTE: IDEA, 2007.

Figura 1.12 Torre de enfriamiento de tiro inducido.

## CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

### 2.1 Uso del agua en el Complejo Procesador de Gas Nuevo Pemex.

El agua que utilizada en el Complejo Procesador de Gas Nuevo Pemex proviene del río Carrizal y de los pozos Cactus-Níspero. El agua cruda es bombeada desde Bocatoma Mezcalapa e ingresa a la planta de pretratamiento. Posteriormente, el agua pretratada se distribuye para proporcionar agua contraincendios, vapor y agua de enfriamiento a las plantas de proceso del Complejo Procesador de Gas Nuevo Pemex como se muestra en la figura 2.1.

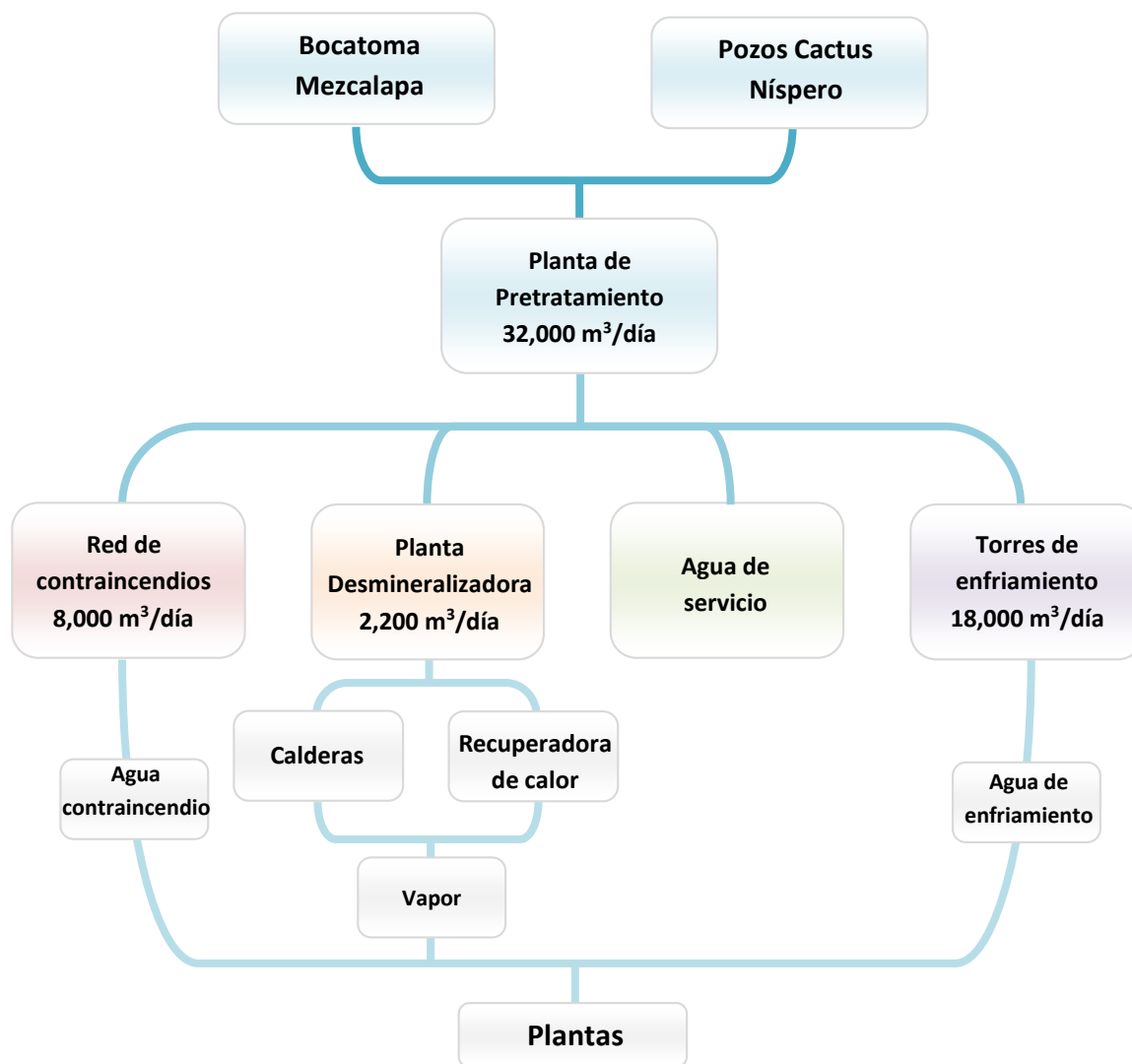


Figura 2.1 Diagrama de flujo del uso de agua en CPG Nuevo Pemex.



## 2.2 Técnicas de caracterización del agua de la torre de enfriamiento.

La metodología establecida en este proyecto tuvo como propósito evaluar la aplicación del dióxido de cloro en el agua de la torre de enfriamiento CT-2601 del Complejo Procesador de Gas Nuevo Pemex.

Las variables de control definidas para este proyecto fueron:

- pH.
- Conductividad eléctrica.
- Concentración de dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ).
- Residual de dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ).
- Cuenta total bacteriana (CTB).
- Bacterias sulfato reductoras (BSR).

Adicionalmente se establecieron dos muestras de control para cada tratamiento en función de la concentración de dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ), con el propósito de evaluar si a mayor o menor concentración de dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) era favorable la remoción de bacterias mesófilas aerobias.

### 2.2.1 Determinación de los puntos de muestreo.

La torre de enfriamiento cuenta con tres puntos de muestreo, por la cual es suministrada el agua, ya sea que se envía a la planta de procesos o sea para reponer el agua perdida cuando se efectúa una purga de fondo.

Los tres puntos de muestreo establecidos son los siguientes:

- **Agua de suministro:** En esta agua es donde los productos químicos (dióxido de cloro) son adicionados o suministrados; posteriormente el agua es enviada a las Plantas de procesos (intercambiadores de calor).

- **Agua de retorno:** Esta agua es la que regresa de las Plantas de procesos (intercambiadores de calor) hacia la torre de enfriamiento, para su posterior tratamiento químico (adición de dióxido de cloro).
- **Agua de repuesto:** Esta agua es la que llega de la Planta de pretratamiento, y es adicionada a la torre de enfriamiento cuando pierde agua por la realización de una purga de fondo. Con el agua de repuesto podemos determinar las condiciones del agua que estamos suministrando a la torre de enfriamiento.

Las muestras tomadas en están regidas bajo la Norma Oficial Mexicana NOM-014-SSA1-1993, que establece los procedimientos sanitarios para el muestreo del agua. En la figura 2.2 se muestran los puntos de muestreo establecidos en la torre de enfriamiento CT-2601.



Figura 2.2 Puntos de muestreo de la torre de enfriamiento CT-2601.

En la figura 2.3 se muestra la torre de enfriamiento en la cual se desarrolló este proyecto de evaluación de la aplicación del dióxido de cloro.



**Figura 2.3 Torre de enfriamiento CT-2601 del CPG Nuevo Pemex.**

## 2.2.2 Determinación del pH y conductividad eléctrica.

Tomadas las muestras de la torre de enfriamiento CT-2601 se procedió a determinar el pH que contiene el agua, aquí es muy importante saber el pH que tiene el agua de repuesto procedente de la Planta de pretratamiento, ya que en la CT-2601 se tiene que mantener el pH entre 7.2 a 7.8, para ir controlando el pH se le suministrara  $H_2SO_4$  al 98%. En la tabla 2.1 se muestran las especificaciones requeridas por Pemex para el control del agua de la torre de enfriamiento de la CT-2601.

**Tabla 2.1 Especificaciones para el control del agua de enfriamiento.**

Parámetro	Norma	Anexo "B" Pemex
pH	NMX-AA-008-SCFI-2000 ( $ClO_2$ ) 2 - 10	48 ± 2 horas 7.2 - 7.8
Conductividad eléctrica	NMX-AA-093-SCFI-2000 (KCl) 2480 $\mu S/cm$	1800 $\mu S/cm$
Cuenta total bacteriana	NOM-092-SSA1-1994 10,000 UFC/col.	1000 UFC/col.
Bacterias sulfato reductoras	ASTM-D-4412-84 Ausencia	Ausencia

*FUENTE: PEMEX.*

Para la conductividad eléctrica también es importante no rebasar las especificaciones establecida por Pemex, la cual nos puede ocasionar problemas producidas por las sales generadas por la adición de los productos químicos.

La medición de pH y conductividad eléctrica se realizó a través de un potenciómetro, este se realiza en base a la Norma NMX-AA-008-SCFI-2000 y NMX-AA-093-SCFI-2000:

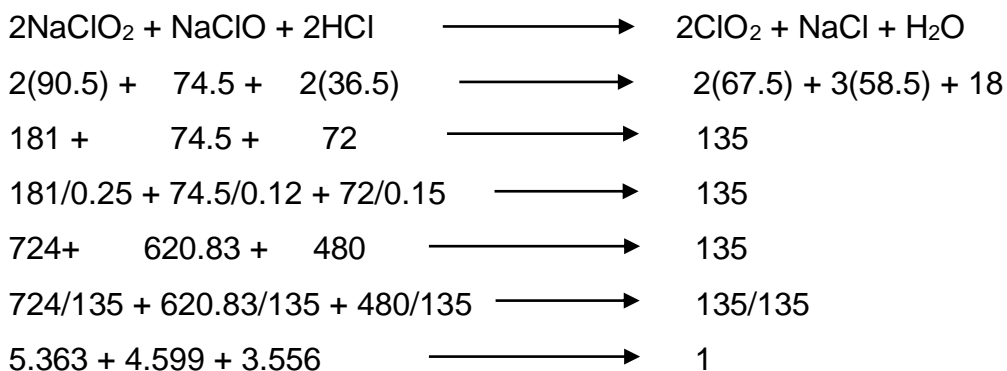
- Antes de realizar la medición de pH y conductividad eléctrica se verificó el potenciómetro de acuerdo al método MAC-03-05 que corresponde al equipo de uso.
- Se enjuagó con agua destilada los dos electrodos antes de sumergirlos en cada una de las tres muestras tomadas.
- Se procedió a sumergir los dos electrodos en la muestra, cuidando que el agua las cubriera totalmente para asegurar una medición correcta.
- Se esperó a que la lectura de pH y conductividad eléctrica se estabilizara, sin agitar los electrodos.
- Se registró el valor de pH y conductividad eléctrica una vez estabilizado, y se procedió a enjuagar con agua destilada los electrodos.

### 2.2.3 Concentración de dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>).

En este trabajo se utilizó dióxido de cloro en solución acuosa con una formulación a partir de clorito de sodio (NaClO<sub>2</sub>) al 25%, hipoclorito de sodio (NaClO) al 13% y ácido clorhídrico (HCl) al 15%, estabilizado, sin cloro libre y carente de efecto residual.

Se manejaron concentraciones de dióxido de cloro, las cuales fueron 0.2ppm, 0.3ppm y 0.4ppm.

#### I.- Estequiometría:



#### II.- Cantidades de reactivos para producir una unidad de dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>).

Clorito de sodio al 25% .....5.363 kg.

Hipoclorito de sodio al 13% .....4.599 kg.

Ácido clorhídrico al 15%.....3.556 kg.

#### III.- Cantidades de reactivos (lt) para producir 1 kg de dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>).

Clorito de sodio al 25% = 5.363 kg/1.22 kg/lt = 4.396 lts.

Hipoclorito de sodio al 13% = 4.599 kg/1.23 kg/lt = 3.739 lts.

Ácido clorhídrico al 15% = 3.556 kg/1.06 kg/lt = 3.355 lts.

#### **IV.- Cálculo del dióxido de cloro requerido para una torre de enfriamiento.**

Capacidad de la torre de enfriamiento: 140,000 gpm.

Recirculación real: (120,000) (5.45) = 654,000 m<sup>3</sup>/día.

Eficiencia de las bombas: 85%.

Demanda de dióxido de cloro: 0.2ppm – 0.4ppm.

ClO<sub>2</sub> requerido para 0.2ppm = (654,000 x 0.85 x 0.2) / (1000) = 111.18 kg/día.

ClO<sub>2</sub> requerido para 0.3ppm = (654,000 x 0.85 x 0.3) / (1000) = 166.77 kg/día.

ClO<sub>2</sub> requerido para 0.4ppm = (654,000 x 0.85 x 0.4) / (1000) = 222.36 kg/día.

ClO<sub>2</sub> requerido para 0.2ppm = 111.18/24 = 4.63 kg/hr.

ClO<sub>2</sub> requerido para 0.3ppm = 166.77/24 = 6.95 kg/hr.

ClO<sub>2</sub> requerido para 0.4ppm = 222.36/24 = 9.27 kg/hr.

La dosificación de dióxido de cloro es por 8hrs.

ClO<sub>2</sub> requerido para 0.2ppm = 4.63 x 8 = 37.04 kg de ClO<sub>2</sub>.

ClO<sub>2</sub> requerido para 0.3ppm = 6.95 x 8 = 55.60 kg de ClO<sub>2</sub>.

ClO<sub>2</sub> requerido para 0.4ppm = 9.27 x 8 = 74.16 kg de ClO<sub>2</sub>.

#### **V.- Cálculo reactivos químicos necesarios.**

##### **Para 0.2ppm de ClO<sub>2</sub>**

Clorito de sodio al 25% = 4.396 x 37.04 = 162.83 lts.

Hipoclorito de sodio al 13% = 3.739 x 37.04 = 138.49 lts.

Ácido clorhídrico al 15% = 3.355 x 37.04 = 124.27 lts.

##### **Para 0.3ppm de ClO<sub>2</sub>**

Clorito de sodio al 25% = 4.396 x 55.60 = 244.42 lts.

Hipoclorito de sodio al 13% = 3.739 x 55.60 = 207.89 lts.

Ácido clorhídrico al 15% = 3.355 x 55.60 = 186.54 lts.

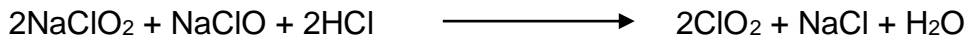
### Para 0.4ppm de ClO<sub>2</sub>

Clorito de sodio al 25% = 4.396 x 74.16 = 326lts.

Hipoclorito de sodio al 13% = 3.739 x 74.16 = 277.28lts.

Ácido clorhídrico al 15% = 3.355 x 74.16 = 248.81lts.

En la figura 2.4 se muestran los tres precursores que se ocuparon para la generación del dióxido de cloro. Los cuales fueron el clorito de sodio al 25%, el hipoclorito de sodio al 13% y el ácido clorhídrico al 15%.



a) Ácido Clorhídrico al 15%

b) Hipoclorito de sodio al 13%

c) Clorito de sodio al 25%

**Figura 2.4 Precursores para la generación del dióxido de cloro.**



## 2.2.4 Residual de dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>).

Este término se refiere al cloro presente en agua, cuando ha sido adicionado al proceso de cloración.

El residual de dióxido de cloro se realizó a través de un equipo llamado Palintest, este se realiza de la siguiente manera:

- En este método se analizó la muestra tomada del agua de retorno, ya que es el agua que regresa de la Planta de proceso (intercambiadores de calor), para conocer cuál es el residual de dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>) con el que regresaba adicionándole previamente cierta concentración de dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>) al agua de suministro.
- La muestra de agua de retorno tomada después de 2 horas mínimo de haber adicionado la concentración de dióxido de cloro (0.2, 0.3 y 0.4ppm) al agua de suministro es la que se procedió a analizar, se encendió el equipo Palintest.
- Se procedió a triturar una tableta de color azul que es el Buffer y otra tableta de color blanco que es el Indicador en una celda de vidrio de 10ml.
- Se vertió 10ml de la muestra del agua de retorno en la celda de 10ml, junto con el Buffer y el Indicador; y se agitó suavemente.
- Se tuvo un tiempo de espera de exactamente 1 minuto para que reaccione la muestra con los reactivos.
- Se tomó otros 10ml de muestra de retorno en otra celda de vidrio de 10ml, esta muestra fue ocupada como blanco para realizar la medición.

- Se procedió a realizar el análisis del residual del dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) en el equipo Palintest, introduciendo al equipo nuestra muestra sin reactivos (blanco) para dar una lectura de cero y posteriormente introduciendo nuestra muestra con los reactivos para obtener la lectura real del residual de dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ).

En la figura 2.5 se muestra los reactivos y el equipo Palintest para la determinación del residual de dióxido de cloro presente en el agua de enfriamiento que es regresada de las Plantas de procesos, como son los equipos de intercambio de calor.



**Figura 2.5** Equipo para determinar el residual de dióxido de cloro.

### **2.2.5 Cuenta total bacteriana (CTB).**

Esta técnica se basa en contar las unidades formadoras de colonias o UFC presentes en un gramo o mililitro de muestra. Se considera que cada colonia que desarrolla en el medio de cultivo después de cierto tiempo de incubación a la temperatura adecuada, proviene de microorganismos o de un agregado de ellos, de la muestra que se está estudiando; ese microorganismo o microorganismos son capaces de formar la colonia, es decir una UFC. Para que las colonias puedan contarse de manera confiable, se hacen las diluciones decimales necesarias de la muestra, antes de ponerla en el medio de cultivo.

#### **Muestreo.**

Se recolectaron las muestras en unas bolsas de plástico estéril conteniendo 0.1ml de solución de tiosulfato de sodio al 3% con la finalidad de eliminar los residuos de cloro u otros halógenos presentes en la muestra de agua.

#### **Conservación de la muestra.**

La muestra recolectada se analizó inmediatamente para reducir al mínimo las alteraciones de la población bacteriana. El tiempo máximo recomendado que debe de transcurrir entre la recolección de la muestra y su estudio es de 8 horas, si el análisis no puede iniciarse en las primeras 8 horas, se debe de mantener a una temperatura inferior a 4 °C, pero sin congelarla. No se debe de permitir que el intervalo máximo entre la toma de la muestra y el análisis supere las 24 horas.

#### **Medio de cultivo.**

- El medio de cultivo debe mantenerse en baño de agua regulado a 45 °C, durante el tiempo suficiente para que alcance esta temperatura, y hasta su utilización.

- El tiempo transcurrido desde el momento en que la muestra se incorpora al diluyente, hasta que finalmente se adiciona el medio de cultivo a las cajas, no debe de excederse de 20 minutos.

La cuenta total bacteriana se realizó a través de siembra por medio de cultivo Agar Nutritivo, este se realiza de la siguiente manera:

- Se distribuyeron las cajas estériles en la mesa de trabajo de manera que la inoculación y la adición del medio de cultivo se pueda realizar de manera cómoda y libremente. Se marcó las bases de las cajas con los datos pertinentes antes de inocular.
- Se inoculó por duplicado, 1ml de la dilución correspondiente a cada caja mediante pipeta estéril.
- Se agregó de 18 a 20ml del medio de cultivo mantenido a 45 °C. Para homogenizar, se mezcló mediante 6 movimientos de derecha a izquierda, 6 en el sentido de las manecillas del reloj, 6 en sentido contrario y 6 de atrás hacia adelante, sobre una superficie lisa y horizontal hasta lograr la completa incorporación del inóculo en el medio; cuidar que el medio no moje la cubierta de las cajas. Se dejó solidificar.
- El tiempo transcurrido desde el momento en que la muestra se incorpora al diluyente hasta que finalmente se adiciona al medio de cultivo a las cajas, no debe de exceder de 20 minutos.
- Se incluyó una caja sin inóculo por cada lote de medio y diluyente preparado como testigo de esterilidad.
- Se incubaron las cajas en posición invertida durante 48 horas y a 35°C. Según como se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Tiempo y temperatura requerido según el tipo microorganismo.

Grupo bacteriano	Temperatura	Tempo de incubación
Termofílicos	55 ± 2 °C	48 ± 2 horas
Mesofílicos	35 ± 2 °C	48 ± 2 horas
Psicrotróficos	20 ± 2 °C	De 3 a 5 días
Psicrofílicos	5 ± 2 °C	De 7 a 10 días

FUENTE: NORMA Oficial Mexicana NOM-092-SSA1-1994.

En la figura 2.6 se muestra un esquema del método de siembra y conteo de las muestras de agua de enfriamiento de la torre CT-2601 del Complejo Procesador de Gas Nuevo Pemex.

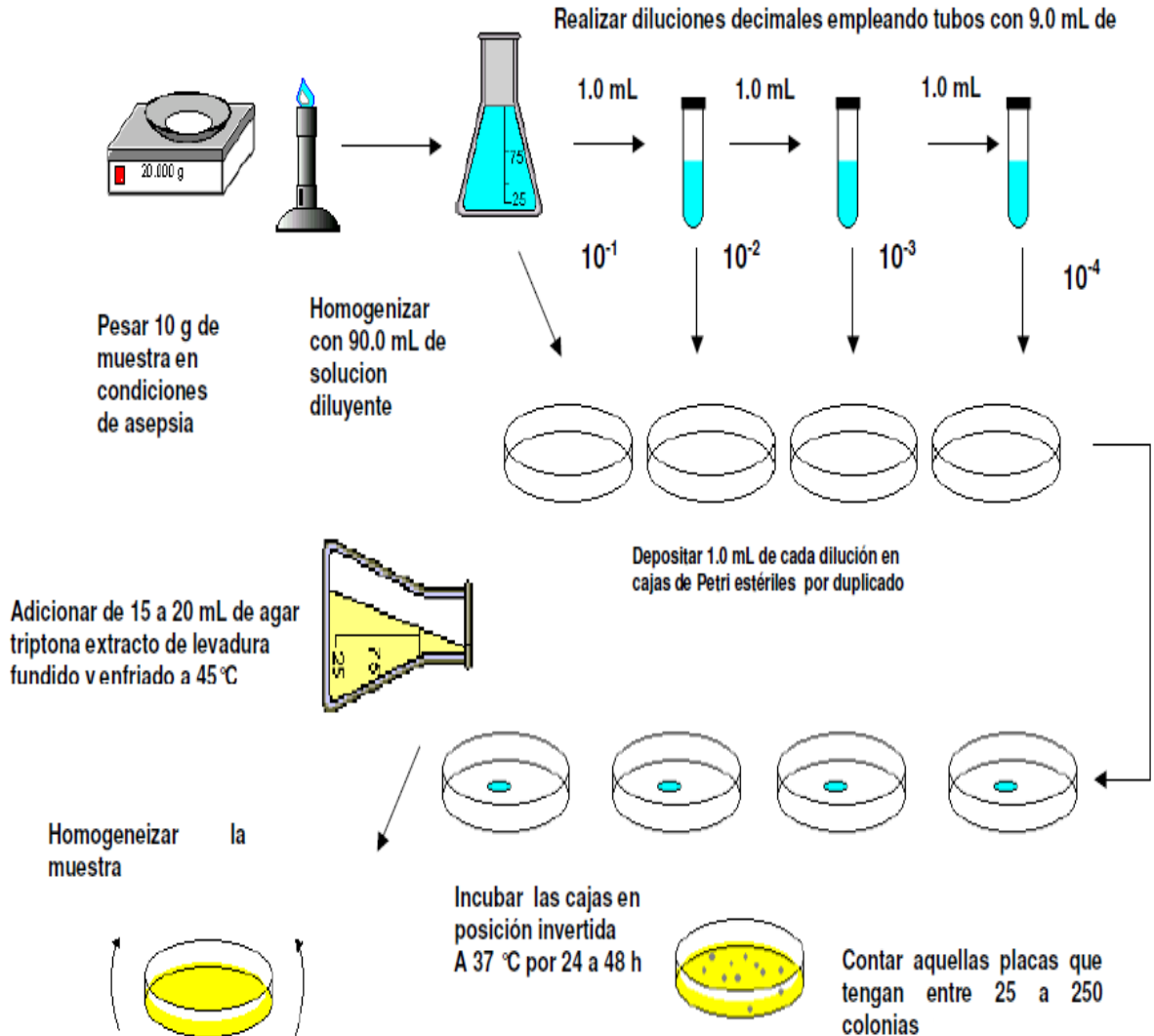


Figura 2.6 Método de siembra y conteo de microorganismos mesófilos aeróbicos.

## **2.2.6 Bacterias sulfato reductoras (BSR).**

Esta técnica se basa en determinar y cuantificar la presencia de las bacterias desulfovibrio (sulfato reductoras) presentes en el agua mediante la reacción del sulfuro de hidrogeno y el citrato férrico en un medio de cultivo en condiciones anaeróbicas.

### **Muestreo.**

Se recolectaron las muestras en unas bolsas de plástico estéril conteniendo 0.1ml de solución de tiosulfato de sodio al 3% con la finalidad de eliminar los residuos de cloro u otros halógenos presentes en la muestra de agua.

### **Conservación de la muestra.**

La muestra recolectada se analizó inmediatamente para reducir al mínimo las alteraciones de la población bacteriana. El tiempo máximo recomendado que debe de transcurrir entre la recolección de la muestra y su estudio es de 8 horas, si el análisis no puede iniciarse en las primeras 8 horas, se debe de mantener a una temperatura inferior a 4 °C, pero sin congelarla. No se debe de permitir que el intervalo máximo entre la toma de la muestra y el análisis supere las 24 horas.

### **Medio de cultivo.**

- El medio de cultivo estaba disponible de forma deshidratada por lo cual se preparó con los siguientes ingredientes:  
Bacto-Agar..... 20gr.  
Bacto-Triprona..... 10gr.
  
- Se diluyó a 1lt con agua destilada, se ajusto el pH=7; se agregó 1gr de sulfito de sodio, se calentó para disolver hasta hervir por 1 o 2 minutos.
  
- Se agregó 10ml de una solución de citrato férrico al 5%, se mezcló y se verificó el pH que fuera de  $7.6 \pm 0.1$ .

- Se distribuyó en porciones de 10ml en tubos de cultivos estériles con tapa rosca. Se esterilizó en la autoclave de 1.1 a 1.2kg/cm<sup>2</sup> de presión durante 15 minutos.
- Se mantuvo el medio de cultivo en forma líquida a 45-50 °C colocando los tubos en un baño de agua.

La determinación de las bacterias sulfato reductoras se llevó a cabo través de siembra por medio de cultivo Bacto-Triprona-Agar (BTA), este se realiza de la siguiente manera:

- Se trabajo en condiciones estériles, desinfectando el área de trabajo.
- Se tomó 1ml de la muestra o dilución en una pipeta estéril (se utilizó una pipeta estéril por cada una de las muestras que se sembraron); y se introdujo hasta el fondo del tubo que contiene el medio de cultivo estéril previamente preparado.
- Suavemente se retiró la pipeta, de tal manera, que la muestra quede dentro del medio de cultivo BTA.
- Se evitó la aireación para mantener condiciones anaeróbicas que favorezcan el crecimiento de los microorganismos.
- Se incubaron los tubos durante 48 horas y a 35±2 °C.

## CAPÍTULO III. RESULTADOS

### 3.1 Conductividad eléctrica y pH expuestos a diferente ppm de dióxido de cloro.

La medición del pH en el agua, es el parámetro más importante utilizado en la evaluación de las propiedades corrosivas de un medio ambiente acuático.

Así mismo, es importante para el funcionamiento efectivo de los procesos de tratamiento de aguas y su control; como por ejemplo la floculación y desinfección de cloro, el control de la disolución del plomo de aguas potables, tratamiento biológico de aguas residuales y los vertidos de aguas residuales.

En la figura 3.1 se muestra la medición de pH y conductividad eléctrica del agua de la torre de enfriamiento CT-2601 del Complejo Procesador de Gas Nuevo Pemex.

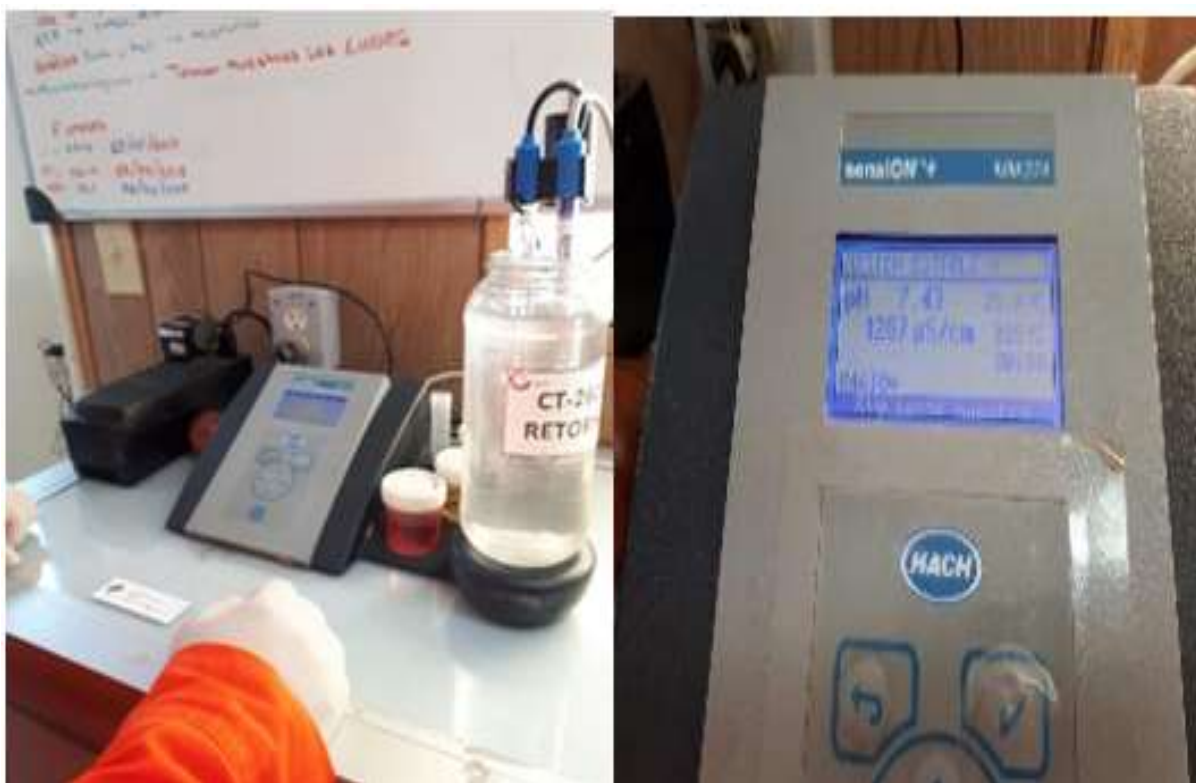
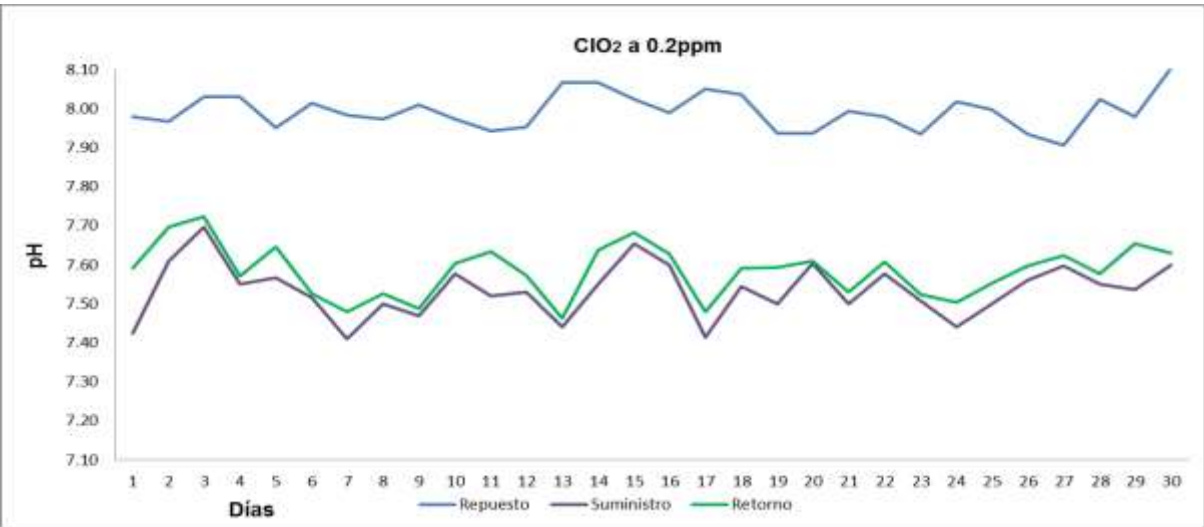


Figura 3.1 Medición de pH y conductividad eléctrica.

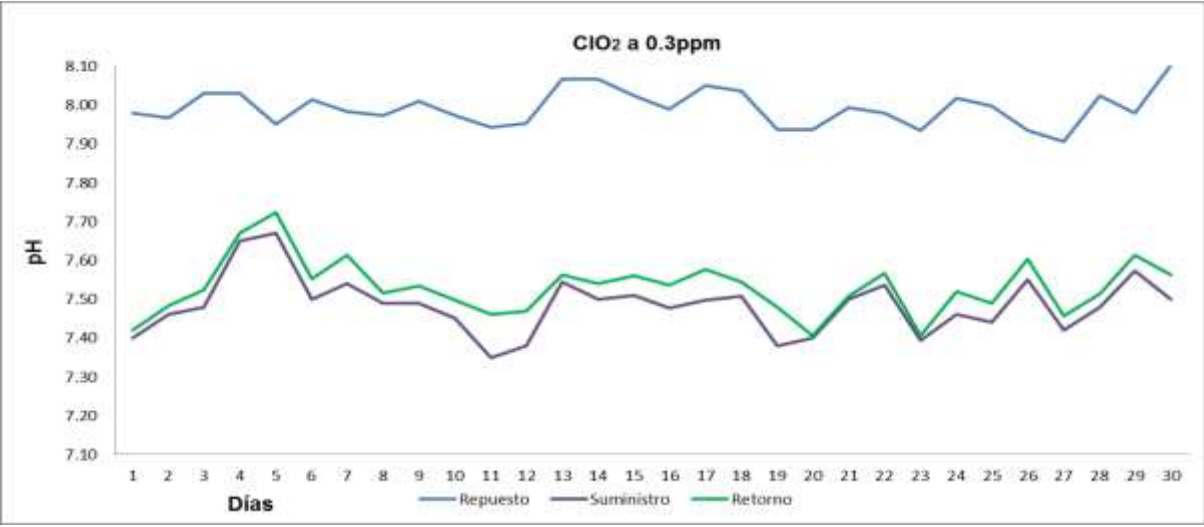


A diferentes concentraciones de dióxido de cloro nos permitió conocer el comportamiento del pH y de la conductividad eléctrica en el agua de enfriamiento de la torre de enfriamiento CT-2601 del Complejo Procesador de Gas Nuevo Pemex.

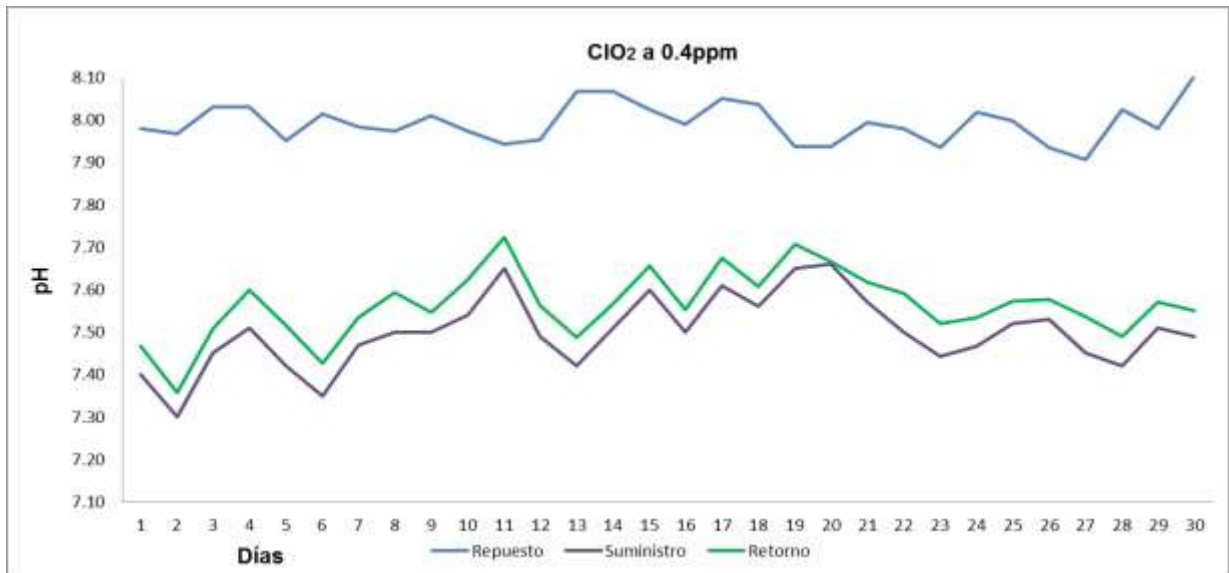
En las gráficas 3.1, 3.2 y 3.3 se muestran el comportamiento del pH en el agua de enfriamiento, del agua de suministro y retorno; así como la de repuesto que está ingresando a la torre de enfriamiento CT-2601, respecto a distintas dosificaciones de dióxido de cloro, las cuales comprenden de 0.2ppm, 0.3ppm y 0.4 ppm.



Gráfica 3.1 pH en el agua de repuesto, suministro y retorno expuesto a 0.2ppm de  $\text{ClO}_2$ .



Gráfica 3.2 pH en el agua de repuesto, suministro y retorno expuesto a 0.3ppm de  $\text{ClO}_2$ .



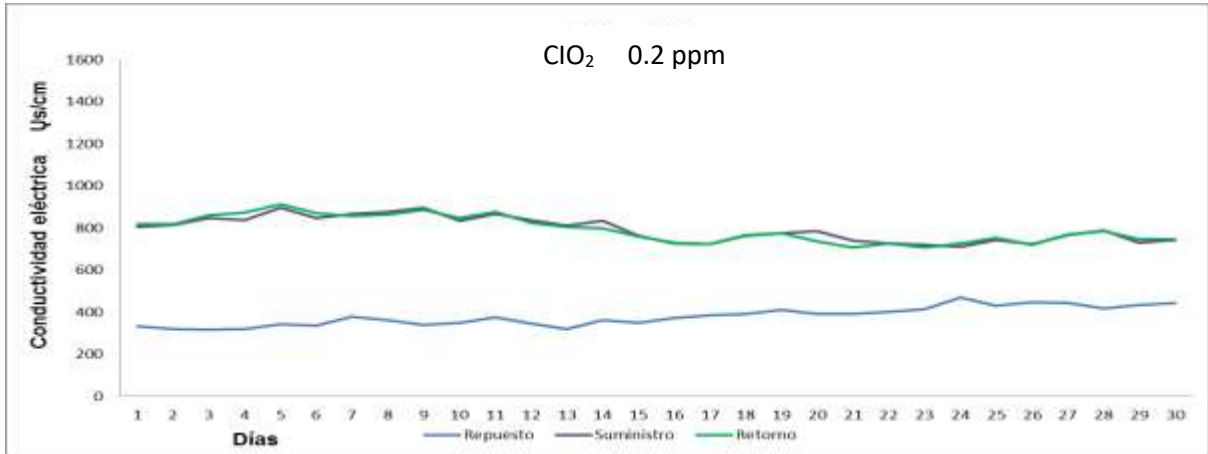
**Gráfica 3.3 pH en el agua de repuesto, suministro y retorno expuesto a 0.4ppm de ClO<sub>2</sub>.**

El dióxido de cloro es inyectado al agua del sistema de enfriamiento por un periodo de 8 horas.

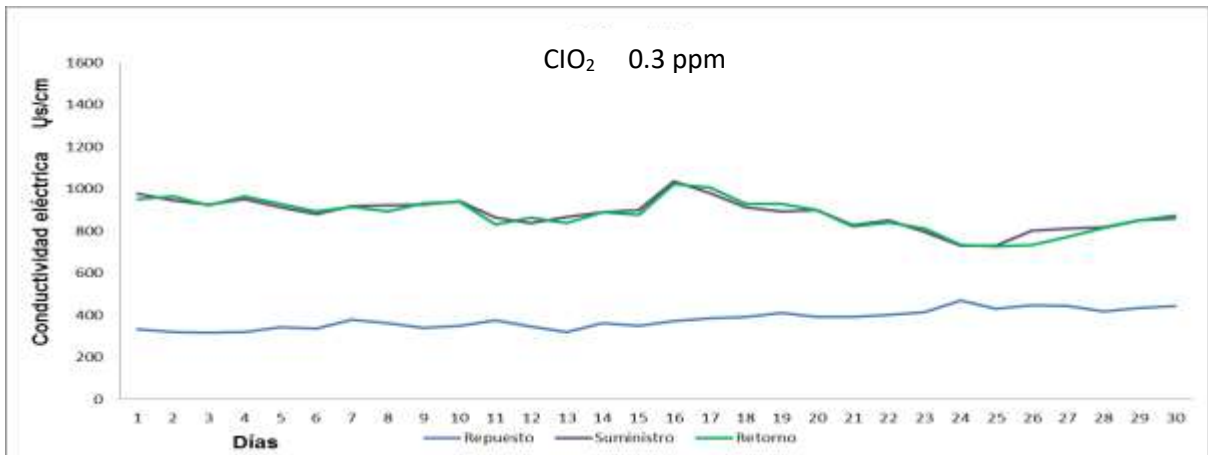
Conforme se va aumentando la dosificación de dióxido de cloro se va observando que el pH del agua de suministro y de retorno va disminuyendo debido a que el dióxido de cloro tiende a ser más ácido.

En las gráficas 3.4, 3.5 y 3.6 se muestran el comportamiento de la conductividad eléctrica en el agua de enfriamiento, se observa que el agua de repuesto en las tres gráficas se mantiene un promedio de 380  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , y conforme se va aumentando la concentración de dióxido de cloro; se va incrementando la conductividad eléctrica en el agua del sistema de enfriamiento, teniendo un promedio de 793  $\mu\text{s}/\text{cm}$  para el agua de suministro y retorno con una dosificación de 0.2ppm ClO<sub>2</sub>.

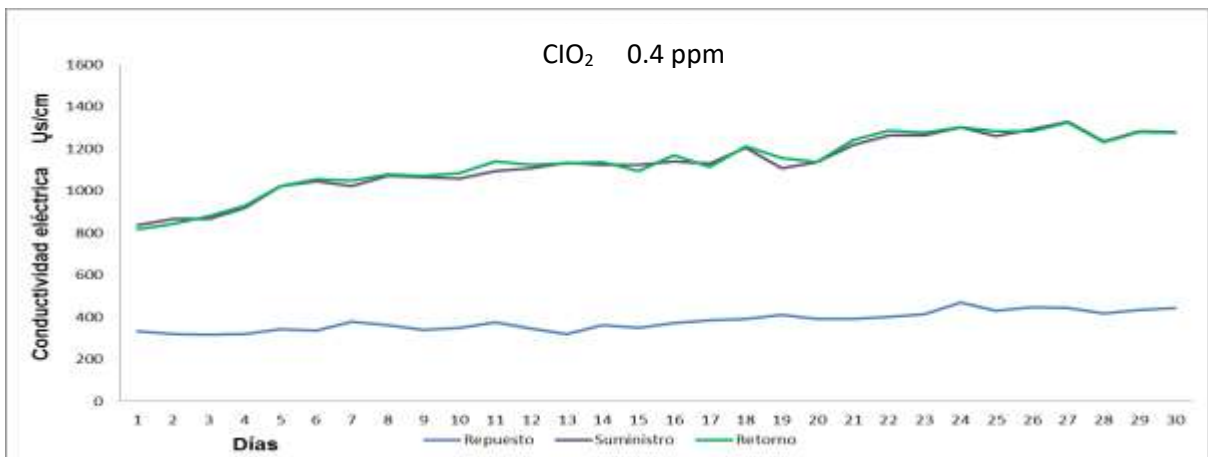
Para la dosificación de dióxido de cloro a 0.3ppm se tiene un promedio de conductividad eléctrica de 882  $\mu\text{s}/\text{cm}$  en el agua de suministro y 879  $\mu\text{s}/\text{cm}$  en el agua de retorno. Y por en la grafica 3.6 se tiene que el agua de suministro tiene un promedio de 1127  $\mu\text{s}/\text{cm}$  y de retorno de 1134  $\mu\text{s}/\text{cm}$  con una dosificación de dióxido de cloro en 0.4ppm.



Gráfica 3.4 Conductividad en el agua de repuesto, suministro y retorno a 0.2ppm de ClO<sub>2</sub>.



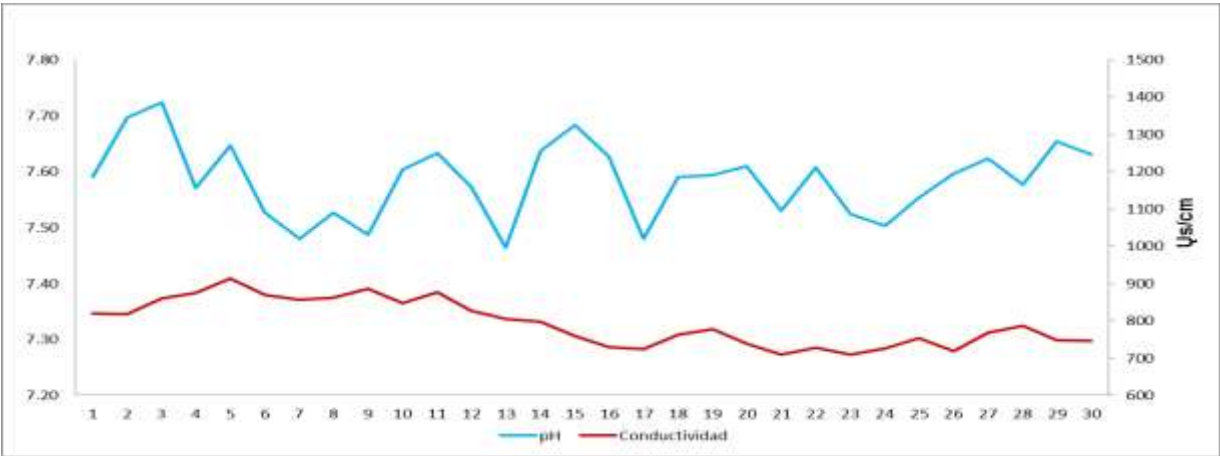
Gráfica 3.5 Conductividad en el agua de repuesto, suministro y retorno a 0.3ppm de ClO<sub>2</sub>.



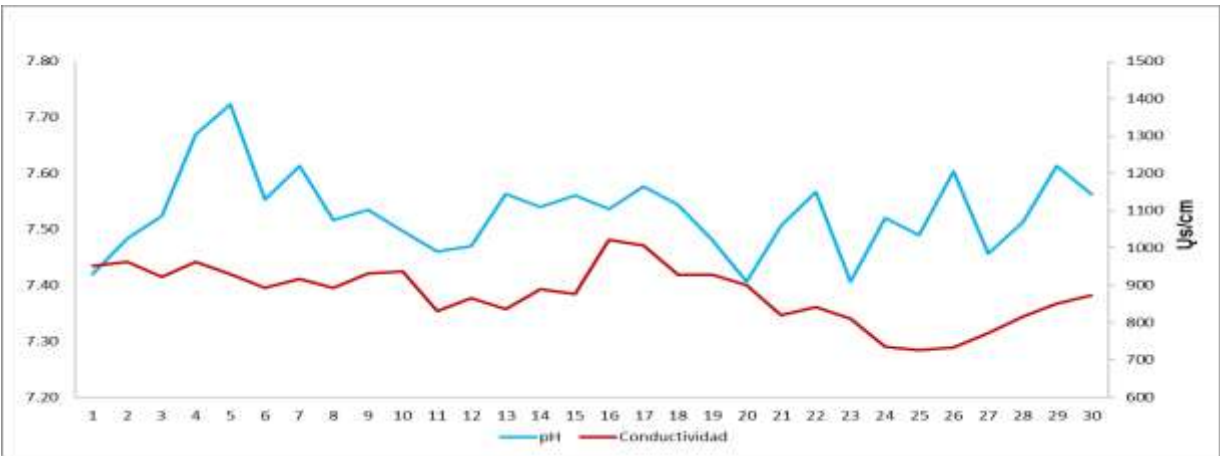
Gráfica 3.6 Conductividad en el agua de repuesto, suministro y retorno a 0.4ppm de ClO<sub>2</sub>.

La conductividad eléctrica es un valor muy importante debido a que esta nos determina la presencia de sales y minerales en la forma de iones electrolíticos, lo cual nos puede provocar incrustaciones en la Plantas de proceso; en especial los equipos de intercambiadores de calor.

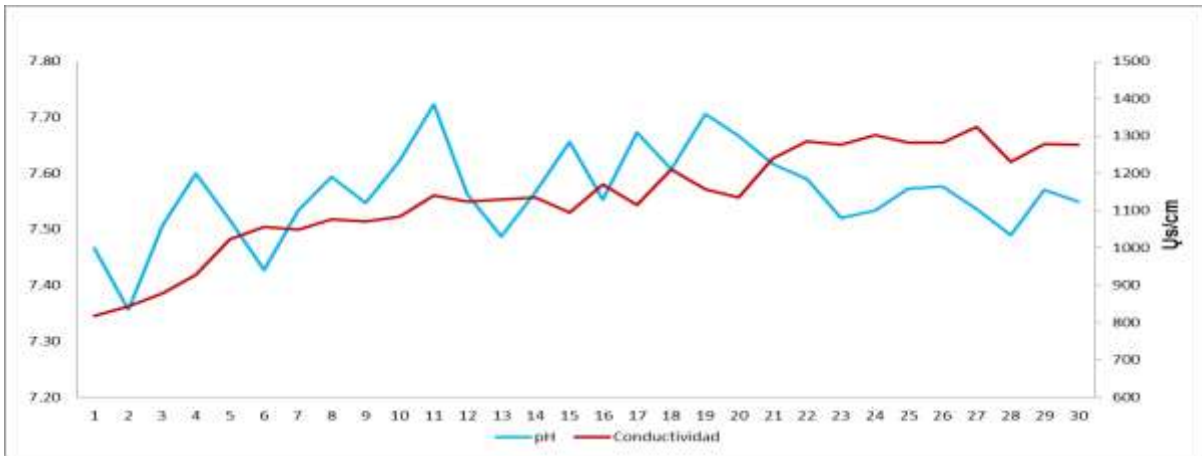
En las gráficas 3.7, 3.8 y 3.9 se muestran una comparativa entre el pH y la conductividad eléctrica en el agua de la torre de enfriamiento CT-2601 del Complejo Procesador de Gas Nuevo Pemex en base a las distintas concentraciones de dióxido de cloro, para la gráfica 3.7 se utilizó una concentración de 0.2ppm de ClO<sub>2</sub>, en la gráfica 3.8 fue de 0.3ppm de dióxido de cloro, y 0.4ppm de ClO<sub>2</sub> en la gráfica 3.9.



**Gráfica 3.7 pH vs Conductividad expuesto a 0.2ppm de ClO<sub>2</sub>.**



**Gráfica 3.8 pH vs Conductividad expuesto a 0.3ppm de ClO<sub>2</sub>.**



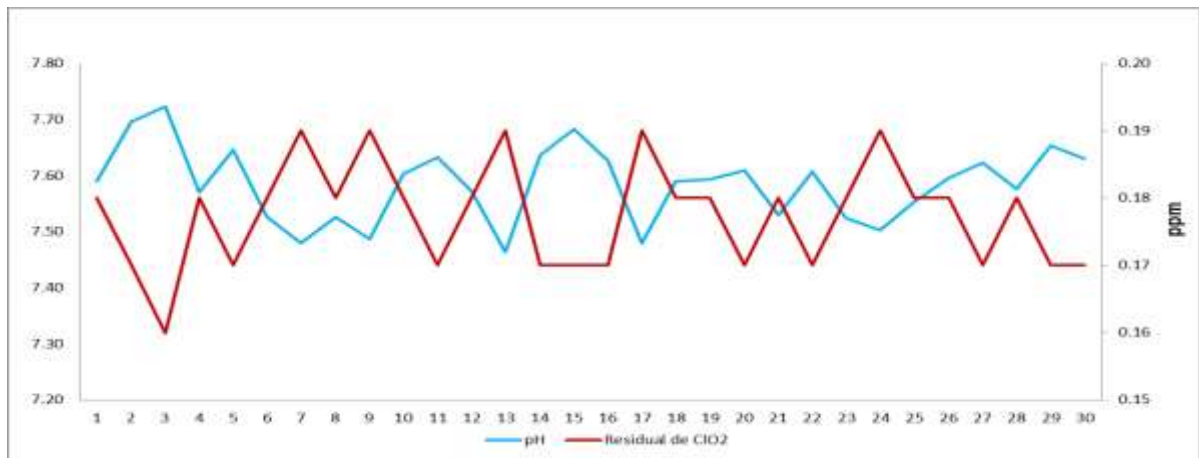
**Gráfica 3.9 pH vs Conductividad expuesto a 0.4ppm de ClO<sub>2</sub>.**

Esta comparativa se realiza solo en el agua de retorno, ya sea para el pH y la conductividad eléctrica, debido a que el agua de retorno es la que más interés por que es el agua que viene de regreso de las Plantas de proceso, por lo cuál se necesitó saber cuál era la condición en que regresaba.

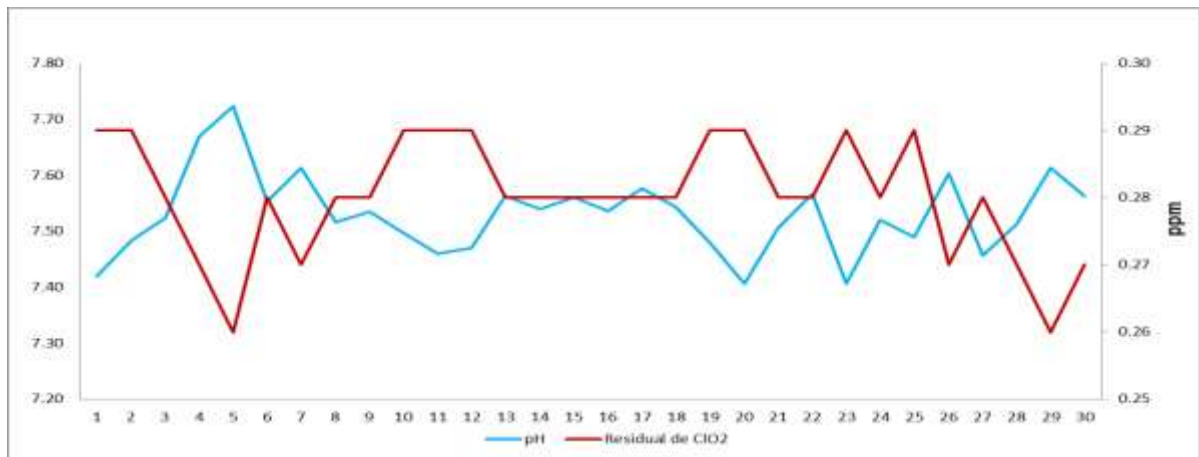
En las gráficas se puede observar que el pH tiene una tendencia a disminuirse mientras más concentración de dióxido de cloro se le aplicaba y a incrementarse en la conductividad eléctrica debido que tiende a tener más sales y minerales el sistema de enfriamiento.

En las gráficas 3.10, 3.11 y 3.12 se observa el comportamiento del pH respecto al residual de dióxido de cloro con cada una de las concentraciones aplicadas.

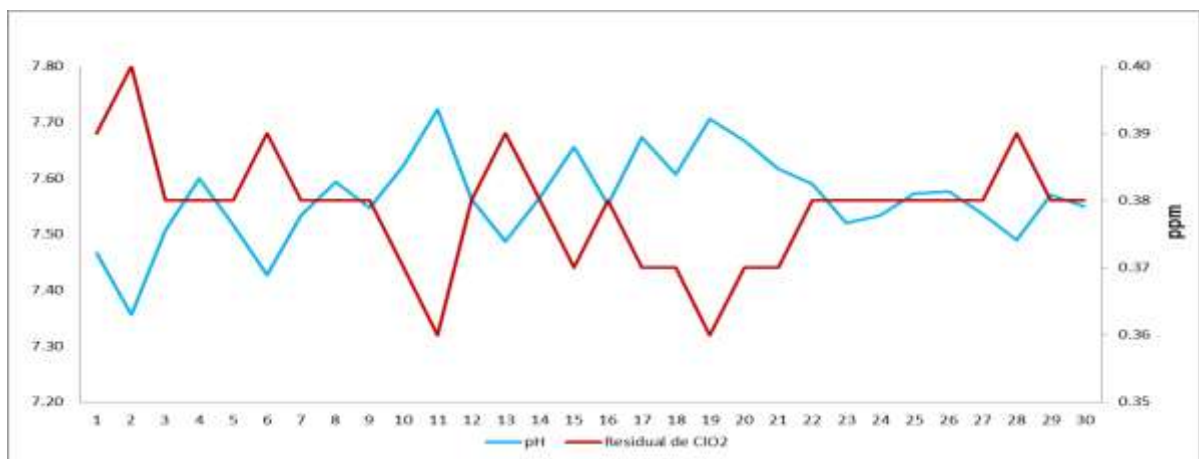
En las tres gráficas se observa que cuando el pH se incrementa, el residual de dióxido de cloro es menor, pero no es tan significativo en ninguna de las 3 gráficas por que lo que se suministra es prácticamente lo que regresa. Teniendo un promedio de 0.18ppm en la gráfica 3.10, 0.28ppm en la gráfica 3.11 y en la gráfica 3.12 de 0.38ppm.



**Gráfica 3.10 pH vs Residual de ClO<sub>2</sub> expuesto a 0.2ppm de ClO<sub>2</sub>.**



**Gráfica 3.11 pH vs Residual de ClO<sub>2</sub> expuesto a 0.3ppm de ClO<sub>2</sub>.**



**Gráfica 3.12 pH vs Residual de ClO<sub>2</sub> expuesto a 0.4ppm de ClO<sub>2</sub>.**

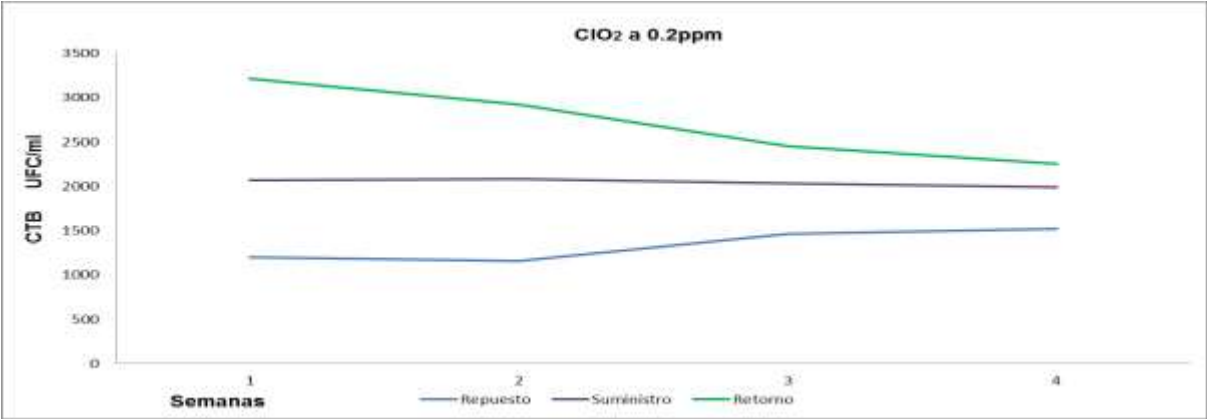
### 3.2 Cuenta total bacteriana expuesto a diferente ppm de ClO<sub>2</sub>.

Después de transcurrida las 48hrs a 35°C de la incubación, se procedió a contar todas las colonias desarrolladas en las placas seleccionadas, incluyendo las colonias puntiformes. En la figura 3.2 se muestra la incubación y conteo de las cajas Petri que desarrollaron colonias de microorganismos mesófilos aeróbicos.

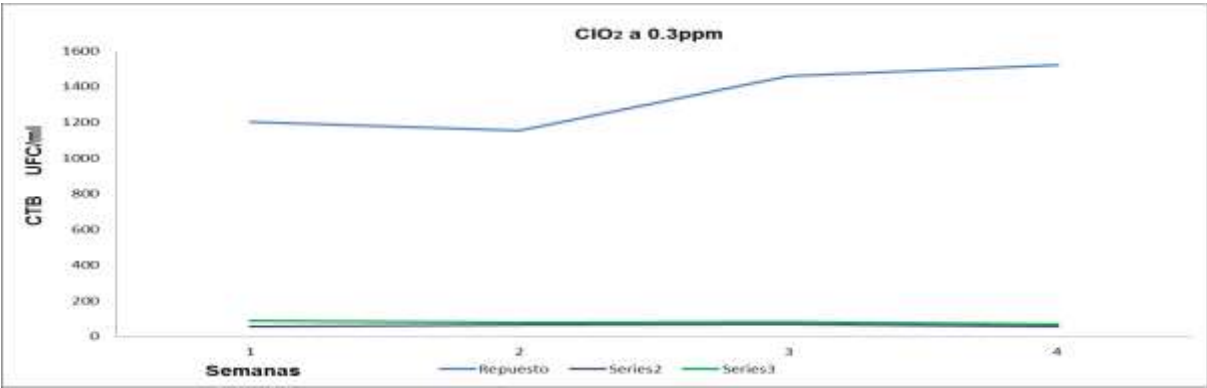


Figura 3.2 Conteo de microorganismos mesófilos aeróbicos.

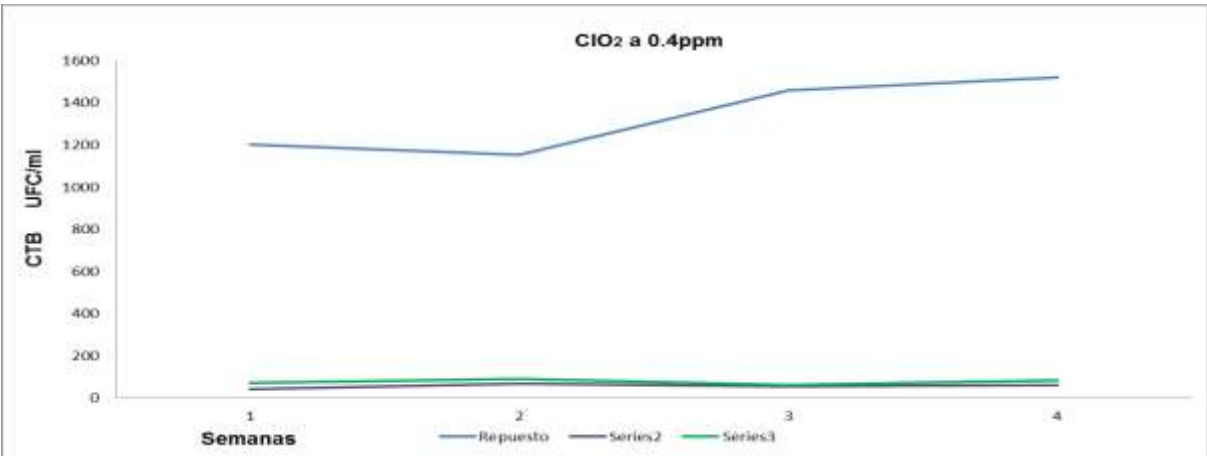
En las gráficas 3.13, 3.14 y 3.15 se muestran una comparativa entre la cuenta total bacteriana con respecto a la concentración de dióxido de cloro suministrada en el agua de enfriamiento de la torre de enfriamiento CT-2601 del Complejo Procesador de Gas Nuevo Pemex.



**Gráfica 3.13 Comportamiento de CTB expuesto a 0.2ppm de ClO<sub>2</sub>.**



**Gráfica 3.14 Comportamiento de CTB expuesto a 0.3ppm de ClO<sub>2</sub>.**



**Gráfica 3.15 Comportamiento de CTB expuesto a 0.4ppm de ClO<sub>2</sub>.**



Observándose que cuando se le suministro 0.2ppm de dióxido de cloro la cuenta total bacteriana no hubo una gran diferencia con respecto al conteo de colonias del agua de repuesto, mientras que cuando se le suministro 0.3ppm y 0.4ppm de dióxido de cloro, las unidades formadoras de colonias disminuyeron muy significativamente. Se puede observar que las gráficas 3.14 y 3.15 en el agua de suministro y de retorno presentan una tendencia casi igual en las líneas de las gráficas.

### 3.3 Bacterias sulfato reductoras expuesto a diferente ppm de ClO<sub>2</sub>.

Después de transcurrida las 48hrs a 35°C de la incubación, se procedió a contar todas las colonias desarrolladas en los tubos. En la figura 3.3 se muestra el conteo de los tubos; si es que se desarrollaron las bacterias sulfato reductoras con el medio de cultivo BTA previamente incubados. Si los tubos presentan la coloración del medio de cultivo BTA quiere decir que no hay presencia de bacterias sulfato reductoras; y si los tubos tienden a una coloración oscura o pigmentaciones oscuras quiere decir que si hay presencia de bacterias sulfato reductoras.

Se observo que no hubo presencia de bacterias sulfato reductoras en ninguna de las muestras tomadas (agua de retorno, agua de suministro y agua de repuesto).



Figura 3.3 Conteo de bacterias sulfato reductoras.

## CONCLUSIÓN

La motivación de realizar este proyecto fue la de demostrar que el dióxido de cloro en solución acuosa en el agua de enfriamiento de la torre CT-2601 del Complejo Procesador de Gas Nuevo Pemex es una mejor alternativa para la eliminación de microorganismos mesófilos aeróbicos; y así poder evitar el taponamiento en las Plantas de procesos de la industria, en especial en los equipos de intercambio de calor.

De acuerdo a los resultados de los análisis y caracterizaciones realizados por un periodo de 8 horas diarias durante 3 meses se concluye lo siguiente:

- Con forme se va aumentando la dosificación de dióxido de cloro se va observando que el pH del agua de suministro y de retorno va disminuyendo debido a que el dióxido de cloro tiende a ser más ácido.
- En el agua de repuesto se comporta con un promedio de 380  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , y conforme se va aumentando la concentración de dióxido de cloro; se va incrementando la conductividad eléctrica en el agua del sistema de enfriamiento.
- El pH en el agua de enfriamiento tiende a disminuir mientras más concentración de dióxido de cloro se le aplica y a incrementar en la conductividad eléctrica debido que aporta más sales y minerales al sistema de enfriamiento.
- El residual de dióxido de cloro con respecto al pH no es tan significativo, cuando el pH se incrementa, el residual de dióxido de cloro es menor, pero

prácticamente lo que ingresa es lo mismo que regresa de las Plantas de procesos.

- En la cuenta total bacteriana se observó que cuando se le suministro 0.2ppm de dióxido de cloro la cuenta total bacteriana no hubo una gran diferencia con respecto al conteo de colonias del agua de repuesto, mientras que cuando se le suministro 0.3ppm y 0.4ppm de dióxido de cloro, las unidades formadoras de colonias disminuyeron muy significativamente.
- Con respecto a la presencia de bacterias sulfato reductoras se observó que, en ninguna de las concentraciones de dióxido de cloro en el agua de enfriamiento, ni en el agua de repuesto hubo presencia de este tipo de bacterias.

Con lo cual se llega a la conclusión de que la concentración idónea de dióxido de cloro para mantener un pH optimo, una conductividad eléctrica con un promedio de 879  $\mu\text{s}/\text{cm}$  en el agua de retorno y las bacterias mesófilas aeróbicas con un promedio de 77 UFC/col, es la concentración de 0.3ppm de  $\text{ClO}_2$ . Debido a que con 0.4ppm se puede obtener los mismos resultados, pero se gastarían menos productos químicos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aieta, E.M. and Berg, J.D (1986). "A review of chlorine dioxide in drinking water treatment.". Water works assoc.; pag. 62-72.
- Diario Oficial de la Federación, 2014.
- Comisión Nacional del Agua, 2007.
- R.A. Deininger, A. Ancheta, A. Ziegler (2000). "Dióxido de cloro". Escuela de salud pública. The University of Michigan Ann Arbor, Michigan, EUA.
- Sistema de Servicios de Agua Potable, Drenaje y Alcantarillado de Puerto Vallarta. 2018.
- Casanova Moreno J.R., Baeza Rey, J.A. (2005). "Estudio integral del cloro en desinfectantes hospitalarios". Revista cubana de química, Vol. XVII, Núm. 1, pp. 43-51. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba.
- J.P. Zoffoli, B.A. Latorre, N. Daire, S. Viertel (2005). "Efectividad del dióxido de cloro, en función de la concentración, pH y tiempo de exposición en el control de Botrytis cinérea, Penicillium expansum y Rhizopus stolonifer. Facultad de agronomía e ingeniería forestal, departamento de fruticultura y enología. Pontificia Universidad Católica de Chile. Casilla 306-322. Santiago, Chile.
- Wilson (2005). "Efecto del gas ClO<sub>2</sub>", Texas, EUA.
- Comisión Nacional del Agua, 2017.

- Cowley, G. (2002). "Disinfection with chlorine dioxide". Publication of the sterling pulp chemicals, Toronto, EUA.
- Enrique Izquierdo (2010), "Métodos de desinfección del agua y su implicación en virus de la gripe". Facultad de medicina. Pontifica Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Olivieri, V.P. (2010). "Mode of action of chlorine dioxide on selected viruses". Water chlorination: environmental impact and health effects. Editor R. L. Jolley, Chelsea, England.
- Instituto del agua y medio ambiente, 2007.
- El productor, El periódico del campo. "El productor.com", 2018. Sector agropecuario ecuatoriano. Ecuador.
- Lenntech (2012). "Manual de tratamiento de aguas". Unidad Potabilización de Agua. 1era Edición. EUA.
- General Electric Betz (2014). "Manual de torres de enfriamiento". Potabilización de Agua. 4ta Edición. EUA.
- León Rodríguez F. M., Pérez Garrido C., Delgadillo G.G. (2013). "Tratamiento de aguas". Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, 2007.
- Organización Mundial de la Salud, 2018.

- NMX-AA-008-SCFI-2000. Análisis de agua. Determinación del pH – Método de prueba.
- NMX-AA-093-SCFI-2000. Análisis de agua. Determinación de la conductividad electrolítica – Método de prueba.
  
- NMX-AA-108-SCFI-2001. Calidad del agua. Determinación de cloro libre y cloro total – Método de prueba.
  
- Norma Oficial Mexicana, NOM-092-SSA1-1994. Método para la cuenta de bacterias aerobias en placas.
  
- ASTM-D-4412-84. Método para determinación de bacterias sulfato reductoras.

## ANEXOS

En las siguientes tablas se muestran los resultados de los análisis realizados al agua de enfriamiento de la torre CT-2601 del Complejo Procesador de Gas Nuevo Pemex. Los cuales incluyen pH, conductividad eléctrica y residual de ClO<sub>2</sub>.

Días	0.2ppm					
	pH		Conductividad		Residual de ClO <sub>2</sub>	
	Suministro	Retorno	Suministro	Retorno	Suministro	Retorno
1	7.42	7.59	806	819	0.20	0.18
2	7.61	7.70	816	817	0.20	0.17
3	7.70	7.72	846	859	0.20	0.16
4	7.55	7.57	838	874	0.20	0.18
5	7.57	7.65	896	913	0.20	0.17
6	7.52	7.53	847	870	0.20	0.18
7	7.41	7.48	866	856	0.20	0.19
8	7.50	7.53	876	862	0.20	0.18
9	7.47	7.49	896	886	0.20	0.19
10	7.58	7.60	834	847	0.20	0.18
11	7.52	7.63	866	877	0.20	0.17
12	7.53	7.57	838	826	0.20	0.18
13	7.44	7.46	810	804	0.20	0.19
14	7.55	7.64	833	798	0.20	0.17
15	7.65	7.68	762	759	0.20	0.17
16	7.60	7.63	727	729	0.20	0.17
17	7.41	7.48	722	723	0.20	0.19
18	7.54	7.59	765	762	0.20	0.18
19	7.50	7.59	775	777	0.20	0.18
20	7.60	7.61	784	738	0.20	0.17
21	7.50	7.53	739	709	0.20	0.18
22	7.58	7.61	727	727	0.20	0.17
23	7.51	7.52	722	709	0.20	0.18
24	7.44	7.50	710	727	0.20	0.19
25	7.50	7.55	742	754	0.20	0.18
26	7.56	7.60	723	719	0.20	0.18
27	7.60	7.62	767	768	0.20	0.17
28	7.55	7.58	787	786	0.20	0.18
29	7.54	7.65	730	747	0.20	0.17
30	7.60	7.63	742	746	0.20	0.17
<b>Promedio</b>	<b>7.53</b>	<b>7.58</b>	<b>793</b>	<b>793</b>	<b>0.20</b>	<b>0.18</b>



Días	0.3ppm					
	pH		Conductividad		Residual de ClO <sub>2</sub>	
	Suministro	Retorno	Suministro	Retorno	Suministro	Retorno
1	7.40	7.42	976	952	0.30	0.29
2	7.46	7.48	944	963	0.30	0.29
3	7.48	7.52	927	923	0.30	0.28
4	7.65	7.67	953	963	0.30	0.27
5	7.67	7.72	912	930	0.30	0.26
6	7.50	7.55	881	893	0.30	0.28
7	7.54	7.61	920	917	0.30	0.27
8	7.49	7.52	923	893	0.30	0.28
9	7.49	7.54	925	932	0.30	0.28
10	7.45	7.50	941	938	0.30	0.29
11	7.35	7.46	864	830	0.30	0.29
12	7.38	7.47	837	865	0.30	0.29
13	7.54	7.56	867	836	0.30	0.28
14	7.50	7.54	890	889	0.30	0.28
15	7.51	7.56	899	877	0.30	0.28
16	7.48	7.54	1037	1022	0.30	0.28
17	7.50	7.58	979	1007	0.30	0.28
18	7.51	7.54	911	927	0.30	0.28
19	7.38	7.48	893	928	0.30	0.29
20	7.40	7.41	900	901	0.30	0.29
21	7.50	7.51	828	820	0.30	0.28
22	7.54	7.57	851	842	0.30	0.28
23	7.39	7.41	795	811	0.30	0.29
24	7.46	7.52	730	735	0.30	0.28
25	7.44	7.49	729	726	0.30	0.29
26	7.55	7.60	801	734	0.30	0.27
27	7.42	7.46	811	772	0.30	0.28
28	7.48	7.51	819	816	0.30	0.27
29	7.57	7.61	849	851	0.30	0.26
30	7.50	7.56	860	872	0.30	0.27
<b>Promedio</b>	<b>7.48</b>	<b>7.53</b>	<b>882</b>	<b>879</b>	<b>0.30</b>	<b>0.28</b>

Días	0.4ppm					
	pH		Conductividad		Residual de ClO <sub>2</sub>	
	Suministro	Retorno	Suministro	Retorno	Suministro	Retorno
1	7.40	7.47	837	817	0.40	0.39
2	7.30	7.36	866	844	0.40	0.40
3	7.45	7.51	867	879	0.40	0.38
4	7.51	7.60	918	927	0.40	0.38
5	7.42	7.52	1023	1024	0.40	0.38
6	7.35	7.43	1045	1056	0.40	0.39
7	7.47	7.53	1023	1049	0.40	0.38
8	7.50	7.59	1072	1077	0.40	0.38
9	7.50	7.55	1066	1072	0.40	0.38
10	7.54	7.62	1058	1084	0.40	0.37
11	7.65	7.72	1094	1140	0.40	0.36
12	7.49	7.56	1109	1124	0.40	0.38
13	7.42	7.49	1135	1130	0.40	0.39
14	7.51	7.57	1122	1136	0.40	0.38
15	7.60	7.66	1125	1094	0.40	0.37
16	7.50	7.55	1140	1170	0.40	0.38
17	7.61	7.67	1130	1115	0.40	0.37
18	7.56	7.61	1206	1210	0.40	0.37
19	7.65	7.71	1108	1158	0.40	0.36
20	7.66	7.67	1137	1135	0.40	0.37
21	7.57	7.62	1219	1240	0.40	0.37
22	7.50	7.59	1265	1287	0.40	0.38
23	7.44	7.52	1262	1276	0.40	0.38
24	7.47	7.53	1301	1302	0.40	0.38
25	7.52	7.57	1259	1282	0.40	0.38
26	7.53	7.58	1293	1282	0.40	0.38
27	7.45	7.54	1330	1324	0.40	0.38
28	7.42	7.49	1233	1231	0.40	0.39
29	7.51	7.57	1283	1279	0.40	0.38
30	7.49	7.55	1279	1278	0.40	0.38
<b>Promedio</b>	<b>7.50</b>	<b>7.56</b>	<b>1127</b>	<b>1134</b>	<b>0.40</b>	<b>0.38</b>

En la siguiente tabla se muestra los resultados de los análisis realizados al agua de repuesto.

Agua de repuesto		
Días	pH	Conductividad
1	7.98	332
2	7.97	320
3	8.03	316
4	8.03	322
5	7.95	343
6	8.01	336
7	7.98	380
8	7.97	362
9	8.01	341
10	7.97	350
11	7.94	375
12	7.95	345
13	8.07	321
14	8.07	364
15	8.02	349
16	7.99	372
17	8.05	387
18	8.04	393
19	7.94	411
20	7.94	391
21	7.99	392
22	7.98	402
23	7.93	414
24	8.02	470
25	8.00	431
26	7.93	447
27	7.91	444
28	8.02	419
29	7.98	435
30	8.10	443
<b>Promedio</b>	<b>7.99</b>	<b>380</b>

En las siguientes tablas se muestran los resultados de los análisis de cuenta total bacteria; así como los de bacterias sulfato reductoras al agua de suministro, retorno y de repuesto en sus distintas concentraciones de dióxido de cloro.

0.2ppm				
Semanas	CTB		BSR	
	Suministro	Retorno	Suministro	Retorno
1	2070	3210	Ausencia	Ausencia
2	2080	2920	Ausencia	Ausencia
3	2029	2453	Ausencia	Ausencia
4	1987	2253	Ausencia	Ausencia
<b>Promedio</b>	<b>2042</b>	<b>2709</b>	<b>Ausencia</b>	<b>Ausencia</b>

0.3ppm				
Semanas	CTB		BSR	
	Suministro	Retorno	Suministro	Retorno
1	54	88	Ausencia	Ausencia
2	64	76	Ausencia	Ausencia
3	68	79	Ausencia	Ausencia
4	55	66	Ausencia	Ausencia
<b>Promedio</b>	<b>60</b>	<b>77</b>	<b>Ausencia</b>	<b>Ausencia</b>

0.4ppm				
Semanas	CTB		BSR	
	Suministro	Retorno	Suministro	Retorno
1	40	70	Ausencia	Ausencia
2	68	89	Ausencia	Ausencia
3	54	60	Ausencia	Ausencia
4	60	83	Ausencia	Ausencia
<b>Promedio</b>	<b>56</b>	<b>76</b>	<b>Ausencia</b>	<b>Ausencia</b>

Agua de repuesto		
Semanas	CTB	BSR
	Suministro	Suministro
1	1200	Ausencia
2	1153	Ausencia
3	1460	Ausencia
4	1520	Ausencia
<b>Promedio</b>	<b>1333</b>	<b>Ausencia</b>