

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

**FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA Y MANUFACTURERA**



**“DESARROLLO TECNOLÓGICO EN LA INDUSTRIA
CLORO – SODA”**

INFORME DE INGENIERÍA

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

POR LA MODALIDAD DE EXPERIENCIA PROFESIONAL

PRESENTADO POR:

JOSE ALBERTO VARILLAS BARRETO

LIMA – PERÚ

2003

**Con todo mi afecto,
mi más sincero agradecimiento
a mis queridos Padres
por el apoyo brindado.**

**Mi mayor gratitud a mis amigos
y compañeros de trabajo de la
Empresa Quimpac S.A.**

CONTENIDO

	Introducción	07
II	Quimpac S.A.	09
	2.1 Líneas de producción	10
	A. Planta Cloro Soda	10
	B. Planta de Fosfato Bicálcico	11
	C. Planta de Refinería de Sal	12
III	Experiencia profesional	13
IV	Industria del cloro	17
	4.1 Pasado y futuro	17
	4.2 Aspectos económicos	20
	Capacidad de producción de cloro	20
	Grafico	22
	4.3 Tecnologías de producción	23
	A. Celdas de amalgama	23
	Diagrama	25
	B. Celdas de membrana	27
	Diagrama	29
	C. Celdas de diafragma	31
	Diagrama	33
	4.4 Comparación de los procesos	34
	Tabla, grafico de producción de cloro según la tecnología	34-35
	A. Ventajas y desventajas	35
	B. Calidad de los productos	37
	Cloro gaseoso	37

	Soda cáustica	37
	Hidrógeno	39
	C. Costos de operación	39
	Tabla, grafico de consumo de energía según La tecnología	40
V	Descripción de la planta cloro soda	42
	5.1 Producción de soda cáustica, cloro e hidrógeno gaseoso	42
	A. Tratamiento del cloruro de sodio	42
	Grafico	48
	B. Electrólisis de la solución de cloruro de sodio	49
	Grafico	50
	C. Parámetros principales de operación de la celda electrolítica	51
	D. Descripción de los componentes de la celda electrolítica	57
	E. Anomalías en la operación de la celda electrolítica	61
	F. Anomalías en la operación del desamalgamador	64
	G. Productos de la electrólisis del cloruro de sodio	65
	H. Fundamento teórico	69
	5.2 Producción de cloro líquido	73
	A. Principales componentes del ciclo de refrigeración por compresión de vapor.	74
	B. Almacenamiento del cloro líquido.	79
	Tabla. Síntoma, causa y solución de las anomalías en la unidad de licuado	80
	C. Balance de materia y energía	86
	5.3 Producción de ácido clorhídrico	91
	Grafico	92
	A. Elementos de la unidad de síntesis	93

B.	Factores que afectan la absorción del cloruro de hidrógeno	96
C.	Mejoras en la unidad de síntesis	97
D.	Motivos de salida de servicio de la unidad	98
5.4	Producción de hipoclorito de sodio	99
	Grafico	100
A.	Estabilidad del hipoclorito de sodio	101
5.5	Servicios auxiliares en la Planta Cloro Soda	103
A.	Sistema de enfriamiento	103
B.	Agua industrial, blanda y desmineralizada	106
VI	Anexos	109
6.1	Productos terminados de la Planta Cloro Soda	
	Características, especificaciones técnicas y usos	
A.	Hidróxido de sodio al 50%	110
B.	Hidróxido de sodio al 97 - 98%	112
C.	Hipoclorito de sodio	114
D.	Ácido clorhídrico	117
E.	Cloro líquido	119
	Usos del cloro	121
6.2	Manipulación y transporte del cloro líquido	126
6.3	Propiedades termodinámicas del cloro	128
6.4	Propiedades termodinámicas del freón 22	133
6.5	Consumo unitario en la producción de cloro gaseoso	139
6.6	Tabla. Principales usos de los productos	140
	De la planta cloro - soda	
VII	Glosario	141
VIII	Bibliografía	143

INTRODUCCION

El propósito principal del informe de ingeniería es describir nuestra experiencia en el campo de la ingeniería, adquirida a lo largo de 8 años de trabajo en la empresa Quimpac S.A.

La experiencia en mención ha tenido como base nuestro contacto permanente con una de las grandes tecnologías de producción del cloro gaseoso, cuyo proceso se lleva a cabo a partir de la electrólisis de la solución del cloruro de sodio. Por tanto, el presente trabajo, que da cuenta de nuestra labor, entendida ésta como un intercambio de aportes y de conocimientos entre la empresa y nosotros, se propone cubrir con gran detalle las operaciones y procesos unitarios que se desarrollan en una típica planta cloro – soda.

En el capítulo 2, por ejemplo, destinado a la presentación de Quimpac, se describen los principales productos y plantas de producción, mientras que en el capítulo 3 se habla de la experiencia profesional, puntualizando los conocimientos adquiridos en las diferentes áreas y secciones de la planta química.

Con la finalidad de establecer un marco histórico y económico, en el capítulo 4 se ha incluido una reseña histórica de los 100 años de existencia de la industria cloro - soda, demostrándose su futuro prometedor gracias a sus constantes innovaciones. Asimismo, se resalta la importancia económica de esta industria en los países desarrollados, y se hace una descripción detallada y comparativa de las tres tecnologías de producción de cloro gaseoso vigentes en la actualidad.

En el capítulo 5 se describe las operaciones y procesos unitarios que se llevan a cabo en una planta cloro – soda y que dan lugar a los productos

que ya conocemos: cloro e hidrógeno gaseosos, soda cáustica, cloro líquido, ácido clorhídrico e hipoclorito de sodio. Además, se indican los principales parámetros de operación, los motivos de salida de servicio de las unidades del proceso, sus dispositivos de seguridad, y se concluye este capítulo con una descripción de los principales componentes de las unidades citadas.

En el capítulo 6, dedicado a los anexos, se brinda una información básica relativa a las características físicas y químicas, especificaciones técnicas y usos de la soda cáustica, hipoclorito de sodio, ácido clorhídrico y cloro líquido. Pero, también, por la vital trascendencia e imposibilidad de la sustitución del cloro elemental en la industria del presente, se describe sus principales aplicaciones con sus respectivas reacciones químicas.

Muchas de las aplicaciones señaladas se llevan a cabo en países de economías más desarrolladas, especialmente en aquellas donde la petroquímica ha logrado un despegue extraordinario. En el Perú, el campo de aplicación de la soda y del cloro es más reducido, sin embargo, con la llegada del gas de Camisea, los cambios fundamentales en nuestra industria y economía, están por empezar.

Estos cambios a los que aludimos en el párrafo precedente, tocarán directamente a la industria cloro - soda, la cual en tal coyuntura deberá cumplir un papel de primera magnitud, proporcionando los elementos claves para el desarrollo de nuevos productos y apertura de nuevas oportunidades. El efecto multiplicador que de allí se genere en el campo de la economía, así como en lo laboral y en lo social, deben pasar a convertirse, con una adecuada y prudente administración, en los soportes básicos para el desarrollo de la industria nacional y del país.

II QUIMPAC S.A.

R.U.C. N° 20330791501

Dirección: Avenida Néstor Gambeta N° 8585, Carretera a Ventanilla, Lima, Perú

Quimpac S.A. es una empresa industrial dedicada a la producción de sal industrial y de consumo humano, soda cáustica, cloro líquido, hipoclorito de sodio, ácido clorhídrico, fosfato bicálcico, cloruro férrico, etc.

Desde el inicio de sus operaciones **Quimpac S.A.** ha tenido una serie de ampliaciones de capacidad, ha desarrollado nuevos productos, y ha llevado adelante proyectos destinados al reemplazo de equipos y/o tecnología.

En la planta Cloro - Soda se utiliza la tecnología de las **celdas de amalgama** suministrada por la empresa italiana **De Nora**.

La planta Cloro - Soda inició sus operaciones con celdas de amalgama, que operaban con ánodos de grafito, los cuales fueron reemplazados tiempo después por los ánodos de titanio. Junto a los ánodos de titanio se instaló un sistema de protección de ánodos y control automático de voltaje. A consecuencia de ello, el consumo específico de energía, es decir los kW.h por tonelada de cloro disminuyó de manera importante.

Con la finalidad de mejorar la **calidad de los productos** existen los filtros tipo vela en la línea de producción de soda, y los filtros de carbón en la línea de producción de hidrógeno. Con estos filtros, los productos de Quimpac, soda cáustica, ácido clorhídrico y derivados, se ajustan a las especificaciones exigidas por el mercado local e internacional.

Con la intención de preservar la salud del **medio ambiente**, las unidades de síntesis de ácido clorhídrico disponen de torres de cola de última generación. Asimismo, se están ejecutando proyectos de mejoras en los procesos químicos, cuyo objetivo es reforzar los actuales sistemas de control y seguridad que Quimpac ha puesto en marcha para cuidar la ecología.

A la fecha, el personal del área de control de calidad viene asistiendo a charlas de capacitación acerca de **ISO - 9000** de implementación en el corto plazo.

2.1 LÍNEAS DE PRODUCCIÓN

A. PLANTA CLORO – SODA

La planta Cloro - Soda tiene como objetivo la elaboración de soda cáustica líquida y cloro gaseoso como productos principales. El proceso utilizado es la electrólisis de la solución de cloruro de sodio en agua, proceso que se realiza, previo acondicionamiento de la salmuera, mediante la tecnología de las celdas de mercurio.

La sal utilizada proviene de las salinas de Huacho y Otuma. Esta sal se disuelve en agua (salmuera) en las unidades de saturación. El tratamiento químico de la salmuera con carbonato de sodio y soda cáustica permite eliminar las impurezas indeseables en el proceso: calcio, magnesio y hierro, principalmente. Este tratamiento tiene como complemento las operaciones de floculación, decantación y filtrado. Posterior a la electrólisis, se realiza la decloración de la salmuera. Este es un paso previo al retorno de la salmuera a los saturadores, donde se reinicia el proceso.

La electrólisis, a su vez, se lleva a cabo en 32 unidades electrolíticas dispuestas en serie. La energía eléctrica es alimentada a través de cinco grupos Transformadores - Rectificadores 10 kV/171 V que proporcionan una corriente continua nominal de 120 kA.

Productos principales y derivados

La soda cáustica líquida obtenida tiene una concentración de 50 %, con la cual es comercializada. En proceso posterior de evaporación del agua contenida obtiene la soda sólida 98%, cuya presentación se realiza en plaquetas o bloques y en escamas, de acuerdo a la demanda del mercado.

Por su parte, el cloro gaseoso producido es sometido a las operaciones de enfriamiento, secado y compresión. Una parte de este cloro gaseoso tratado es enviado a la Planta de Licuefacción de Cloro donde se obtiene el cloro líquido. La otra parte es derivada hacia las Unidades de Síntesis de ácido clorhídrico, donde se obtiene una solución al 33 % en peso de ácido clorhídrico a partir de la combustión del cloro e hidrógeno gaseosos.

El hipoclorito de sodio es un producto que se obtiene utilizando cloro gas con alto contenido de aire. Este cloro se recupera de la salmuera que sale de celdas mediante la inyección de aire. La concentración del hipoclorito de sodio es 10%.

B. PLANTA DE FOSFATO BICÁLCICO

Como su nombre lo dice, en esta planta se produce el fosfato bicálcico dihidratado.

El proceso utilizado es la disolución de la roca fosfórica con ácido clorhídrico con la finalidad de obtener el licor monocálcico. Este licor se lava y, posteriormente, se le adiciona carbonato de calcio de donde resulta el lodo de fosfato bicálcico. La solución se filtra y seca en un horno rotatorio a temperatura moderada obteniéndose el fosfato bicálcico dihidratado.

La roca fosfórica puede ser nacional o importada, en tanto que el ácido clorhídrico proviene de la planta Cloro - Soda.

Producto principal

El fosfato bicálcico obtenido tiene una concentración de 18 % con el cual es comercializado.

C. PLANTA DE REFINERIA DE SAL

La Planta de Refinería de Sal tiene como objetivo la elaboración de sal en sus diferentes presentaciones ya sea como sal de consumo humano o de consumo industrial.

La sal utilizada proviene de las salinas de Huacho y/o Otuma. Esta sal es sometida a las operaciones de lavado, tamizado, molienda, secado y envasado, previa adición de reactivos (flúor, yodo, etc.) según el tipo de sal.

Productos principales

La sal es comercializada como sal de mesa, cocina, industrial y deshielo.

III. EXPERIENCIA PROFESIONAL

Empresa: Quimpac S.A.

Periodo: 09 de mayo de 1997 a la fecha

Cargo: Ingeniero de Proyectos

RELACIÓN PROFESIONAL – EMPLEADOR

El suscrito labora en la Organización Irun S.A. y brinda sus servicios en la empresa Quimpac S.A.

En la siguiente página se presenta la constancia de trabajo con el cargo de Ingeniero de Proyectos.

Durante las labores realizadas en Quimpac S.A. se puede destacar los conocimientos adquiridos en las siguientes unidades de proceso:

Producción de cloro

Tecnologías de producción de cloro a partir de la electrólisis de la disolución de cloruro de sodio.

Importancia del cloro en la industria.

Tratamiento de la sal

Importancia del pH de la solución en el tratamiento y electrólisis del cloruro de sodio.

Licuado de cloro

Principios de operación, anomalías, posibles causas y soluciones de un ciclo termodinámico de refrigeración por compresión de vapor.

Secado del cloro

Principios de transferencia de masa y calor.

Sistema de enfriamiento de cloro

Principios de transferencia de calor y cantidad de movimiento.

Unidades de síntesis de ácido clorhídrico

Principios de combustión, absorción, sistema de seguridad y salida de servicio de la unidad.

Hipoclorito de sodio

Importancia de la temperatura en las reacciones exotérmicas.

Los conocimientos mencionados nos han permitido lo siguiente:

- a. Supervisar las operaciones y procesos unitarios que se desarrollan en la Planta Cloro - Soda.
- b. Coordinar las labores de mantenimiento y las operaciones de parada o puesta en servicio de las unidades de proceso.
- c. Evaluar proyectos de inversión, desarrollando estudios de mercado y accediendo a la información última sobre las tecnologías disponibles y su impacto ambiental.
- d. Evaluar la eficiencia de unidades de proceso, reconociendo los principios de operación, revisando sus parámetros de diseño y verificando de manera práctica los parámetros de operación.

IV. INDUSTRIA DEL CLORO

4.1 PASADO Y FUTURO

Los primeros cien años de producción de cloro mediante la electrólisis se caracteriza por las diferentes innovaciones en la tecnología. En los primeros treinta años se desarrolló diferentes componentes y arreglos de las celdas electrolíticas de amalgama y diafragma.

Los materiales resistentes al cloro húmedo tales como el hierro ebonitado, polímeros clorados (PVC, PVDC) poliéster PTFE y titanio se desarrollaron a partir de la cerámica, vidrio, *plumbum* y *stoneware* que tenían resistencia limitada y eran difíciles de reparar. Los ánodos fueron de magnetita, grafito *acheson*, *sintered graphited* y, finalmente, titanio revestido con diferentes óxidos.

La industria del cloro se consolidó alrededor de 1930 incrementando rápidamente su producción. La producción de cloro fue un indicador confiable del desarrollo y capacidad de la industria química de un país. Además, el cloro y la soda cáustica llegaron a ser importantes materias primas.

A medida que la industria se afianzaba se desarrolló procedimientos analíticos, especificaciones técnicas, nuevos productos e implementos de seguridad en la manipulación del cloro y sus derivados.

En 1960 la población en general criticó a la industria química en general, y a la del cloro en particular, debido a los incidentes como el de Seveso y Minamata, así como también por los efectos de la reducción de la capa de

ozono, el DDT y las propiedades cancerígenas de muchos compuestos órgano-clorados.

Con la finalidad de revertir las críticas de las organizaciones que protegen el medio ambiente la industria del cloro realizó diversas innovaciones, entre ellas la introducción de diafragmas sin asbesto o con bajo contenido del mismo así como la reducción del contenido de mercurio en los productos y efluentes.

La industria del cloro tiene una tradición de mutua cooperación en materia de seguridad y protección al medio ambiente. De allí que la mejora en los procesos fuera aceptada a nivel internacional. En Europa the *Bureau International Technique du Chlore* (BIT) fue establecido en 1954, y en 1989 cambió de nombre a *Euro Chlor*. En 1991 *Euro Chlor* agrupa a varias asociaciones relacionadas a las parafinas y solventes derivados del cloro. Finalmente, se afilió al *Chlorine Institute* y al *Chlorine Chemistry Council* (CIFIC). En Estados Unidos los trabajos se coordinan con el Instituto del Cloro y con el consejo de la industria química.

La protección del medio ambiente se realiza mediante diversos organismos que promulgan una serie de leyes con una finalidad específica. Además, la comisión europea publica directivas que deberán ser cumplidas por los países europeos y las Naciones Unidas. Simultáneamente se desarrolla un programa de protección ambiental a través de la Comisión Económica Europea de las Naciones Unidas.

La industria Cloro - Soda en América del sur, particularmente en Brasil, cumple con las regulaciones ambientales. En tanto que en el Perú se están realizando grandes inversiones con la finalidad de conservar el medio ambiente.

Al finalizar el siglo 20 se ha logrado muchas mejoras en la industria y regulación del medio ambiente. Los progresos son demostrados por los siguientes hechos:

- La producción y uso de persistentes contaminantes orgánicos (POPs, *persistent organic pollutants*) tales como el aldrin, DDT, y otros se ha reducido.
- La producción y uso de diferentes compuestos químicos, como el tetracloruro de carbono, freón (CFCs), bifenilos clorados y el uso de cloro elemental en la industria de la pulpa y papel se ha reducido en forma significativa.
- La emisión de mercurio y asbesto se ha reducido a un nivel aceptable.
- La combustión de residuos clorados se ha detenido.
- La seguridad en las plantas químicas y transporte de cloro se ha mejorado en forma significativa.
- En las nuevas plantas de membrana, la producción de cloro es posible sin la emisión de mercurio o asbesto con una significativa reducción en el consumo de energía eléctrica.

En el futuro, la industria del cloro será aceptada por los grupos de protección del medio ambiente y las personas en general porque sus productos son esenciales en el estilo de vida moderna. Los productos son ampliamente utilizados en la construcción, industria automotriz, farmacéutica, tratamiento del agua, y en otras áreas. En la actualidad es difícil encontrar materiales alternativos a ser utilizados en estas industrias. El futuro de la industria del cloro es, sin duda alguna, suministrar materia prima esencial a otras industrias.

4.2 ASPECTOS ECONÓMICOS

La importancia económica de la industria del cloro se aprecia en países desarrollados como Estados Unidos, Canadá y Europa del Este.

En **Estados Unidos y Canadá**, el Instituto del cloro en 1990 estimó lo siguiente:

- El valor de las ventas de la industria del cloro es 80 billones de dólares.
- El beneficio global de los consumidores de la industria del cloro es alrededor de 120 billones de dólares.
- Alrededor de 1.4 millones de empleos se encuentran relacionados directa o indirectamente a la industria del cloro.

En Europa del Este en 1995 el panorama fue el siguiente:

- Alrededor de 2 millones de empleos están relacionados a la industria del cloro.
- El 55% de la industria depende del cloro.
- El 85% de los fármacos contiene cloro.
- El 98% del agua potable es tratada con cloro.

Capacidad de producción

Los principales países que exportan cloro o derivados del cloro son Estados Unidos (a América del Sur, Sureste de Asia), Rusia (a Europa Occidental), Europa Occidental (a China, Sureste de Asia) y el Medio Oriente Asiático (a China, Japón).

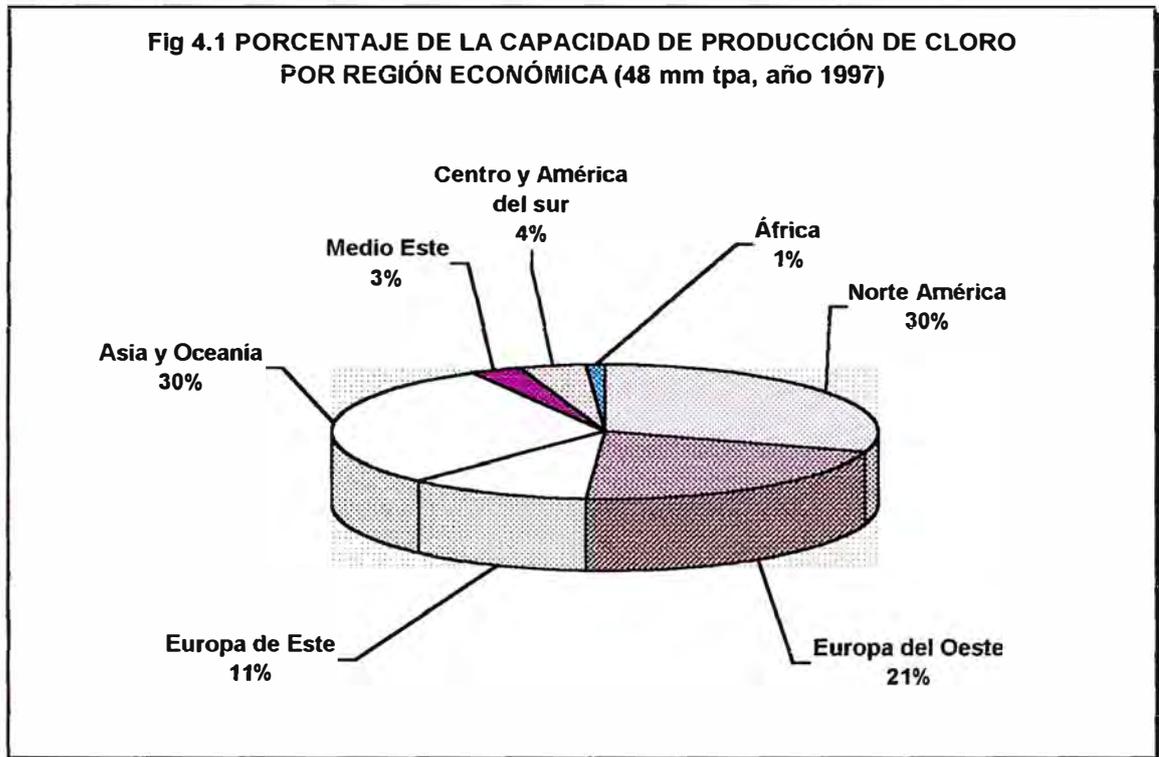
Tabla 4.1 Capacidad de producción de cloro el año 1995

Capacidad instalada de producción de los principales
países productores de cloro:

Miles de toneladas por año (mtpa)

País	mtpa
Estados Unidos	11860
Japón	4250
Unión Soviética	3800
China	3750
Alemania	3690
Brasil	1660
Canadá	1630
Francia	1580
Reino Unido	1270
India	1230
Italia	1130
...	...
Perú	95

En 1997, la capacidad de producción de cloro por regiones se observa en el siguiente cuadro:



El costo de producción de una unidad electroquímica (ECU) depende en gran medida del precio de electricidad y ésta es del orden del 60 al 80%.

La predicción del precio del cloro y soda es difícil; uno de los motivos, es que el cloro es usado en el lugar de producción para evitar el transporte, y la soda es vendida mediante un contrato de 6 a 12 meses. La comercialización de cloro sin contrato es mínima.

En el proceso electrolítico, la producción conjunta de cloro y soda es inevitable. Una alta demanda de cloro crea un exceso de soda ocasionando la elevación de los precios del cloro y la caída de precios de la soda cáustica. Una demanda baja de cloro reduce la oferta de soda generando un incremento de precios en la soda y reducción en el cloro. Esta situación es cíclica y se repite cada 6 u 8 años.

El 85% del cloro es comercializado como EDC (dicloro etano), VCM (monómero de cloruro de vinilo), PVC (policloruro de vinilo) El resto como solventes clorados, para tratamiento de agua y diversas industrias químicas cuya materia prima principal es el cloro.

4.3 TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN

A. CELDAS DE AMALGAMA

La tecnología de las celdas de amalgama fue una de las primeras en ser desarrolladas. Se inició en 1892 con la finalidad de producir cloro gaseoso a partir de un proceso electrolítico. La tecnología de las celdas de amalgama tuvo rápido crecimiento hacia 1930, debido al apogeo de la industria del rayón (seda artificial) que requería soda cáustica libre de cloro.

Tabla 4.2 Evolución en la corriente de operación de las celdas de amalgama.

Año	Carga (kA)	Densidad de corriente (kA/m²)	Área del piso (m²)
1895	3.4		
1945	30		
1950		2	7
1960	200		
1970	450	15	37.5

A partir de 1945 el incremento de amperaje de operación en las celdas es posible debido al desarrollo de los rectificadores que son más eficientes y económicos operando a alto amperaje y bajo voltaje.

A partir de 1972 la legislación ambiental obligó a los productores de la industria cloro soda a introducir mejoras en sus procesos. Ello ha permitido que esta tecnología continúe vigente aun cuando se ha avanzado en el desarrollo de tecnologías alternativas.

La conversión a procesos alternativos no ha sido inmediata debido a la demanda de soda cáustica con bajo contenido de cloruro de sodio y, también, por el desarrollo de la tecnología de las celdas de membrana.

En Europa y Estados Unidos se han realizado innovaciones tecnológicas para reducir de manera sustancial las emisiones de mercurio hacia la atmósfera y dentro del agua residual. De tal manera que hoy en día la emisión de mercurio en esta tecnología es inferior al mercurio originado por causas naturales (acción volcánica, erosión geológica) o artificiales (combustión de combustibles, procesos metalúrgicos)

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

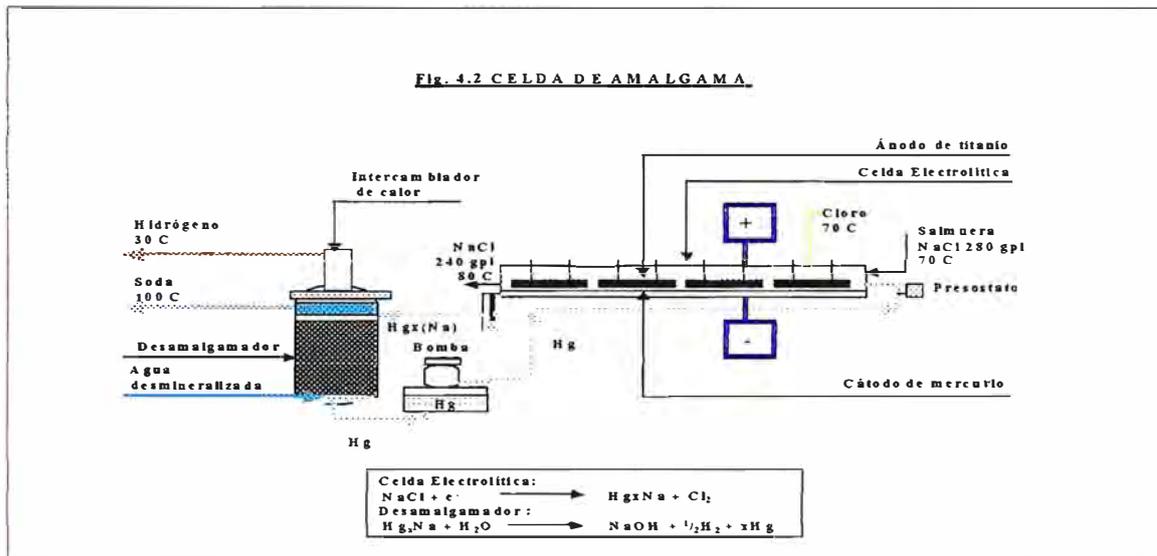
La salmuera concentrada y caliente se alimenta a la celda de amalgama donde es electrolizada entre los ánodos y el cátodo de mercurio, que fluye sobre el fondo de la celda. Los flujos de mercurio y salmuera van en paralelo. Las celdas electrolíticas se encuentran distribuidas en serie con respecto al paso de la corriente. En los ánodos se produce el cloro gaseoso mientras que en el cátodo la amalgama de sodio.

La amalgama de sodio fluye por gravedad de la celda hacia el desamalgamador donde reacciona con el agua desmineralizada para producir soda cáustica e hidrógeno. De la parte inferior del desamalgamador, el mercurio es alimentado a la celda electrolítica por acción de una bomba.

ELEMENTOS PRINCIPALES

La celda electrolítica para la producción de cloro, soda cáustica e hidrógeno consta de tres elementos principales interconectadas entre sí, los cuales son:

- La celda de electrólisis.
- El desamalgamador.
- La bomba centrífuga.

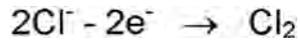


Celda de electrólisis

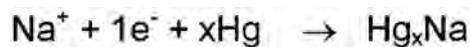
La celda electrolítica está constituida por el ánodo y el cátodo. Los ánodos son de titanio, los cuales tienen un revestimiento de óxido de iridio y rutenio, en tanto que el cátodo que es de mercurio circula sobre una superficie de hierro.

La celda electrolítica se alimenta con una disolución de cloruro de sodio y corriente continua. Por acción de la corriente se produce la electrólisis del cloruro de sodio obteniéndose el cloro gaseoso y la amalgama de sodio:

- a. En el ánodo de titanio el cloro gaseoso se produce según:



- b. En el cátodo de mercurio la amalgama de sodio (Hg_xNa) se produce según:



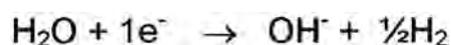
El desamalgamador

El desamalgamador consta de una canasta de acero rellena con terrones de grafito activado. El desamalgamador es una pila en cortocircuito debido a que el cátodo (grafito) se encuentra en contacto con el ánodo (amalgama de sodio).

La amalgama que se forma en la celda electrolítica fluye por gravedad hacia el desamalgamador, ingresando a éste por la parte superior; en contacto con el grafito pierde un electrón y forma el ion sodio. En el ánodo se produce la descomposición de la amalgama de sodio (Hg_xNa) según:



El agua desmineralizada ingresa al desamalgamador por la parte inferior, en contacto con el grafito gana un electrón y forma el ion oxidrilo e hidrógeno gaseoso. En el cátodo se produce la descomposición del agua según:



La soda cáustica se obtiene a consecuencia de la unión del ion sodio y oxidrilo. El flujo de agua desmineralizada se regula con la finalidad de obtener soda cáustica al 50% de concentración.

La energía producida en el desamalgamador no se recupera porque el ánodo (amalgama de sodio) al estar en contacto con el cátodo (grafito) forma una pila en cortocircuito, dicho cortocircuito ocasiona que la energía electroquímica que tiene la amalgama se transforme en energía térmica. Lo anterior se aprecia porque la producción de hidrógeno y soda cáustica en el desamalgamador es un proceso exotérmico.

Bomba centrífuga

El mercurio libre del átomo de sodio sale por la parte inferior del desamalgamador hacia un recipiente donde se encuentra instalada una bomba centrífuga cuya función es mantener un flujo continuo de mercurio en la celda electrolítica.

B. CELDAS DE MEMBRANA

En el proceso de membrana, el anolito (salmuera más cloro) está separado del catolito (hidróxido de sodio e hidrógeno) por una membrana de intercambio catiónico que selectivamente permite el paso del ion sodio, pero suprime la migración del ion hidroxilo del catolito hacia el anolito. Mediante este proceso se obtiene soda cáustica de alta calidad al 33% en peso.

La ventaja del proceso de membrana es su bajo consumo de energía y reducido impacto ambiental. Dependiendo del diseño, el área de las membranas varían de 0.2 a 5.0 m².

El proceso de membrana se inició alrededor de 1970 con la invención de la membrana perfluorosulfonado realizada por la compañía Du Pont. En 1978, una membrana de dos capas se desarrolló con baja resistencia eléctrica y alta eficiencia de corriente.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

La celda electrolítica consta de un ánodo de titanio y un cátodo de níquel.

La membrana es el elemento de separación de la salmuera - cloro y el hidrógeno - hidróxido de sodio.

La salmuera ingresa al compartimiento del ánodo y la membrana donde se produce la electrólisis (oxidación) del ion cloruro por acción de la corriente formándose el cloro gaseoso.



La mezcla de salmuera diluída y cloro gaseoso abandonan la celda electrolítica. A la primera se le incrementa la concentración de cloruro de sodio para volver a ser usada en la celda, en tanto que el cloro gaseoso es derivado a otras plantas para su posterior uso.

La soda diluída al 31 % ingresa al compartimiento del cátodo y la membrana, el agua en contacto con el cátodo gana un electrón y forma el ion oxidrilo e hidrógeno gaseoso. En el cátodo se produce la electrólisis (reducción) del agua según:



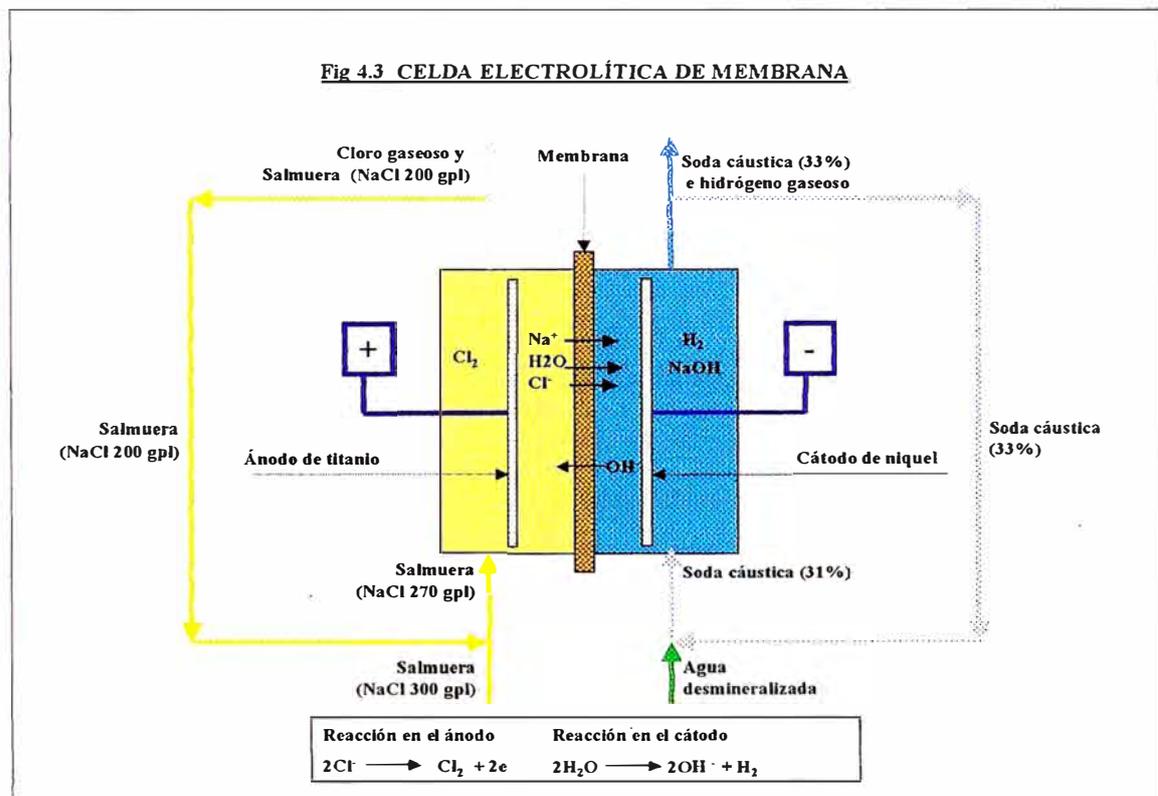
Debido a las reacciones electroquímicas secundarias y la difusión del ion oxidrilo a través de la membrana hacia la salmuera, la eficiencia de corriente en el ánodo y cátodo es del 96%. Estas reacciones principalmente forman oxígeno y cloratos.



ELEMENTO PRINCIPAL

La celda electrolítica para la producción de cloro, soda cáustica e hidrógeno consta de un elemento principal:

➤ La membrana.



Característica de la membrana

La membrana es un compuesto que resiste al cloro y a la soda cáustica. La membrana está constituida de fluorocarbón sulfonado y carboxilato. El fluorocarbon sulfonado es el material que se encuentra en contacto con el cloro y la salmuera ácida, en tanto que el carboxilato se encuentra en contacto con la soda cáustica. La membrana es hidráulicamente permeable.

El ion sodio atraviesa la membrana debido a su permeabilidad y atracción del cátodo. Asimismo, la membrana permite la difusión del agua (alrededor de 3 a 4 moles de agua por faraday) y en menor proporción la del ion cloruro.

La membrana está construida con grupos de sal que absorben agua (solución electrolítica) cuya conductividad se incrementa con la temperatura. La dependencia con la temperatura es muy fuerte. La conductividad de la membrana se incrementa 3 o más veces cuando su temperatura aumentas en 10 C. De igual forma se incrementa, en esa proporción, la difusión del ion sodio a través de la membrana.

La capacidad de transporte de masa de la membrana aumenta bajando la concentración del cloruro de sodio e incrementando la densidad de corriente. La capacidad de transporte de masa de la membrana disminuye, incrementando la concentración del hidróxido de sodio y la concentración del cloruro de sodio y bajando la temperatura de ambos.

En las celdas de membrana, la máxima concentración de la soda cáustica es de 33%.

C. CELDAS DE DIAFRAGMA

La producción comercial de cloro electrolítico comenzó en Europa y Estados Unidos alrededor de 1890. Las celdas iniciales fueron las del tipo ***bell jar*** que no disponía de un diafragma donde era inevitable el flujo del ion hidróxido hacia el anolito. Este método tuvo una limitada capacidad debido a la evolución del gas por la mezcla de la soda y el cloro, además de la pérdida de eficiencia.

La celda **Griesheim** usó un cemento poroso como diafragma. Le Sueur fue quien diseñó un diafragma de asbesto percolado cuyo principio de operación es utilizado en las actuales celdas de diafragma.

Cuando la salmuera se alimenta a la celda electrolítica ingresa al compartimiento del anolito (salmuera más cloro gaseoso) donde se encuentra ubicado el diafragma y el ánodo, posteriormente atraviesa el diafragma hacia el catolito (mezcla de salmuera, hidróxido de sodio e hidrógeno) La introducción de este diafragma aumentó la eficiencia.

A consecuencia de la invención del grafito sintético numerosas celdas se desarrollaron las cuales se pueden agrupar en tres grupos:

- Celdas de electrodo vertical rectangular.
- Celdas de electrodo vertical cilíndrico.
- Celdas bipolares (filtro prensa) con electrodo vertical.

En 1913, C. Marsh desarrolló una celda que incrementó el área del electrodo por unidad de espacio físico. Alrededor de 1928, K. Stewart de Hooker Chemical (ahora es Occidental Chemical Co) desarrolló un método de depositar fibra de asbesto en el cátodo por inmersión del

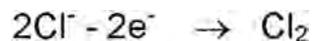
cátodo en un lodo de fibras de asbesto, este proceso lo realizó aplicando vacío.

Las celdas de diafragma producen un licor que contiene soda cáustica al 11% y cloruro de sodio al 18% en peso. La comercialización de la soda cáustica se realiza al 50%, para ello dicho licor se concentra. Durante este proceso el contenido de cloruro de sodio cae al 1% debido a la disminución de su solubilidad en la soda cáustica al 50% de concentración.

DESCRIPCION DEL PROCESO

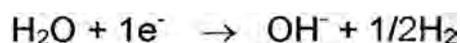
La celda electrolítica consta de un ánodo de titanio y un cátodo de acero. El diafragma es el elemento de separación de la salmuera - cloro y el hidrógeno - hidróxido de sodio.

La salmuera ingresa al compartimiento del ánodo y del diafragma donde se produce la electrólisis del ion cloruro por acción de la corriente formándose el cloro gaseoso.



El cloro gaseoso abandona la celda electrolítica y es derivado a otras plantas para su posterior uso.

La salmuera atraviesa el diafragma debido a la diferencia de altura. Una parte del agua que contiene la salmuera en contacto con el cátodo gana un electrón y forma el ion oxidrilo e hidrógeno gaseoso. En el cátodo se produce la electrólisis del agua según:



Debido a las reacciones electroquímicas secundarias y difusión del ion oxidrilo a través del diafragma hacia la salmuera, la eficiencia de corriente en el ánodo y cátodo es del 96.5%.

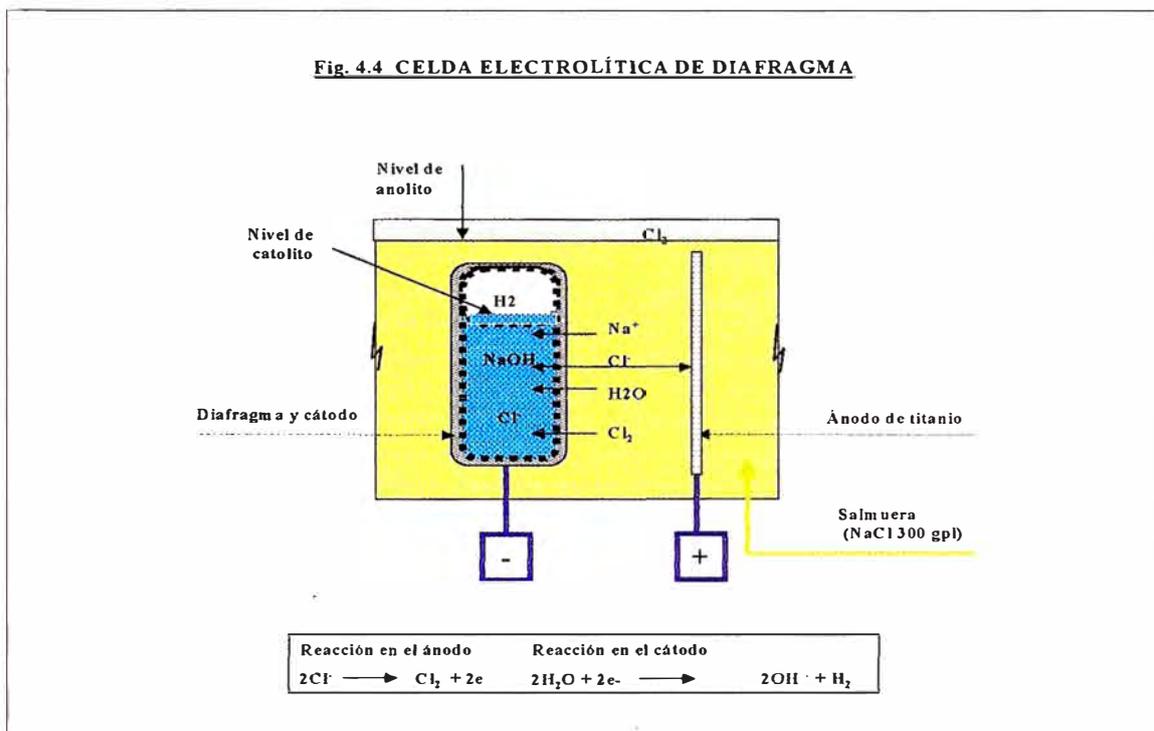
Las reacciones principales forman oxígeno y cloratos según:



ELEMENTO PRINCIPAL

La celda electrolítica para la producción de cloro, soda cáustica e hidrógeno consta de un elemento principal:

➤ El diafragma.



Características del diafragma

El diafragma se encuentra constituido principalmente por asbesto. En el futuro el asbesto podría ser reemplazado por una resina de teflón y circonio. En la actualidad, el costo del diafragma libre de asbesto es elevado.

4.4 COMPARACIÓN DE LOS PROCESOS

A. EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA APLICADA EN LA PRODUCCIÓN DEL CLORO:

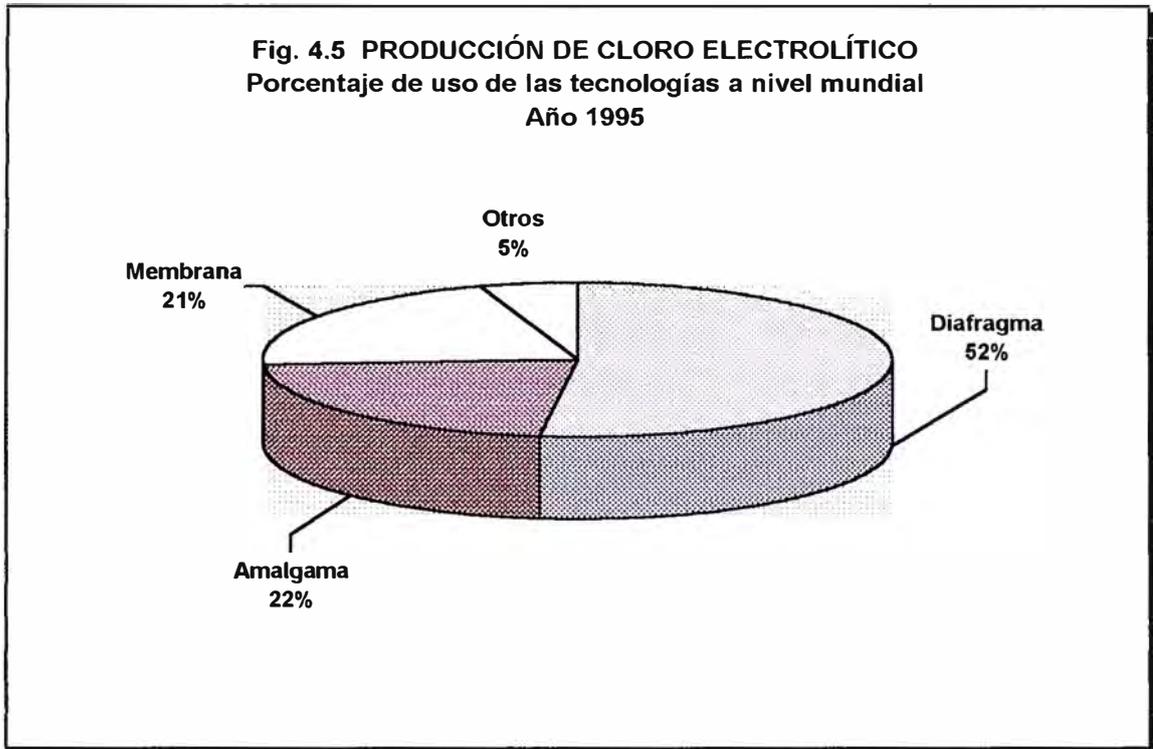
A pesar de las ventajas de la tecnología de las celdas de membrana, alrededor del 75 % de cloro se produce en celdas de diafragma y amalgama. La tecnología de las celdas de diafragma prevalece en los Estados Unidos (70 %), Rusia y China.

La tecnología de las celdas de amalgama prevalece en Europa del Este (64 %), en tanto que en Japón las celdas de membrana es la única tecnología que se usa.

Tabla 4.3 Producción de cloro según el porcentaje de uso de las tecnologías a nivel mundial

* Valores del año 2001 son estimados

Tecnología	Año	
	1995	2001 (*)
Diafragma	52%	49%
Amalgama	22%	18%
Membrana	21%	28%
Otros	5%	5%
Mercado mm tpa	41	43.3



B. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Las principales ventajas y desventajas de los tres procesos de la industria con respecto a la calidad de la salmuera, consumo de energía, costo de operación y tratamiento de efluentes son los siguientes:

Tabla 4.4 Ventajas y desventajas de los procesos de diafragma, amalgama y membrana

Proceso	Ventajas	Desventajas
Proceso de diafragma	<ul style="list-style-type: none"> • No requiere alta calidad de la salmuera. • Bajo consumo de energía. • Fabricación de diafragmas libre de asbesto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de asbestos. • Alto consumo de vapor en la concentración de soda cáustica. • Baja pureza de la soda cáustica. • Baja calidad del cloro. • La celda es sensible a las variaciones de presión.
Proceso de amalgama	<ul style="list-style-type: none"> • Producción de soda cáustica al 50 %. • Alta pureza del cloro e hidrógeno. • Simple tratamiento de la sal. • Permite variaciones de corriente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo de operación. • Alto costo de protección al medio ambiente. • Requiere gran espacio.
Proceso de membrana	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo consumo de energía. • Bajo costo de inversión. • Alta pureza de la soda cáustica. • Permite variaciones de corriente. • No es sensible a las variaciones de presión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere alta pureza de la salmuera. • Alto contenido de oxígeno en el cloro. • Elevado costo de la membrana.

B. CALIDAD DE LOS PRODUCTOS

Los tres procesos de la industria cloro soda pueden ser comparados respecto a la calidad del cloro gaseoso y soda cáustica.

COLORO GASEOSO

El cloro producido por las celdas de amalgama puede ser utilizado directamente en las diversas industrias. El cloro producido por las celdas de diafragma o membrana contiene alrededor de 2% de oxígeno el cual puede ser removido por la condensación y evaporación del cloro.

Tabla 4.5 Calidad del cloro gaseoso (% en volumen)

Ítem	Tecnología		
	Diafragma	Amalgama	Membrana
Cl ₂	96.5 – 98	98 – 99	97 – 99.5
O ₂	0.5 – 2.0	0.1 – 0.3	0.5 – 2
CO ₂	0.1 – 0.3		
H ₂	0.1 – 0.5	0.1 – 0.5	0.03 – 0.3
N ₂	1.0 – 3.0	0.2 – 0.5	

SODA CÁUSTICA

La soda cáustica en solución producida en las celdas de amalgama es la más pura de las tres tecnologías. La cantidad de cloruro de sodio y clorato de sodio es extremadamente baja. Sin embargo, la calidad de la soda cáustica de las celdas de membrana es aceptable.

En los países industrializados, la demanda de la soda cáustica libre de cloro denominado grado rayón es alrededor del 20 - 30 %

La soda cáustica procedente de las celdas de diafragma no puede ser utilizada en algunos procesos debido a su elevado contenido de cloruro y clorato de sodio. Además, el contenido de silicio, calcio, magnesio, sulfato es más elevado que en las celdas de amalgama o membrana.

Del cuadro siguiente se observa que la soda cáustica purificada obtenida a partir de las celdas de diafragma contiene amoníaco debido a que este compuesto se usa para reducir el contenido de cloruro de sodio en la soda.

Tabla 4.6 Calidad de la soda cáustica (% en peso)

Ítem	Tecnología			
	Diafragma		Amalgama	Membrana
	Sin purificar	Purificado		
NaOH	50.0	50.0	50.0	50.0
NaCl	1.0	0.025	0.005	0.005
Na ₂ CO ₃	0.1	0.1	0.05	0.04
Na ₂ SO ₄	0.01	0.01	0.0005	0.0001
NaClO ₃	0.1	0.001	0.0005	0.001
SiO ₂	0.02	0.02	<0.001	0.002
CaO	0.001	0.001	0.001	0.0001
MgO	0.0015	0.0015	0.0002	0.0001
Al ₂ O ₃	0.0005	0.0005	0.0005	0.0001
Fe	0.0007	0.0007	0.0005	0.0004
Ni				
Cu	0.0002	0.0002	0.00001	0.0001
Mn				
Hg	N	N	0.00001	N
NH ₃		0.001		

HIDRÓGENO GASEOSO

Tabla 4.7 Calidad del hidrógeno gaseoso (% en volumen)

Ítem	Tecnología		
	Diafragma	Amalgama	Membrana
H ₂	> 99.9	> 99.9	> 99.9

C. COSTOS DE OPERACION

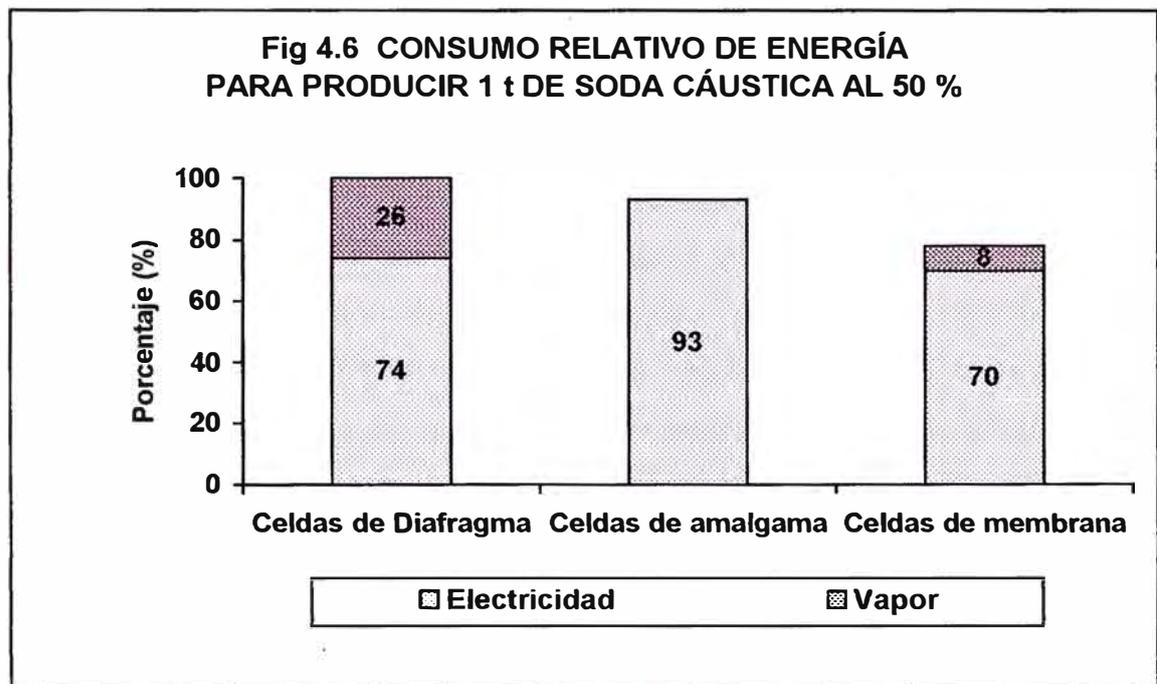
Los costos de mantenimiento, seguro, son similares en los tres procesos. Los costos variables (tratamiento de la sal, reactivos, reactivación de los ánodos) son similares en los tres procesos. La principal diferencia entre los tres procesos se da en el consumo de energía.

Con la finalidad de comparar el consumo de energía eléctrica para producir cloro gaseoso y soda cáustica al 50 % se considera que 1 t de vapor de agua equivale a 400 Kw. h de energía eléctrica.

De la tabla 4.8 se observa que el proceso de membrana consume menor cantidad de energía eléctrica, seguido por el de amalgama y finalmente el de diafragma. El costo de energía eléctrica varía drásticamente de región a región dependiendo de su origen.

**Tabla 4.8 Consumo de energía para producir 1 t Cl₂ + 1.13 t NaOH
(100%)
Concentración de la soda: 50%**

Ítem	Tecnología		
	Diafragma	Amalgama	Membrana
Energía para electrólisis (Kw.h)	2300 – 2900	3100 – 3400	2200 – 2600
Equivalente de vapor (kW.h)	800 – 1000	0	200 – 400
Total (kW.h)	3100 – 3900	3100 – 3400	2400 – 3000
Costos de energía (%)	100 %	93 %	78 %



Equipamiento

Los costos incurridos en las unidades de rectificación de la corriente, sistema de cloro e hidrógeno, unidad de ácido clorhídrico, almacenamiento de la soda cáustica, ingeniería y construcción son aproximadamente similares.

Las celdas de amalgama son más caras que las celdas de diafragma y membrana. Además, el proceso de amalgama requiere un equipamiento adicional para el tratamiento de efluentes y remoción del mercurio de los productos.

El sistema de tratamiento de la sal en las celdas de diafragma es el más simple de las tres tecnologías, seguido por las celdas de amalgama y finalmente por las celdas de membrana que tiene un sistema complejo de purificación de la sal.

Con la finalidad de obtener soda cáustica al 50 % el proceso de diafragma requiere de evaporadores de varias etapas cuyo material de construcción es el níquel para reducir el ratio de corrosión del licor que contiene cloruro y clorato de sodio. El proceso de membrana requiere de evaporadores de menor tamaño que son construidos de acero al carbono. El proceso de amalgama no requiere de evaporadores porque la soda cáustica se obtiene al 50 %.

V. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA CLORO - SODA

5.1 PRODUCCIÓN DE CLORO, SODA CÁUSTICA E HIDRÓGENO

A. TRATAMIENTO DEL CLORURO DE SODIO

Debido a que la sal, cloruro de sodio; tiene impurezas tales como el calcio, magnesio e insolubles, esta sección tiene por finalidad obtener una disolución de sal en agua (salmuera) con bajo contenido de impurezas; calcio, magnesio e insolubles. Por consiguiente, es necesario realizar un tratamiento de la salmuera, para obtener un óptimo funcionamiento de las Celdas electrolíticas,

Esta sección consta de cuatro etapas:

- Salmuera Saturada.
- Salmuera Depurada.
- Salmuera Clorada.
- Salmuera Declorada.

Salmuera Saturada

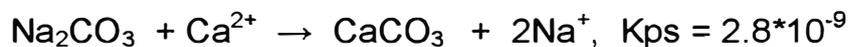
La sal proveniente de las Salinas de Huacho se alimenta a una poza de concreto donde ésta se disuelve por acción de la salmuera agotada ($\text{NaCl} = 240 \text{ gpl}$) proveniente de la Sala de Celdas electrolíticas, elevando de esta manera su concentración ($\text{NaCl} = 310 \text{ gpl}$), asimismo se disuelve el calcio, magnesio, e insolubles que tiene la sal, para disminuir el contenido de estas impurezas la salmuera pasa a través de unos reactores y un decantador donde se realiza lo siguiente:

Reactor N° 1

En este reactor se alimenta el carbonato de sodio para formar el carbonato de calcio que es insoluble, de esta manera se reduce el contenido de calcio en la salmuera.

El flujo del carbonato de calcio se regula mediante un rotámetro con la finalidad de obtener un exceso de 200 - 300 ppm.

Reacción:

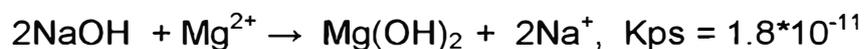


Reactor N° 2

En este reactor se alimenta soda cáustica para formar el hidróxido de magnesio que es insoluble, de esta manera se reduce el contenido de magnesio en la salmuera.

El flujo de soda cáustica se controla mediante un controlador de pH cuyo set point se fija en 10.2, con la finalidad de obtener un exceso de dicho reactivo, el flujo aumenta cuando el pH disminuye o viceversa.

Reacción:



Reactor N° 3

En este reactor se adiciona floculante con la finalidad de aglomerar los compuestos de carbonato de calcio e hidróxido de magnesio de esta manera se obtiene una macromolécula de gran peso molecular.

Cada uno de los reactores tiene un volumen de 30 m^3 con un tiempo de residencia igual a 15 min.

Decantador

La salmuera que sale por rebose del reactor N° 3, fluye hacia la parte superior y central del decantador, aquí se logra la decantación de las macromoléculas y los insolubles, estos son llevados hacia el centro del decantador mediante una rastra (6 RPh) para luego ser evacuados hacia una poza de lodos y posterior desecho. La salmuera clarificada de esta poza se alimenta a la parte central del decantador.

El decantador tiene un volumen de 2200 m^3 con un tiempo de residencia igual a 18 h.

La Salmuera que rebosa por la parte superior del decantador es alimentado a una batería de filtros de arena que trabajan en paralelo. Estos filtros tienen la función de retener en el lecho de cuarzo las partículas que no han decantado (carbonato de calcio e hidróxido de magnesio)

A los filtros, en forma periódica se realiza el lavado en contracorriente con salmuera limpia y alcalina (pH = 10.2)

La concentración de la Salmuera Saturada no debe ser superior a 310 gpl de NaCl, de obtenerse un valor superior, se produce la cristalización de la sal en las tuberías y filtros.

Salmuera Depurada

Con este nombre, se conoce a la Salmuera que ingresa a las Celdas Electrolíticas, esta se forma de la mezcla de la Salmuera filtrada con la

Salmuera clorada (90 m³/h), dicha mezcla se realiza con la siguiente finalidad:

- Disminuir la concentración del NaCl (de 310 a 280 gpl) para evitar de esta manera la cristalización del NaCl en las Celdas Electrolíticas (Ánodos de titanio, cabezal de entrada y/o salida, tuberías).
- Incrementar la temperatura de la Salmuera Depurada, esto debido a que la Salmuera a la salida de las Celdas Electrolíticas sale caliente (su temperatura se incrementa en 10 C). Además, la Salmuera Depurada debe tener un pH = 3.5, para lo cual se adiciona ácido clorhídrico, el flujo de ácido clorhídrico se controla mediante un controlador de pH cuyo set point se fija en pH = 3.5, el flujo se incrementa cuando el pH aumenta o viceversa.

Salmuera Clorada

En la Celda Electrolítica se produce la electrólisis del cloruro de sodio, se obtiene la amalgama de sodio y cloro gaseoso, una parte del cloro queda ocluido en la Salmuera, para favorecer la desorción de este gas se adiciona ácido clorhídrico hasta obtener un pH = 2.5, a este valor de pH el cloro ocluido en la salmuera es de 300 ppm. De esta manera se logra la desorción parcial del cloro gaseoso que es colectado para su posterior tratamiento.

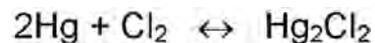
El flujo de ácido clorhídrico se controla mediante un controlador de pH cuyo set point se fija en pH = 2.5, el flujo se incrementa cuando el pH aumenta o viceversa.

La Salmuera que aún contiene cloro ocluido, se hace pasar a través del declorinador, donde se alimenta aire por la parte inferior de dicho tanque para lograr la desorción del cloro hasta obtener un contenido de cloro

ocluido de **20 ppm**. La mezcla de gas que se obtiene, aire y cloro; se deriva para la preparación de hipoclorito de sodio.

De obtenerse cloro ocluido mayor a 20 ppm, se forma el hipoclorito de hierro, calcio y magnesio. Al ser solubles estos compuestos su contenido se incrementa en la salmuera.

De obtenerse un contenido de cloro ocluido menor a 20 ppm, las trazas de mercurio que se encuentra disuelto en la salmuera decantarán en el espesador junto con el carbonato de calcio, hidróxido de magnesio e insolubles. El mercurio y cloro se encuentran en equilibrio mediante la siguiente reacción:



Salmuera Declorada

Se conoce con el nombre de Salmuera Declorada, a la Salmuera proveniente del declorinador, esta salmuera se dirige hacia el saturador previo incremento del valor de pH, de 2.5 a 7.0 con soda cáustica.

El flujo de soda cáustica se controla mediante un controlador de pH cuyo set point se fija en 7.0, el flujo se incrementa cuando el pH disminuye o viceversa.

De obtenerse un valor de pH por debajo de 6.0 se produce emanaciones de cloro gaseoso al medio ambiente, a la vez del deterioro de la estructura de concreto del saturador.

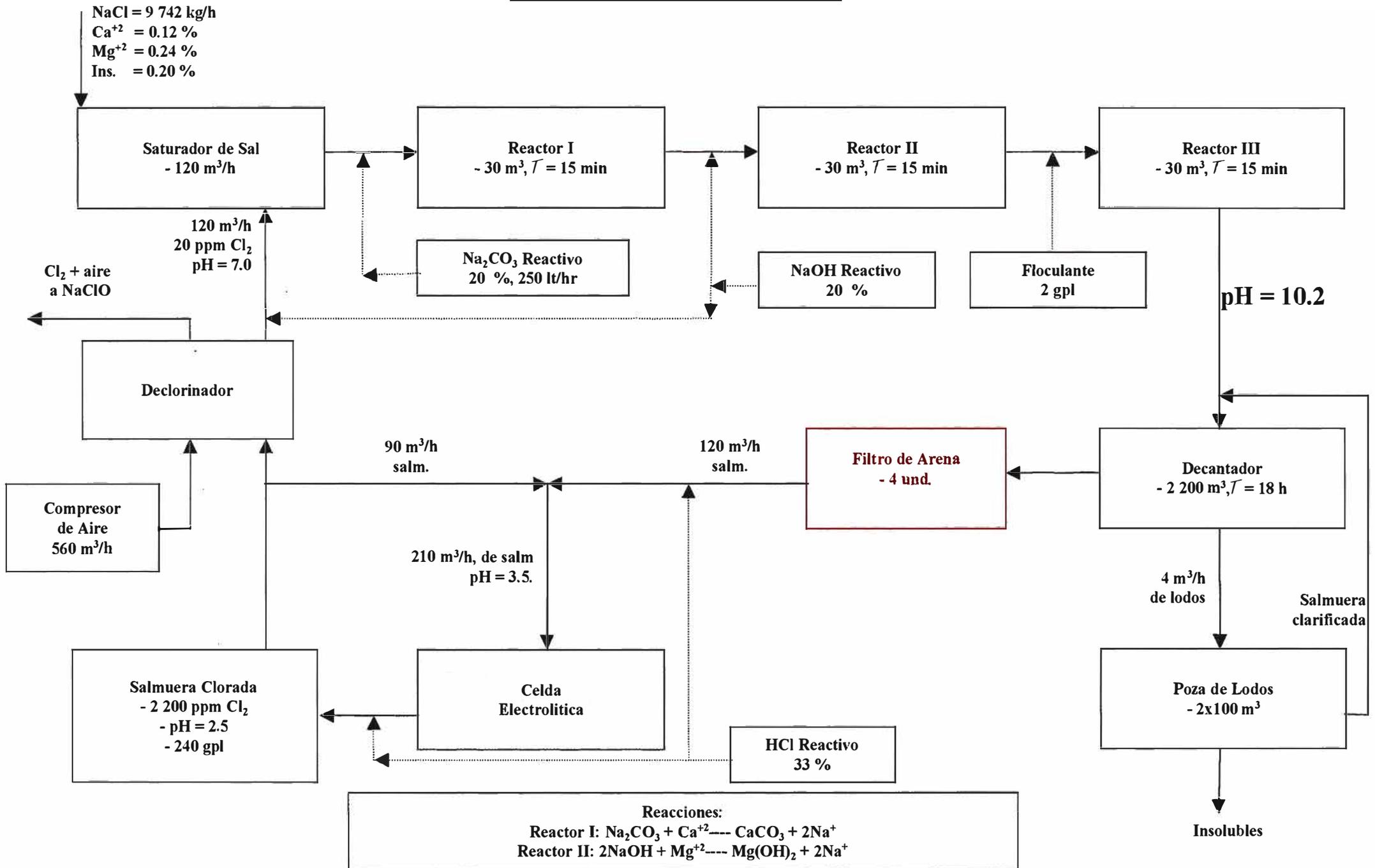
Cuando se obtiene un valor de pH superior a 8.0 se forma el hidróxido de magnesio que es un coloide que fácilmente se aglomera, al ingresar este

al impulsor de la bomba centrífuga el coloide se rompe y reduce su tamaño, a consecuencia de ello la decantación de dichas moléculas se realiza con dificultad aún con el uso del floculante.

Tabla 5.1 Condiciones de operación

Ítem	Unidades	Salmuera saturada	Salmuera depurada	Salmuera clorada	Salmuera declorada
Flujo	m ³ /h	120	210	210	120
pH		10.2	3.5	2.5	7.0
ClNa	gpl	310	280	240	240
Fe ⁺²	ppm		0.04		
Ca ⁺²	ppm		10		
Mg ⁺²	ppm		5		
Cl ₂	ppm			300	20

TRATAMIENTO DE LA SAL



B. ELECTRÓLISIS DEL CLORURO DE SODIO

La salmuera concentrada y caliente se alimenta a la **celda de electrólisis** donde es electrolizada entre los ánodos de titanio y el cátodo de mercurio que fluye sobre el fondo de la celda. Los flujos de mercurio y salmuera son en paralelo. Las celdas electrolíticas se encuentran distribuidas en serie con respecto al paso de la corriente.

En los ánodos se produce el cloro gaseoso mientras que en el cátodo la amalgama de sodio.

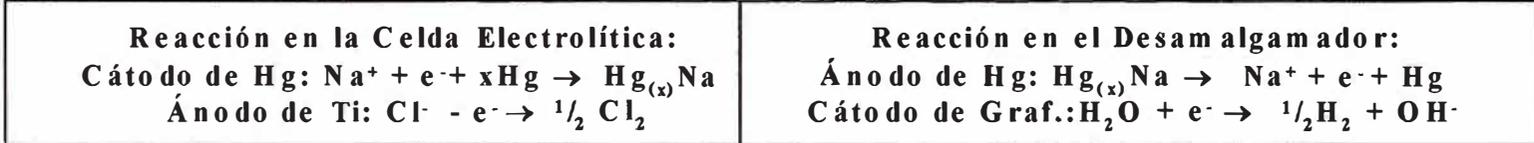
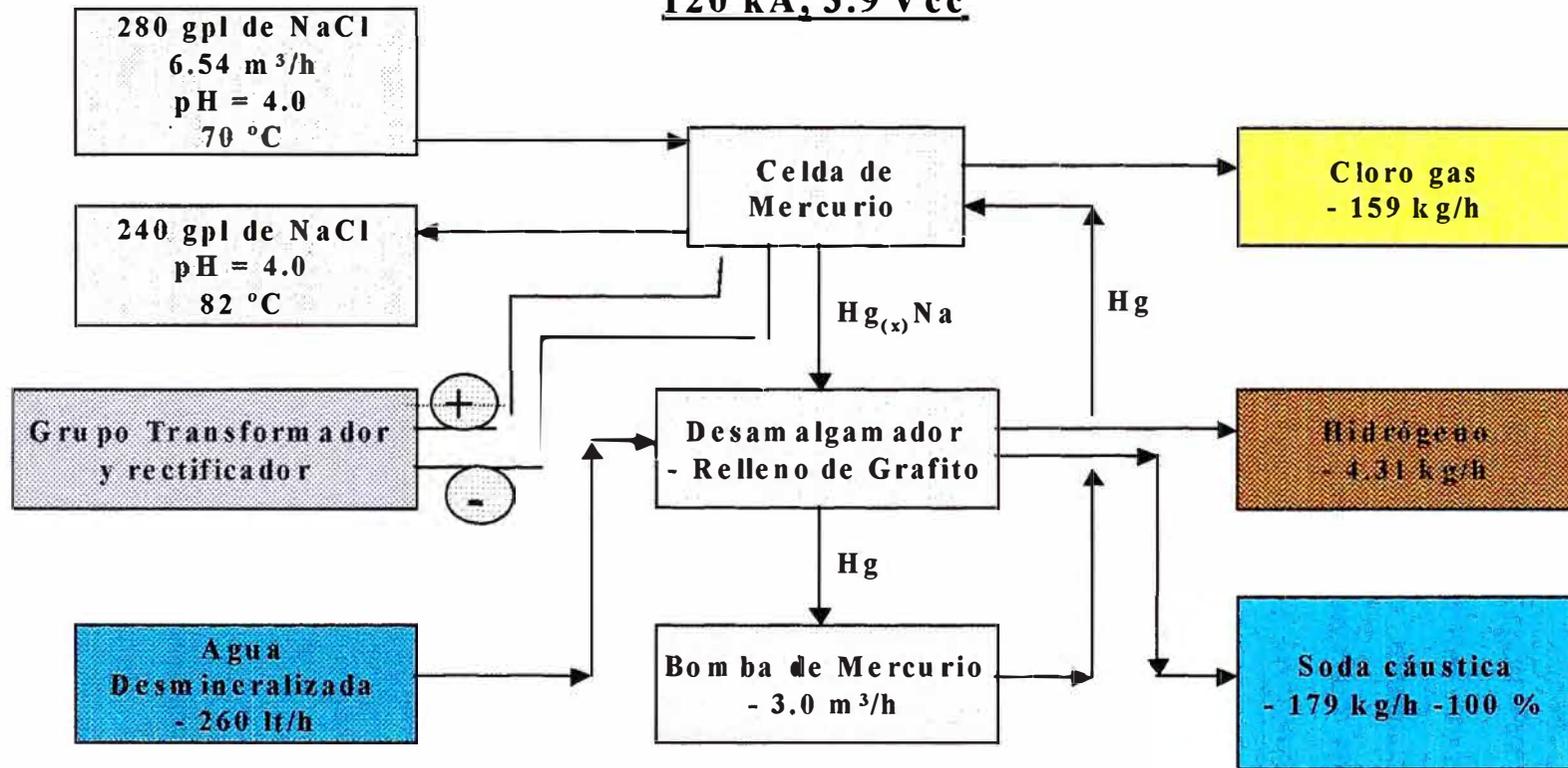
La amalgama de sodio fluye por gravedad de la celda hacia el **desamalgamador**, donde reacciona con el agua desmineralizada para producir soda cáustica e hidrógeno. En la parte inferior del desamalgamador, por acción de una **bomba centrífuga**, el mercurio libre de sodio es alimentado a la celda electrolítica.

El hidrógeno es enfriado y utilizado en la síntesis del ácido clorhídrico. La soda cáustica producida al 50 % es sometida a las operaciones de enfriamiento y filtración para su venta, en tanto que el cloro gaseoso producido es sometido a las operaciones de enfriamiento, secado y compresión para su posterior uso.

La celda electrolítica, en la que se produce la soda cáustica, el cloro y el hidrógeno gaseoso, consta de tres elementos principales interconectados entre sí, los cuales son:

- La celda de electrólisis.
- El desamalgamador.
- La Bomba centrífuga.

Fig. 5.2 CELDA DE AMALGAMA
120 kA, 3.9 Vcc



CELDA DE ELECTRÓLISIS

La celda electrolítica se alimenta con salmuera depurada. Por acción de la corriente continua, el ion cloruro se dirige hacia el ánodo de titanio donde cede su electrón y se convierte en cloro gaseoso, mientras que el ion sodio se dirige al cátodo de mercurio donde gana un electrón y se convierte en sodio metálico. Este sodio metálico en contacto con el mercurio forma la amalgama de sodio (Hg_xNa), que fluye por gravedad al desamalgamador. Por su parte, la salmuera agotada (salmuera clorada) fluye por gravedad de la celda y es derivada al tanque de salmuera clorada.

Reacciones principales en la celda electrolítica:

Reacción en el ánodo



Reacción en el cátodo



Reacción global en la celda electrolítica



C. PARÁMETROS PRINCIPALES DE OPERACIÓN DE LA CELDA ELECTROLÍTICA

Voltaje de operación

El voltaje de operación de la celda electrolítica depende de una serie de factores:

- Estado del revestimiento del ánodo de titanio
- Distancia entre el ánodo y cátodo
- Concentración y temperatura de la salmuera
- pH del electrolito
- Concentración de la amalgama de sodio, etc.

Sin embargo, los parámetros de mayor incidencia en el voltaje de operación es el estado del revestimiento del ánodo y la pureza de la salmuera. El voltaje de operación de la celda electrolítica se calcula según:

$$V_{op} = 3.22 + K_f * kA/A + (80 - T_m) * 0.01$$

Donde:

- V_{op} (V) Voltaje de operación medido entre el piso de hierro y las barras de cobre.
- k_f (m²*V/kA) Coeficiente específico de voltaje que depende principalmente del estado físico y revestimiento del ánodo.
- kA (kA) Intensidad de corriente.
- A (m²) Área del ánodo.
- T_m (C) Temperatura media de la salmuera.
- 3.22 (V) Está constante corresponde al voltaje teórico.

En algunas ocasiones, el cátodo de mercurio forma amalgama de hierro, magnesio o calcio los cuales se adhieren al piso de la celda incrementando el espesor del cátodo. Para evitar un cortocircuito, el sistema de protección eleva los ánodos aumentando la distancia de separación entre el ánodo y cátodo. A consecuencia de ello, el voltaje de operación de la celda se incrementa. Para retornar al voltaje óptimo es necesario realizar una limpieza del ánodo.

Flujo, temperatura y concentración de la salmuera

El flujo de salmuera de alimentación a la celda electrolítica se calcula según:

$$F = 2.18 * kA / \Delta[CINa]$$

Donde:

F: (m³/h) Flujo de salmuera.

kA: (kA) Amperaje de operación.

$\Delta[CINa]$: (gpl) Diferencia de concentración de CINa a la entrada y salida de las celdas.

La resistividad eléctrica de la salmuera disminuye con el crecimiento de la temperatura. Cuando la temperatura promedio de la salmuera es menor a 80 C se incrementa el voltaje de operación de la celda. Si la temperatura es mayor a 80 C, se reduce el voltaje, pero existe el inconveniente de la evaporación de agua.

Concentración de la amalgama de sodio

La concentración de la amalgama de sodio a la salida de las celdas debería estar entre 0.200 % y 0.300 % gr Na/gr Hg. La amalgama de sodio tiene una fluidez aceptable cuando su concentración es inferior a dicho valor.

La concentración de la amalgama no debería ser nunca demasiado alta porque su viscosidad aumenta facilitando su descomposición, generando hidrógeno al interior de la celda electrolítica y reduciendo la eficiencia de la corriente catódica. Una concentración demasiado baja requiere mayor dotación de mercurio.

Flujo de mercurio

El flujo de mercurio se regula con la finalidad de que la concentración de la amalgama de sodio a la salida de las celdas no sea superior a 0.300 %gr Na/gr Hg.

El flujo de mercurio se puede calcular mediante la siguiente relación:

$$F = 858 * kA / (\Delta[\%Na] * 13.6 * 10000)$$

Donde:

F : (m³/h) Flujo de mercurio .

kA : (kA) Amperaje de operación.

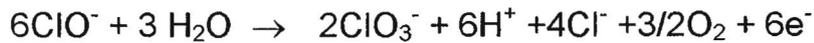
$\Delta[\%Na]$: (% gr Na / gr Hg) Diferencia de concentración de la amalgama de sodio entre la salida y entrada de la celda electrolítica.

Valor del pH de la salmuera

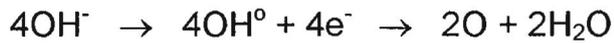
El valor de pH de la salmuera de alimentación a las celdas electrolíticas debe ser 3.5. Si es menor, podría favorecer la descarga de hidrógeno sobre el cátodo.

La concentración de hipoclorito y clorato en la salmuera aumenta con el pH.

Una alta concentración de hipocloritos y cloratos en la salmuera produce una reducción en la eficiencia de la corriente anódica por la formación de oxígeno gaseoso según:



Y ocurre, además, la reducción del ion hidroxilo según:



El oxígeno formado daña la superficie del revestimiento del ánodo.

El alto pH de la salmuera puede ser producido por los arrastres de soda con el mercurio debido al bajo nivel de mercurio en el desamalgamador.

EL DESAMALGAMADOR

La amalgama de sodio que se forma en la celda electrolítica fluye por gravedad hacia el desamalgamador, ingresando a éste por la parte superior. En tanto que el agua desmineralizada ingresa por la parte inferior.

El ánodo (amalgama de sodio) al estar en contacto con el cátodo (grafito) forma una pila en cortocircuito. Dicho cortocircuito ocasiona que la energía electroquímica que tiene la amalgama se transforme en energía térmica. Lo anterior es posible apreciarlo porque la producción de hidrógeno y soda cáustica en el desamalgamador constituyen un proceso exotérmico.

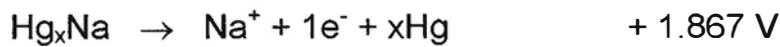
La concentración del hidróxido de sodio es máxima en la parte superior del desamalgamador, debido a la reducción del agua desmineralizada a medida que ésta va subiendo a través del desamalgamador.

La concentración de la amalgama de sodio es cero en el fondo del desamalgamador debido a la descomposición de la amalgama de sodio –

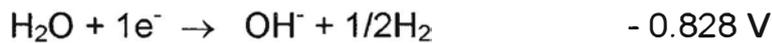
que da lugar al ion sodio - a medida que cae a través del grafito.

En la superficie del mercurio (ánodo), el sodio metálico forma el ion sodio y el gas hidrógeno se libera en el grafito (cátodo), dejando el ion hidroxilo según:

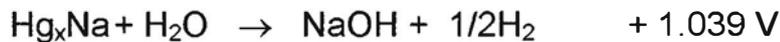
Reacción en el ánodo



Reacción en el cátodo



Reacción global en el desamalgamador



El mercurio libre de sodio cae por gravedad al fondo del desamalgamador donde fluye a la bomba que lo devuelve a la celda.

Flujo de agua desmineralizada

Para obtener una concentración de soda cáustica al 50 %, el flujo de agua de alimentación al desamalgamador se estima mediante la siguiente relación:

$$F = 2 * kA + 20$$

Donde:

F: (lt/h) Flujo de agua desmineralizada.

KA : (kA) Amperaje de operación.

Tabla 5.2 Condiciones de operación de la celda electrolítica

Carga	kA	120
Voltaje	V	3.90
Temperatura promedio de la salmuera	C	75
Coeficiente específico de voltaje	$m^2 \cdot V/kA$	0.06
Producción de cloro	kg/h	154
Producción de soda cáustica	kg/h	173
Producción de hidrógeno	kg/h	4.4
Análisis de salmuera	gpl (in / out)	280 / 240
Flujo de salmuera	m^3/h	6.54
Flujo de agua desmineralizada	lt/h	220 – 260
Análisis de amalgama	% gr Na/gr Hg (in / out)	0.000 % / 0.250 %
Flujo de mercurio	m^3/h	3.03

D. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA CELDA ELECTROLÍTICA

CELDA DE ELECTRÓLISIS

Características de la celda de electrólisis

La celda electrolítica es un recipiente cerrado con piso de hierro y cubierta de teflón. Sus paredes laterales y los cabezales de entrada y salida son de hierro, revestidas con fibra de vidrio y poliéster.

La base de la celda electrolítica es de hierro, y tiene una pendiente de 0.5% que permite el flujo de mercurio por gravedad cubriendo la totalidad de la superficie.

La celda electrolítica esta constituida por el ánodo de titanio y el cátodo móvil de mercurio.

El armado y calibración del set anódico se realiza para obtener una mínima separación entre la parte inferior del ánodo de titanio y la parte superior del cátodo de mercurio.

Cuando la distancia de separación entre el ánodo y cátodo es mínima se obtiene un voltaje óptimo de operación; sin embargo, existe el riesgo del contacto físico (corto circuito) entre los electrodos. Para evitar dicho contacto cada celda electrolítica dispone de un **sistema de protección anódica**.

Ánodos de titanio

Los ánodos son de titanio puro (Ti), que tiene un revestimiento de óxido de iridio y rutenio (IrO_2 , RuO_2). Estos ánodos son resistentes a la salmuera ácida y al cloro; no obstante dicho revestimiento se vuelve frágil y quebradizo en presencia de hierro e hidrógeno; por ello, el contenido no debe ser superior a 0.05 ppm y 1 % , respectivamente para evitar daños al revestimiento y condiciones inseguras de operación en la celda electrolítica.

Las impurezas de la salmuera afectan directa e indirectamente al revestimiento. A medida que el revestimiento se deteriora, su constante específica de voltaje, y por ende el voltaje de operación, se incrementa según:

$$V_{op} = 3.22 + K_f * kA/A + (80 - T_m) * 0.01$$

Características del ánodo de titanio

Ánodo de titanio tipo *Runner* modelo **14 H 3 R**

Densidad de corriente: 1.5 kA/m²

Sistema de protección de los ánodos

La introducción de los ánodos de titanio permitió incrementar la densidad de corriente y disminuir la separación de los electrodos en las celdas de amalgama.

Cuando la celda electrolítica trabaja a altas densidades de corriente, la ocurrencia de un cortocircuito deteriora físicamente al ánodo y desactiva (reduce) el revestimiento. La finalidad de la mínima separación del ánodo y cátodo es obtener un óptimo voltaje de operación y, por consiguiente, un bajo consumo de energía.

El sistema de protección anódica se desarrolló con la finalidad de evitar los cortocircuitos (incrementar la vida de los ánodos), y obtener una separación mínima entre los electrodos (bajo consumo de corriente).

Cada celda electrolítica dispone de una cabina marca **Friem** donde se encuentran ubicadas los dispositivos electrónicos del sistema de protección anódica ACPD. Además, se dispone de un tablero de control centralizado **CCD** desde el cual se puede visualizar y modificar los parámetros de operación de cada celda, tales como el voltaje de operación y de referencia, distribución de corriente anódica, alarmas ópticas por falta de mercurio, tensión y/o sobrecorriente.

Características del cátodo

El cátodo es mercurio metálico, que es un metal líquido a la temperatura ordinaria. La presión de vapor del mercurio es elevada y sus vapores son tóxicos, por ello la totalidad de las superficies de mercurio y/o amalgama se encuentran cubiertas con salmuera o agua desmineralizada para evitar su evaporación.

El mercurio se encuentra cubierto con salmuera en la celda electrolítica, en tanto, que la amalgama se encuentra cubierta con agua desmineralizada con la finalidad de lavar las trazas de cloruro de sodio y obtener la soda cáustica con bajo contenido de cloruros. Cuando se incrementa el contenido de cloruro de sodio en el agua de lavado ésta es utilizada en el tratamiento de la sal.

EL DESAMALGAMADOR

Características del desamalgamador

El desamalgamador es un tanque cilíndrico de acero, dicho tanque tiene una canasta de acero empacada con terrones de grafito activado que viene a ser el cátodo, en tanto que el ánodo es la amalgama de sodio. En la parte superior del desamalgamador se encuentra ubicado el distribuidor de amalgama de sodio.

El desamalgamador esta provisto de un dispositivo de ajuste externo para mantener constante la presión sobre el empaque de grafito. Esta presión es importante para evitar un excesivo desgaste y formación de polvo de grafito. La razón de este desgaste estriba en la constante agitación de la soda cáustica provocada por el mercurio y el hidrógeno.

Características del cátodo

El cátodo es un lecho empacado al azar con trozos de grafito activado de malla 20 – 40. Los terrones de grafito se cambian cuando su tamaño es inferior a la malla 40. El grafito se encuentra activado con molibdato de sodio. Cuando el grafito se desactiva, una solución de molibdato de sodio se adiciona con la finalidad de reactivarlo.

El grafito no se amalgama con el mercurio.

Características del ánodo

En el desamalgamador la amalgama de sodio se desempeña como ánodo. Cabe anotar que en la celda electrolítica el mercurio es el cátodo.

BOMBA CENTRÍFUGA.

Características de la bomba

Tipo de bomba	Centrífuga.
Impulsor	Cerrado.
Altura disponible	5.15 m H ₂ O.
Caudal máximo	5.25 m ³ /h.

E. ANOMALÍAS EN LA OPERACIÓN DE LA CELDA ELECTROLÍTICA

Efecto de las impurezas en la salmuera

Calcio y magnesio

Las impurezas más comunes de la sal son el calcio, magnesio, hierro e insolubles, las cuales son tratadas en la sección salmuera. Sin embargo,

una mínima cantidad del ion calcio y magnesio pasan el tratamiento, y junto a la salmuera son alimentados a las celdas electrolíticas.

El calcio no genera mayores problemas en la celda electrolítica, pero cuando su contenido es superior a 100 ppm, se genera una amalgama de calcio que se adhiere al piso de hierro de la celda y/o al grafito del desamalgamador. No obstante, ésta se elimina fácilmente con un lavado de la celda o adición de molibdato de sodio al desamalgamador.

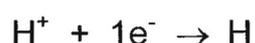
Cuando el contenido del ion sulfato en la salmuera es superior a 20,000 ppm, se forma el sulfato de calcio que precipita en el ánodo de titanio desactivándolo en forma permanente. A consecuencia de ello el voltaje de operación se incrementa y es necesario reactivar el *señ* anódico.

Aún en pequeñas cantidades (5 ppm), el magnesio, en presencia de otros metales, muestra una marcada propiedad sinérgica, la cual cataliza la generación de hidrógeno.

Metales pesados

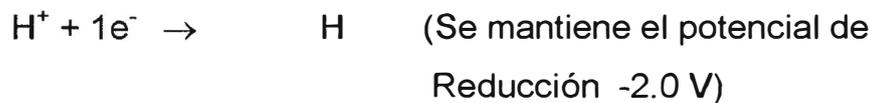
Cuando la salmuera se encuentra contaminada con metales pesados, **el potencial de reducción de hidrógeno aumenta**, facilitando su formación al interior de la celda electrolítica. La combinación de dos o más metales tienen peores efectos que si se encontraran solos.

Por ejemplo, el magnesio y hierro forman un par sinérgico. Una concentración del ion magnesio, digamos 5 ppm, junto con los metales promotores (*) son capaces de reducir la eficiencia de la corriente catódica por debajo del 50 %, produciendo un volumen correspondiente de hidrógeno.



(Se incrementa su potencial de reducción por encima de - 1.8 V)

Algunos metales pesados (V, Mo, Cr, Ni) **reducen la movilidad del sodio metálico en la amalgama** generando un incremento de la actividad del sodio en la interfase salmuera mercurio. Por lo tanto, **el potencial de reducción del sodio disminuye** favoreciendo la evolución de hidrógeno según:



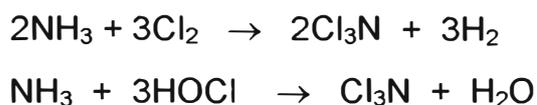
Clasificación de los efectos que causan los metales pesados en la evolución de hidrógeno en la celda electrolítica.

Extremadamente peligroso	V, Mo, Cr, Ti, Ta, (Mg + Fe)
Peligroso	Ni* , Co* , Fe* , W
Moderado	Ca, Ba, Cu* , Al* , Mg* , grafito
Ningún efecto	Ag, Pb, Zn, Mn

(* estos metales son conocidos como promotores).

Amoníaco

Los compuestos de amoníaco y amonio son peligrosos porque ellos reaccionan con el cloro al interior de la celda con formación de hidrógeno y tricloruro de nitrógeno según:



Flúor y otros

El ion flúor puede penetrar la película del revestimiento ocasionando una deficiente adhesión del revestimiento al sustrato de titanio. Por consiguiente se produce la pérdida del mismo.

El azúcar, CN^- y EDTA afectan la estabilidad del revestimiento.

F. ANOMALÍAS EN LA OPERACIÓN DEL DESAMALGAMADOR

Alta temperatura de soda cáustica

Cuando la concentración de sodio en el mercurio a la entrada del desamalgamador es mayor a 0.300 %, la temperatura de soda cáustica se incrementa porque la fuerza electromotriz de esta reacción aumenta.

Alta concentración de la amalgama de sodio a la salida del desamalgamador

Normalmente, la concentración de la amalgama de sodio es cero en el fondo del desamalgamador debido a la descomposición de esta amalgama en el ion sodio a medida que cae a través del grafito.

Si la concentración de sodio en el mercurio a la salida del desamalgamador es mayor a 0.050 %, es necesario adicionar molibdato de sodio al desamalgamador con la finalidad de eliminar las impurezas insolubles (hidróxido de calcio) que se han depositado en el grafito:



Si luego de adicionar molibdato de sodio al desamalgamador, el contenido de sodio en el mercurio es elevado, deberá realizarse un lavado y/o cambio del grafito.

G. PRODUCTOS DE LA ELECTRÓLISIS DEL CLORURO DE SODIO

HIDRÓGENO GASEOSO

El hidrógeno gaseoso que se encuentra húmedo con agua y vapores de mercurio sale por la parte superior del desamalgamador hacia un enfriador individual de hidrógeno. Allí, parte del mercurio se condensa y retorna por gravedad al desamalgamador.

El hidrógeno gaseoso se deriva al colector y al enfriador general donde su temperatura es reducida hasta 10 C con agua subenfriada. Las impurezas del hidrógeno son el vapor de agua y mercurio. El hidrógeno gaseoso no se contamina con aire porque el desamalgamador, el tanque de almacenamiento y las líneas por donde fluye el hidrógeno siempre se encuentran a una presión superior a la atmosférica.

ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO

El almacenamiento de hidrógeno se realiza en un tanque de tapa flotante con sello líquido (agua) llamado gasómetro. Este tipo de tanque se caracteriza por tener volumen variable.

Este tanque incrementa su altura (volumen) si la presión interior es superior a 30 mmH₂O. Siendo así, la tapa alcanza su máximo y ocurre la purga de hidrógeno por una línea de 2" de diámetro. Normalmente esta línea de purga se encuentra con un sello líquido (agua). Cuando la presión interior del tanque es inferior a 10 mmH₂O, la altura (volumen) se reduce.

SODA CÁUSTICA

La soda cáustica sale al 50 % en peso por la parte superior del desamalgamador, y se deriva hacia el colector de soda de las celdas electrolíticas. Luego de ser sometido a las operaciones de enfriamiento y filtración, la soda cáustica se deriva hacia los tanques de almacenamiento para su posterior comercialización.

Factores que afectan la calidad de la soda cáustica

- Pureza del agua desmineralizada.
- Calidad de la salmuera, porque la mayoría de las impurezas de la salmuera pueden ingresar al desamalgamador.
- La soda cáustica se carbonata con el dióxido de carbono contenido en el aire. Para evitar esta contaminación, es necesario mantener cerrado el punto de muestreo.
- Los cloruros en la soda provienen del agua desmineralizada y las trazas de salmuera arrastrada por la amalgama hacia el desamalgamador. Para evitar lo último, se recomienda lavar la amalgama con suficiente agua desmineralizada.
- La contaminación de la soda cáustica es ocasionada al ser arrastrada la salmuera por la amalgama. Esta contaminación es mayor a baja carga porque, siendo la cantidad de salmuera arrastrada mas o menos constante, contamina una menor cantidad de soda producida.
- Cuando se realiza el mantenimiento al desamalgamador, lavado o cambio de grafito, es posible que la soda arrastre pequeñas partículas de grafito que fácilmente sedimentan en los tanques de almacenamiento.

COLORO GASEOSO

La celda funciona bajo una presión negativa (5 mmH₂O) para evitar emanaciones de cloro gaseoso al medio ambiente. El contenido de aire en el cloro depende directamente del estado de la cubierta de teflón.

El contenido de hidrógeno en el cloro depende de las características de la salmuera, concentración de amalgama de sodio, continuidad del flujo de mercurio y cortocircuito entre el ánodo y cátodo.

Tabla 5.3 Análisis volumétrico del cloro gaseoso

Cloro:	97.8 %
Hidrógeno:	0.2 %
Aire:	2.0 %

Enfriamiento, filtración, secado y compresión del cloro gaseoso

El cloro gaseoso producido en las celdas electrolíticas se encuentra caliente y contiene vapor de agua. El cloro gaseoso es sometido a las operaciones de enfriamiento, secado y compresión para su posterior uso.

Enfriamiento del cloro

La finalidad del enfriamiento es reducir el contenido de humedad del cloro. El enfriamiento del cloro gaseoso se realiza en dos intercambiadores de calor. Allí, el cloro gaseoso circula por el interior de los tubos de titanio, en tanto que el agua circula por la coraza. El enfriador primario usa agua proveniente de una torre de enfriamiento de tiro forzado, y el secundario emplea agua subenfriada.

El cloro gaseoso húmedo se hidrata (Cl₂.8H₂O) por debajo de 9.6 C. Por

consiguiente, en el enfriador secundario, la temperatura no debe ser inferior a 12 C. De ocurrir lo contrario, el agua de hidratación pasaría la torre de secado y causaría la erosión de las partes móviles del compresor de cloro. Además, el cloro líquido que se produce sería corrosivo por la presencia de agua.

Filtración del cloro húmedo

La filtración del cloro tiene por finalidad retener la niebla y partículas en suspensión.

Secado del cloro

El secado del cloro húmedo tiene por finalidad eliminar el vapor de agua del cloro gaseoso. El secado del cloro se realiza en dos torres de secado instaladas en serie designadas como etapas de ácido sulfúrico débil (75 %) y fuerte (95 %). Cada etapa tiene un lecho cerámico vaciado al azar de monturas *berl*.

El flujo de ácido sulfúrico es en contracorriente con el gas cloro. El ácido sulfúrico ingresa por la parte superior, en tanto que el gas cloro ingresa por la parte inferior. Al interior de la torre de secado se encuentra el relleno de monturas *berl* que es usado como medio de transferencia de masa para poner en contacto las fases líquida y gas.

El ácido sulfúrico (solvente) absorbe el vapor de agua (solute) que arrastra el cloro húmedo. En la fase gas saliente hay un cloro seco (con mínima cantidad de vapor de agua). El ácido sulfúrico se calienta debido a la dilución. Para su recirculación se enfría en un intercambiador de calor.

Compresores de cloro

El vacío en las celdas electrolíticas, enfriadores de cloro y las torres de secado se genera en compresores tipo centrífugo que utilizan el ácido sulfúrico como sello líquido y refrigerante.

Por ningún motivo el ácido sulfúrico al interior del compresor de cloro debe ser usado para secar dicho gas. En la operación de compresión el ácido sulfúrico se calienta y sale del compresor con cloro, ambos fluidos son separados por gravedad en un tanque.

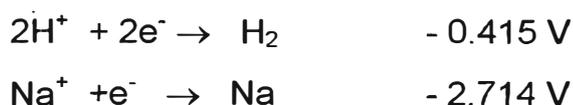
El ácido sulfúrico caliente se enfría e ingresa por la línea de succión al compresor, en tanto que el cloro pasa por un filtro de cloro seco y es derivado hacia las plantas de ácido clorhídrico, cloro líquido, hipoclorito de sodio y cloruro férrico.

H. FUNDAMENTO TEÓRICO

Consideraciones para la selección del mercurio como cátodo

La disolución de cloruro de sodio en agua posee los iones Cl^- , Na^+ , H^+ y OH^- . Si dicha solución se somete a una electrólisis usando un cátodo de platino o hierro se obtiene los siguientes potenciales de reducción:

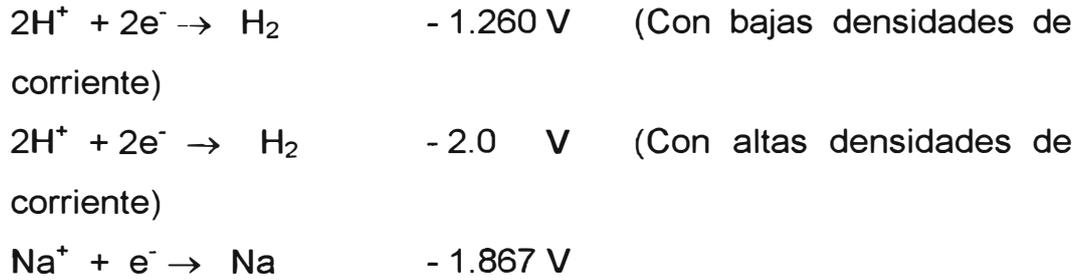
Potenciales de reducción con cátodo de platino:



De los potenciales de reducción, el ion hidrógeno se reduce en primer lugar debido a que su potencial es menos negativo que del ion sodio. Sin

embargo, si se utiliza el cátodo de mercurio, se obtendría los siguientes potenciales de reducción:

Potenciales de reducción con cátodo de mercurio:



En la industria electroquímica, la electrólisis se lleva a cabo con altas densidades de corriente. Según los potenciales de reducción arriba indicados, el ion sodio se reduce en primer lugar debido al menor potencial que el del ion hidrógeno.

Por consiguiente, en la electrólisis del cloruro de sodio cuya finalidad es producir soda cáustica, cloro e hidrógeno se utiliza mercurio metálico como cátodo móvil.

Polarización de un circuito de celdas

Por polarización de un circuito de celdas se entiende que el circuito mismo se mantenga en tensión de 3.1 – 3.2 voltios a una carga muy baja.

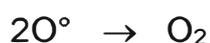
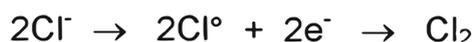
Bajo estas condiciones, el mercurio esta protegido catódicamente y las pérdidas se reducen al mínimo.

La polarización es aconsejable cada vez que se paran las plantas de utilización del cloro.

Durante la polarización, todos los tapones que llevan los manómetros deben retirarse con la finalidad de permitir el ingreso de aire para diluir el hidrógeno contenido en el gas de las celdas. Bajo estas condiciones, una cantidad tan pequeña de hidrógeno presente podría resultar demasiado alta en comparación con la pequeña cantidad de cloro producida, que en su mayoría se disuelve en la salmuera.

REACCIONES EN LA CELDA ELECTROLÍTICA:

Reacciones en el ánodo



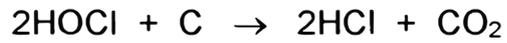
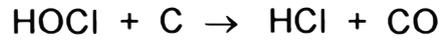
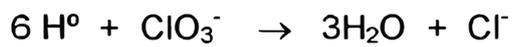
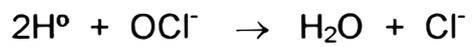
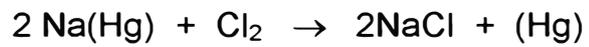
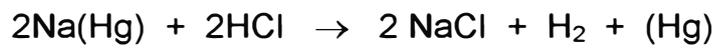
Reacciones en el cátodo



Reacciones químicas:

Al interior del electrolito



En el ánodo**En el cátodo**

5.2 PRODUCCIÓN DE CLORO LÍQUIDO

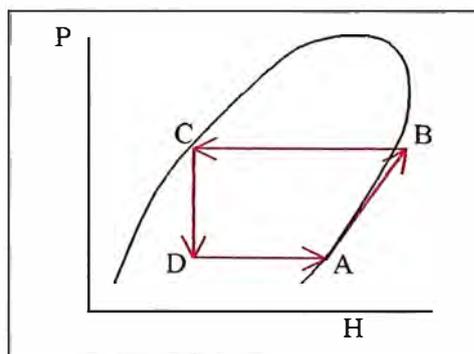
El vapor de freón frío proveniente del evaporador es alimentado al **compresor** donde es comprimido a entropía constante (línea AB, diagrama PH) con un incremento de temperatura.

El gas caliente va hacia el **condensador** donde se enfría y cambia de fase, de vapor a líquido siguiendo la isobara (línea BC), de manera que del condensador sale el líquido saturado (punto C, diagrama PH).

El líquido es alimentado a la **válvula de expansión** donde su presión cae. Debido, precisamente, a la caída de presión algo de freón se evapora tomando la energía necesaria del freón líquido. Por consiguiente, el freón líquido disminuye su temperatura. La expansión del freón se considera que se realiza a entalpía constante (línea CD)

El freón líquido es alimentado al **evaporador** de freón donde se evapora por intercambio de calor con el fluido a enfriar. La evaporación del freón se produce a presión constante (línea DA). Posteriormente el vapor de freón frío se alimenta a la línea de succión del compresor reiniciando el ciclo.

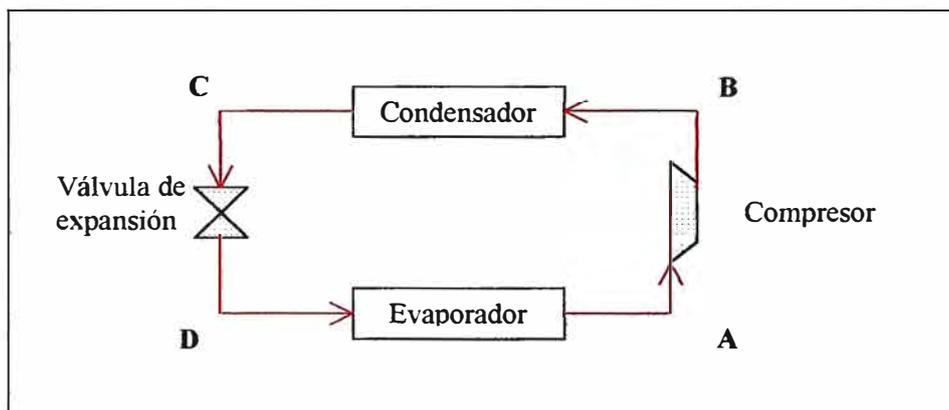
Fig. 5.3 Ciclo de refrigeración por compresión de vapor
Diagrama presión – entalpía (PH)



A. PRINCIPALES COMPONENTES DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR

- Compresor de freón.
- Condensador de freón.
- Válvula de expansión.
- Evaporador de freón.

Fig. 5.4 Principales componentes del ciclo de refrigeración por compresión de vapor.



COMPRESOR

El vapor frío de freón proveniente del evaporador y el aceite que sale del enfriador son alimentados al compresor donde incrementan su presión y temperatura. Ambos fluidos son derivados a un tanque separador, el freón gas por ser más liviano sale por la parte superior, en tanto que el aceite sale por la parte inferior. Una pequeña cantidad de aceite es arrastrada por el freón debido a la miscibilidad de ambos.

La temperatura del freón y el aceite en la descarga del compresor debe ser mayor en 20 C a la temperatura de condensación del freón, con la finalidad de permitir la separación del aceite y el freón. En la descarga del

compresor la presión es de 13.2 atm y 50 C, siendo la temperatura de condensación del freón 34 C.

La temperatura del aceite y freón en 50 C se logra debido a un calentador ubicado en el tanque separador de aceite y freón.

El freón es derivado hacia el condensador, la válvula de expansión y evaporador.

El aceite se filtra para retener las partículas en suspensión y se enfría para retirar la energía ganada en la compresión. Posteriormente el aceite se alimenta al compresor.

El sistema de lubricación del compresor esta diseñado para utilizar la diferencia de presión que tiene el aceite entre el tanque separador de éste (presión de descarga del compresor) y una presión intermedia interna del compresor. Con esto se suministra aceite a los cojinetes, sello de los ejes, partes móviles del compresor. El aceite, además de lubricación, sirve para enfriar el compresor.

El compresor es del tipo tornillo que posee dos rotores móviles (macho y hembra). El rotor hembra transmite el movimiento al rotor macho. La capacidad del compresor depende de la posición de la válvula deslizante y las condiciones de operación. La válvula deslizante permite recircular freón gas entre la cámara de compresión y la línea de descarga del compresor.

El compresor se encuentra a plena capacidad cuando la válvula deslizante se encuentra cerrada, y al 20% de capacidad cuando esta abierta.

La unidad tiene un regulador de capacidad del tipo *STAELECTRONIC* 300, que trabaja de manera directa con el sensor de temperatura de freón que se encuentra ubicado en el evaporador.

Dependiendo del requerimiento de producción de cloro líquido en forma manual se prefija la temperatura de freón en el evaporador. Cuando la temperatura de freón se encuentra por encima del valor prefijado, el número de diodos prendidos se incrementa; y si ocurre lo contrario, el número de diodos se reduce.

La unidad consta de seis diodos los cuales nos indican en forma indirecta la posición de la válvula deslizante. Un diodo encendido indica que la válvula deslizante se encuentra abierta (existe la máxima recirculación de freón en el compresor y el compresor se encuentra al 20% de su capacidad). A medida que se incrementa el número de diodos prendidos la válvula deslizante en forma parcial se va cerrando. Si los seis diodos se encuentran prendidos la válvula deslizante esta cerrada (no existe recirculación) y el equipo de licuado esta a plena capacidad.

El amperaje del motor del compresor está directamente relacionado con el número de diodos prendidos, el mínimo amperaje corresponde a un diodo prendido y el máximo a los seis diodos prendidos.

La temperatura del freón en la línea de succión del compresor (evaporador de freón) por ningún motivo debe ser inferior a -30 C , de ocurrir ello el compresor saldrá de servicio señalizando baja presión de freón en la línea de succión.

Esta anomalía se presenta por el alto contenido de incondensables en el cloro, nulo ingreso de cloro o acumulación de gases incondensables en el condensador de cloro (evaporador de freón). Para evitar la salida de

servicio por este motivo, la unidad dispone de un sistema automático de alimentación de freón gas hacia el evaporador de freón.

En el filtro, la máxima caída de presión del aceite es de 0.6 bar.

Coeficiente de funcionamiento (COP)

El coeficiente de funcionamiento de un refrigerante es la relación de la energía absorbida durante la evaporación con la energía consumida en el compresor.

Este valor depende de las propiedades físicas y térmicas del refrigerante.

CONDENSADOR

Con la finalidad de enfriarlo y condensarlo, el freón gas de alta presión es alimentado a un intercambiador de calor, Freón – Agua. La condensación del freón toma lugar en la parte externa de los tubos, en tanto que el agua de enfriamiento circula por la parte interna.

El freón líquido se almacena en un tanque donde existe freón líquido y vapor. Dicho tanque posee un control indicador de nivel de freón líquido cuya válvula de control es la válvula de expansión. Cuando el nivel sube la válvula de expansión incrementa su porcentaje de abertura, y cuando baja disminuye su porcentaje de abertura.

El freón líquido que se deriva hacia la válvula de expansión pasa a través de un filtro secador para eliminar la humedad y evitar la presencia de partículas en suspensión en la válvula de expansión.

La presión en el condensador se incrementa cuando el freón contiene incondensables (aire).

El condensador de freón dispone de una válvula de seguridad.

VÁLVULA DE EXPANSIÓN

La válvula de expansión es un dispositivo cuya función principal es provocar una caída súbita de presión en el fluido cuando éste pasa a través de la válvula.

Al pasar el freón líquido por la válvula de expansión, la presión del freón se reduce y algo de freón se vaporiza. Como consecuencia de lo anterior, la temperatura del freón líquido se reduce. Luego, el freón líquido es alimentado al evaporador de freón.

La unidad está equipada con dos válvulas de expansión: una de ellas, está enlazada con el control indicador de nivel del tanque de freón líquido, y la otra, es de control manual, que se utiliza cuando la primera tiene algún desperfecto o sale para su mantenimiento respectivo.

EVAPORADOR

Con la finalidad de evaporar el freón líquido, este fluido es alimentado a un intercambiador 1-3, un paso por el casco y tres por los tubos, freón – cloro. La evaporación del freón toma lugar en la parte externa de los tubos, en tanto que el vapor de cloro pasa al estado líquido en el interior de los tubos.

La mayor cantidad de producción de cloro líquido se produce cuando el cloro circula por el primer paso; en el segundo y tercer paso, la producción cae debido a la menor cantidad de tubos, mayor proporción de incondensables, reducción de la presión parcial y temperatura de condensación del cloro.

La alimentación de incondensables y vapor de cloro es a 3 atm de presión y 37.8 C. Al ingresar al condensador de freón, se enfría y la primera gota de cloro líquido se produce a -7.8 C. A medida que se produce cloro líquido la presión parcial del cloro en los gases disminuye y, de igual manera, su temperatura de condensación hasta -12.2 C. La presión de los gases a la salida del condensador es de 2.95 atm debido a la caída de presión y purga de incondensables de la línea.

La tasa de producción de cloro líquido depende fundamentalmente de la pureza del vapor de cloro, presión en la línea del cloro y la temperatura del freón en el evaporador del mismo.

Las impurezas que contiene el cloro gaseoso (nitrógeno, oxígeno e hidrógeno) son incondensables en las condiciones que se produce el cloro líquido. Por consiguiente, estos gases, incluso el cloro remanente, se purgan del tercer paso de los tubos hacia la línea de succión de los compresores de cloro.

El evaporador de freón dispone de una válvula de seguridad.

B. ALMACENAMIENTO DE CLORO LÍQUIDO

El cloro líquido producido es almacenado en un tanque de acero inoxidable que se encuentra aislado externamente.

La producción de cloro líquido es continua, en tanto que el almacenamiento se realiza por lotes, y para ello se dispone de dos tanques. La capacidad máxima de almacenamiento de cada tanque es del 75% de su volumen interior debido a que el cloro líquido tiene un elevado coeficiente de dilatación.

Tabla 5.4 ANOMALÍAS EN LA UNIDAD

Síntoma	Causa	Solución
a) Compresor no arranca	Línea de fuerza abierta.	Revisar la conexión.
	Fusible de control abierto.	Revisar la línea a tierra o en corto.
	El interruptor de operación está abierto.	Cerrar el interruptor.
	Falla en el sistema de regulación.	Reparar el sistema de regulación.
	Baja temperatura de aceite.	
	Baja presión de succión.	
	Alta presión en el condensador.	
	Alta temperatura de descarga.	
	Alto amperaje del motor.	
	Alta temperatura del motor.	
b) El motor se para luego de 30 segundos de operación	Bajo nivel de aceite o insuficiente flujo de aceite.	Ver j y k
	Filtros de aceite sucios.	Limpiar o reemplazar los filtros de aceite.

Síntoma	Causa	Solución
c) El motor se para luego de 60 segundos de operación	Baja presión de succión.	Ver I
d) Alto amperaje del motor	Condiciones de operación fuera de los límites de diseño.	Ajustar las condiciones de operación.
	Falla del motor	Revisar el circuito eléctrico y/o motor
e) Alta temperatura del motor	Deficiente suministro de aire de enfriamiento.	Verificar el suministro de aire.
	El compresor opera fuera del rango permisible.	Ajustar las condiciones de operación.
	Ha fallado una fase del suministro eléctrico.	Reparar la falla.
f) Capacidad del compresor demasiada alta o baja	El pistón de control de capacidad está pegado.	Reparar.
	La válvula solenoide está sucia o defectuosa.	Limpiar o reparar la válvula.
	Falla en el equipo de regulación.	Reparar el equipo de regulación.
g) Sonido anormal del compresor	Daño de los rodajes, anillos, etc.	Reparar.
	Líquido en la línea de succión.	Revisar el nivel de freón en el sistema.

Síntoma	Causa	Solución
h) Alta temperatura de descarga	Insuficiente aceite de enfriamiento.	Incrementar el flujo de aceite.
	Insuficiente carga de refrigerante.	Adicionar refrigerante y eliminar fugas del mismo.
	Alta temperatura del gas en la línea de succión.	Resetear la válvula de expansión.
i) Baja temperatura de aceite	Demasiado flujo de agua de enfriamiento .	Reducir el flujo de agua.
	Falla del calentador.	Reemplazar el calentador.
	Termostato del calentador de aceite esta fallando.	Reparar o reemplazar el calentador.
j) Alta caída de presión a través de los filtros	Filtro de aceite en el compresor está sucio.	Reemplazar filtro.
	Filtro de aceite en el tanque separador esta sucio.	Limpiar filtro.
k) Bajo nivel de aceite en el tanque separador	Calentador de aceite en mal estado.	Reparar o reemplazar el calentador.
	Temperatura de descarga demasiada baja (ocasiona arrastre de aceite).	Regular la válvula de expansión.
	Temperatura del medio ambiente demasiada baja.	Aislar el tanque separador de aceite y freón.

Síntoma	Causa	Solución
l) Baja presión de succión	Capacidad del compresor demasiada alta.	Regular la capacidad.
	El filtro de freón líquido o gas se encuentra obstruido.	Limpiar o reemplazar el filtro.
	Falta de refrigerante.	Adicionar refrigerante y verificar las posibles fugas del refrigerante.
	Alta concentración de aceite en el evaporador.	Drenar y recuperar el aceite del evaporador.
	El evaporador está sucio o requiere descongelar.	Limpiar o descongelar el evaporador.
	Falla en el sensor de presión.	Revisar el sensor.
	Interruptor de baja presión prefijado demasiado alto.	Resetear el interruptor de baja presión.
m) Alta presión en el condensador	Deficiente flujo de agua de enfriamiento en el condensador.	Incrementar el flujo de agua.
	Excesiva carga de refrigerante.	Retirar el exceso de refrigerante.
	No condensables en el sistema.	Eliminar los no condensables.
	Interruptor de alta presión prefijado demasiado bajo.	Resetear el interruptor de alta presión.
	Las tuberías del condensador se encuentran sucias.	Limpiar las tuberías.
	El compresor opera a baja capacidad.	Resetear el control de capacidad.

Síntoma	Causa	Solución
n) Alta temperatura en la línea de succión	Recalentamiento del refrigerante en la línea de succión.	Resetear la válvula de expansión.
	Poco refrigerante.	Adicionar refrigerante.
	Presencia de refrigerante en la línea de succión.	Resetear la válvula de expansión.
o) Baja temperatura en la línea de succión	El sensor de temperatura se encuentra mal ubicado.	Reubicar el sensor.
	Demasiado flujo de aceite.	Reducir el flujo de aceite.
p) Baja temperatura de descarga	Presencia de refrigerante en la línea de succión.	Resetear la válvula de expansión.

Tabla 5.5 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Equipo	Ítem	und	Freón 22		Cloro		Agua	
			In	Out	In	Out	In	Out
Compresor de freón	Presión abs.	atm	1.98	13.2	-	-	-	-
	Temperatura	C	-25	50	-	-	-	-
	Entropía	kcal/kg. C	0.42	0.535	-	-	-	-
	Entalpía	kcal/kg	94.3 (v)	106.8 (v)	-	-	-	-
Condensador de freón	Presión abs.	atm	13.2	13.2	-	-	2.5	2.4
	Temperatura	C	50	34	-	-	23	26
	Entropía	kcal/kg. C			-	-		
	Entalpía	kcal/kg	106 (v)	57.7 (l)	-	-		
Válvula de expansión	Presión abs.	atm	13.2 (l)	1.98 (l-v)	-	-	-	-
	Temperatura	C	34	-25	-	-	-	-
	Entropía	kcal/kg. C			-	-	-	-
	Entalpía	kcal/kg	57.7 (l)	57.7 (l-v)	-	-	-	-
Evaporador de freón	Presión abs.	atm	1.98	1.98	3.0	2.95	-	-
	Temperatura	C	-25	-25	37.8		-	-
	Entropía	kcal/kg. C					-	-
	Entalpía	kcal/kg	57.7 (l-v)	94.3 (v)			-	-

Las propiedades termodinámicas del freón 22 y el cloro se encuentran en el apéndice.

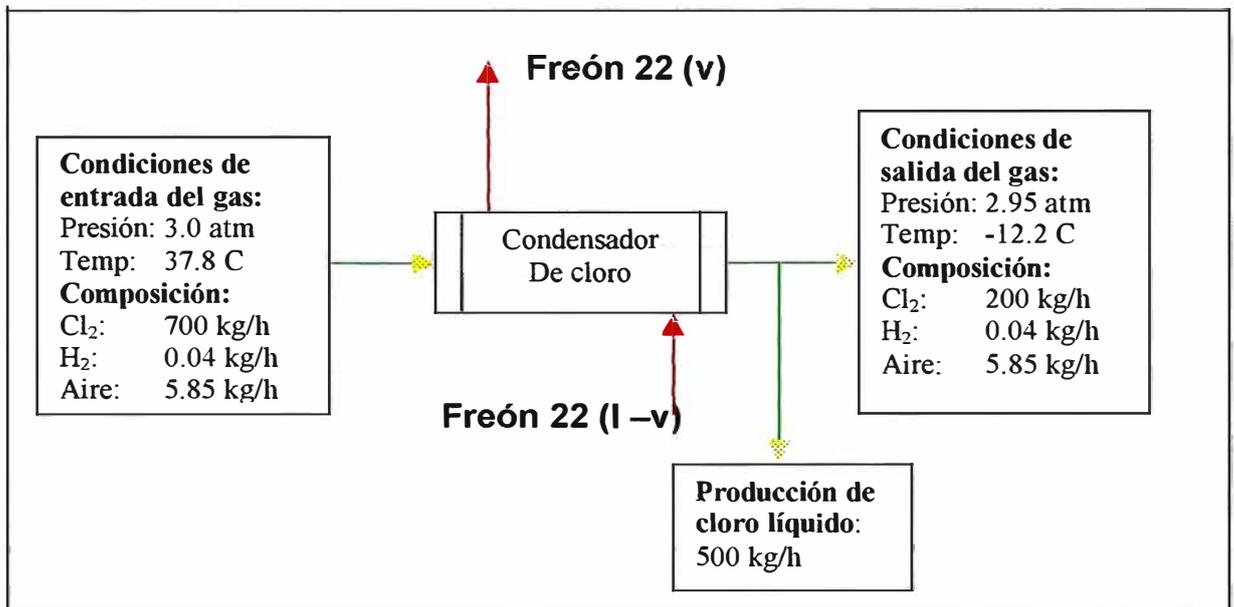
C. BALANCE DE MASA Y ENERGÍA

Determinación del flujo de freón, agua y coeficiente de performance (COP).

El balance de materia y energía se realiza para las condiciones de operación indicadas en el cuadro:

Producción de cloro líquido: 500 kg/h

Fig. 5.5 Balance de masa y energía en el condensador de cloro



Determinación del flujo de calor a retirar en la condensación del cloro:

Condiciones de entrada del cloro:

Presión: 3.0 atm

Temperatura: 37.8 C

Composición del gas:

Cloro:	700 kg/h	9.859 kmol/h	0.97798 kmol/kmol
Hidrógeno:	0.04 kg/h	0.02 kmol/h	0.00198 kmol/kmol
Aire:	5.852 kg/h	0.202 kmol/h	0.02004 kmol/kmol

El vapor de cloro y los incondensables al ingresar al evaporador de freón se enfrían, posteriormente el cloro inicia la condensación a la temperatura de rocío.

Determinación del punto de rocío:

$$\text{Presión parcial del cloro} = \text{Composición} * \text{Presión total}$$

$$\text{Presión parcial del cloro} = 0.97798 * 3 \text{ atm.}$$

$$\text{Presión parcial del cloro} = 2.9339 \text{ atm.}$$

$$\text{Presión parcial del cloro} = 297.3 \text{ kPa.}$$

Del gráfico "**Presión de vapor del cloro saturado**" para una presión de vapor de 297.3 kPa se obtiene una temperatura de -7.8 C.

A la salida del evaporador de freón, la temperatura de rocío es de -12.2 C (usando la misma forma de cálculo de la determinación del punto de rocío con la composición del gas a la salida).

Para el balance de masa y energía se va considerar que el cloro se condensa a -12.2 C . Esta suposición no introduce mayores errores en el cálculo.

$$Q = m * C_p * \Delta T$$

Donde:

Q: (kcal/h) Calor.

M: (kg/h) Flujo másico.

C_p: (kcal/kg * C) Capacidad calorífica.

Δt: (C) Diferencia de temperatura.

Q Hidrógeno = -7.0 Kcal/h

Q aire = -71.7 Kcal/h

Q Cloro = -36825 kcal/h (Q sensible + Q latente)

Q Condensación = Q Hidrógeno + Q Aire + Q Cloro

Q Condensación = -36903.7 kcal/h

Propiedades físicas:

Calor latente del cloro: 65.6 kcal/kg

C_p Hidrógeno: 3.5 kcal/kg * C

C_p Cloro: 0.115 Kcal/kg * C

C_p Aire: 0.245 kcal/kg * C

C_p Agua: 1.0 kcal/kg * C

Determinación del flujo de freón 22:

Entalpía de entrada: 57.7 kcal/kg C

Entalpía de salida: 94.3 kcal/kg C

Variación de entalpía: (out – in): 36.6 kcal/kg

$$Q \text{ Evaporación} = F \text{ Freón} * \Delta H \text{ Freón}$$

Donde:

F Freón: (kg/h) Flujo de freón 22.

ΔH Freón: (kcal/kg) Variación de entalpía.

$$Q \text{ Evaporación} + Q \text{ Condensación} = 0$$

(considerando un proceso adiabático)

$$F \text{ Freón} * \Delta H \text{ Freón} - 36903.7 = 0$$

$$F \text{ Freón} = 1008.2 \text{ kg/h}$$

Balance de masa y energía en el condensador de freón22:

Entalpía de entrada: 106.8 kcal/kg C

Entalpía de salida: 57.7 kcal/kg C

Variación de entalpía: (out – in): 49.1 kcal/kg

$$Q \text{ Condensador de freón} = F \text{ Freón} * \Delta H \text{ Freón}$$

$$Q \text{ Condensador de freón} = 49502.6 \text{ kcal/h}$$

Determinación del flujo de agua:

$$Q \text{ agua} = m \text{ agua} * C_p \text{ agua} * \Delta T \text{ agua}$$

$$Q \text{ Agua} = m * 1.0 \text{ kcal}/(\text{kg} * \text{C}) * (26 - 23) \text{ C}$$

$$Q \text{ Agua} = Q \text{ condensador de freón}$$

$$m \text{ agua} = 16500 \text{ kg/hr} = 16.5 \text{ m}^3/\text{h}$$

Determinación de la potencia del compresor de freón**Condiciones de operación:**

Amperaje : 150 A

Voltaje por línea: 440 V

Potencia: 114 kW

Coefficiente de funcionamiento (COP):

$$\text{COP} = (h_a - h_d) / (h_b - h_a)$$

$$\text{COP} = (94.3 - 57.7) / (106.8 - 94.3)$$

$$\text{COP} = 2.93 \text{ Kcal retirado / kcal consumido}$$

5.3 PRODUCCIÓN DE ÁCIDO CLORHÍDRICO

El cloro e hidrógeno gaseoso ingresan a la **cámara de combustión** del horno donde reaccionan y forman el cloruro de hidrógeno. Para asegurar una combustión completa del cloro, el hidrógeno siempre está en exceso.

Este cloruro de hidrógeno pasa a través de los **dados de absorción** (torre de paredes mojadas) donde, como su nombre lo dice, se realiza la absorción de dicho gas por el agua.

Por la parte superior de la **torre de colas** se alimenta la cantidad necesaria de agua blanda para la producción de ácido clorhídrico al 33 %. Por la parte inferior de la torre de colas se obtiene ácido clorhídrico diluido (4 %), el cual se alimenta a los dados de absorción.

En la torre de colas se completa la absorción del cloruro de hidrógeno que logra pasar los dados de absorción.

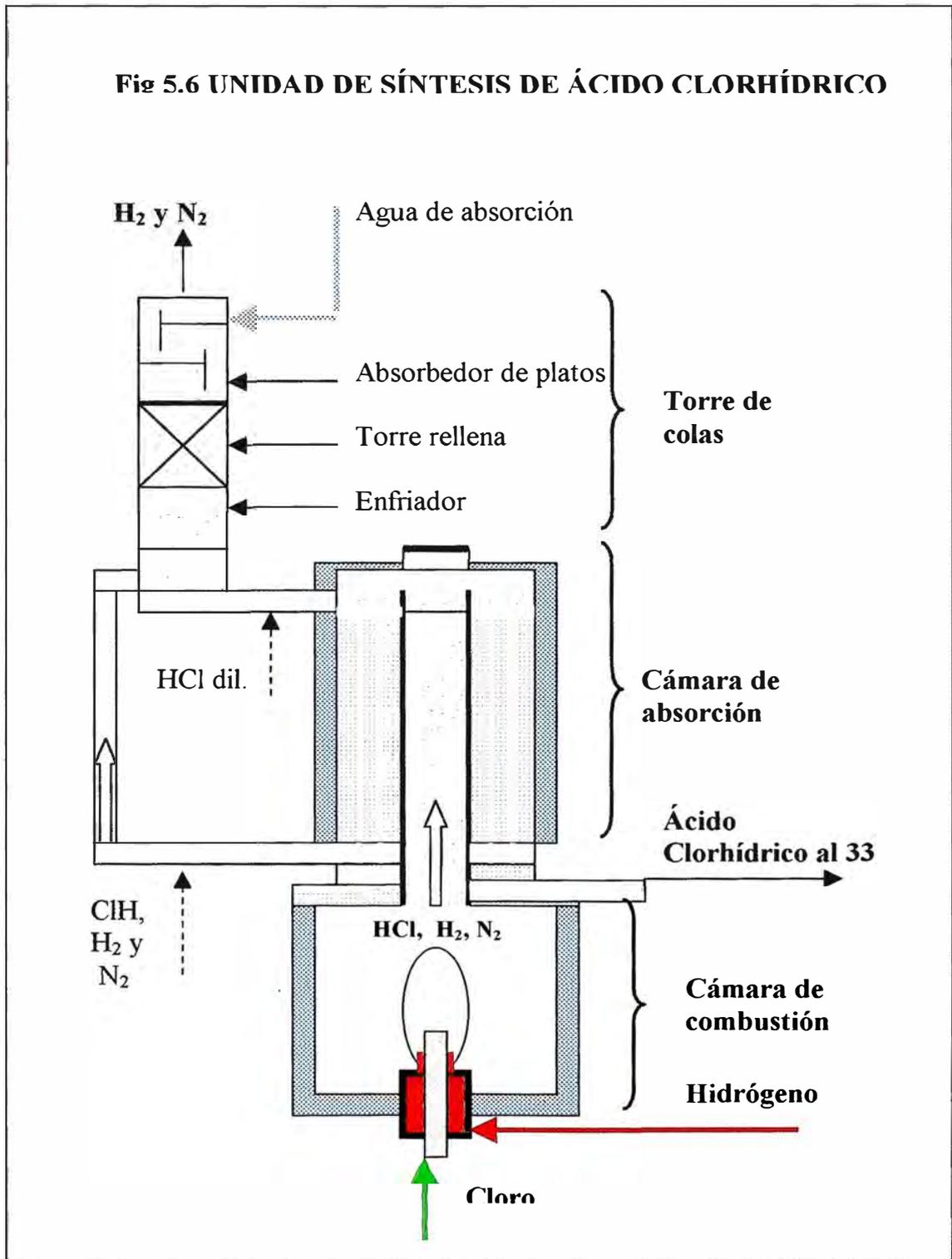
El agua de absorción ingresa por la parte superior de la torre de colas. El flujo de agua de absorción es regulable mediante válvula neumática, con la finalidad de obtener el ácido clorhídrico a una concentración del 33 %.

La unidad de síntesis de ácido clorhídrico se encuentra equipada con controladores indicadores de flujo de hidrógeno, cloro y agua de absorción. De tal forma que cuando se requiere variar los parámetros de operación únicamente se prefija el *set point* de hidrógeno. Al variar el flujo de hidrógeno, varía el del cloro y el del agua.

En caso de extinguirse la combustión, la unidad de síntesis dispone de un sistema de seguridad que consiste en el cierre de la válvula neumática de cloro e hidrógeno y abertura (**por 40 seg.**) de la válvula neumática de

nitrógeno. El nitrógeno tiene la finalidad de evitar la formación de mezcla explosiva con los gases remanentes. Inmediatamente después de apagada la unidad, se procede a purgar los gases del horno.

Quimpac S.A. tiene tres unidades de síntesis marca **Sigri**.



A. ELEMENTOS DE LA UNIDAD DE SÍNTESIS

- Cámara de combustión.
- Torre de absorción.
- Torre de colas.

CÁMARA DE COMBUSTIÓN

En la **cámara de combustión**, el cloro e hidrógeno arden para producir cloruro de hidrógeno según la siguiente reacción exotérmica.



Para asegurar la completa combustión del gas cloro se alimenta hidrógeno gas en exceso (10%) para asegurar que no haya emisiones de cloro al medio ambiente. Al mismo tiempo se impide la formación de mezclas explosivas en la torre de colas, las que se generan cuando la unidad trabaja algunas veces con exceso de hidrógeno o cloro.

La combustión del cloro e hidrógeno es un proceso exotérmico, la energía que se genera es retirada con el agua fría proveniente de una torre de enfriamiento. Dicha energía se calcula en forma aproximada mediante la siguiente relación:

$$Q = P \times 1000.$$

Donde:

- Q: (kcal/h) Energía que se genera en la combustión del cloro e hidrógeno y absorción del cloruro de hidrógeno.
- P: (kg/h) peso de cloruro de hidrógeno producido.

Debido a que las celdas electrolíticas operan con una presión por debajo de la presión atmosférica, la principal impureza del cloro es el aire (oxígeno y nitrógeno). El oxígeno, reacciona con el hidrógeno formando el vapor de agua según la siguiente reacción que es altamente exotérmica.



El nitrógeno presente es inerte y junto al hidrógeno se elimina al medio ambiente por la parte superior de la torre de colas.

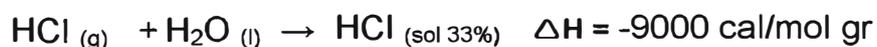
Temperatura de llama

Cuando el cloro e hidrógeno tienen una pureza mayor del 95% la temperatura de llama es del orden de **2500 C**. Normalmente el hidrógeno es puro, en tanto que la pureza del cloro podría ser menor de 95 %; de ser así se podrían presentar dos situaciones:

- La temperatura de llama es menor a 2500 C. Cuando el cloro contiene gases inertes (nitrógeno), los cuales no participan en la combustión.
- La temperatura de llama es superior a 2500 C. Cuando el cloro contiene oxígeno.

TORRE DE ABSORCIÓN

En la **torre de absorción**, el cloruro de hidrógeno pasa a través de los platos de absorción donde el agua absorbe dicho gas produciendo una solución al 33 % en peso de ácido clorhídrico mediante la siguiente reacción:



La absorción del cloruro de hidrógeno es exotérmica; por consiguiente, la torre de absorción también se enfría con agua proveniente de la torre de enfriamiento.

TORRE DE COLAS

Aún cuando la pureza del cloro es superior al 96 %, una mínima cantidad de cloruro de hidrógeno logra pasar la torre de absorción.

La presión parcial de cloruro de hidrógeno en los gases (nitrógeno, hidrógeno) que dejan los datos de absorción es insignificante, muy por debajo de las condiciones estándares (1 ppm). Sin embargo, de ninguna manera el cloruro de hidrógeno puede liberarse al medio ambiente. Por consiguiente, la Unidad de Síntesis de Ácido Clorhídrico está equipada con una torre de colas cuya función es absorber la totalidad de dicho gas.

El tamaño de la torre de colas depende directamente de las impurezas del cloruro de hidrógeno (nitrógeno, hidrógeno)

La torre de colas consta de:

- 1 intercambiador de calor.
- 1 torre empacada con relleno sintético de polipropileno.
- Absorbedor de 2 platos adiabáticos.

El **intercambiador de calor** sirve para enfriar los gases que pasan los datos de absorción, luego dicho gas pasa a través de la **torre empacada** donde parte del cloruro de hidrógeno es absorbido. Finalmente, el remanente de cloruro de hidrógeno burbujea en agua que contiene los **platos** donde se produce la total absorción de dicho gas. Adicionalmente, el vapor de agua formado en la combustión se condensa en los platos.

Los únicos gases que salen al medio ambiente de las unidades de síntesis son el hidrógeno y nitrógeno, el primero es el reactivo en exceso en tanto que el segundo es un gas inerte.

Tabla 5.6 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Flujo de agua de absorción	lt/h	4 100
Flujo de hidrógeno	m ³ /h	627
Presión de hidrógeno	bar	0.120
Flujo de cloro	m ³ /h	575
Presión de cloro	bar	0.250
Concentración de ácido clorhídrico	%	34.5
Contenido de cloro	ppm	35
Razón de hidrógeno / cloro	m ³ /m ³	1.09
Temperatura del agua de enfriamiento (in / out)	C	21 / 35
Calor de reacción y absorción	kcal/h	2 220 374
Caudal de agua de enfriamiento	m ³ /h	158

B. FACTORES QUE AFECTAN LA ABSORCIÓN DEL CLORURO DE HIDRÓGENO

Incremento de la eficiencia de absorción

La eficiencia de absorción se incrementa cuando la presión parcial de cloruro de hidrógeno en el gas a ser absorbido es mayor a la presión de vapor del cloruro de hidrógeno de la solución.

La presión de vapor de cloruro de hidrógeno en la solución se reduce bajando su temperatura (incrementando el flujo del agua de enfriamiento) y concentración (incrementando el flujo de agua de absorción). Ambas acciones incrementan la eficiencia de absorción.

Si el cloruro de hidrógeno contiene baja cantidad de gases inertes, hidrógeno y nitrógeno, la presión parcial del cloruro de hidrógeno se incrementa mejorando la absorción.

Disminución de la eficiencia de absorción

La eficiencia de absorción se reduce cuando la presión parcial del cloruro de hidrógeno decrece en forma significativa porque éste contiene demasiados gases inertes. En consecuencia, la concentración del ácido clorhídrico producido es inferior al 33 %.

Si el cloruro de hidrógeno contiene demasiados gases inertes, cuando se quiera concentrar la solución disminuyendo el flujo de agua de absorción se obtendrá un ácido de más baja concentración, y gran parte del cloruro de hidrógeno que no es absorbido irá al medio ambiente.

C. MEJORAS EN LAS UNIDADES DE SÍNTESIS DE ÁCIDO CLORHÍDRICO

Instrumentación (año 1995 al 2001)

Reemplazo de los controladores indicadores de flujo de hidrógeno, cloro y agua de absorción de accionamiento neumático por instrumentos electrónicos. Además, el reemplazo del indicador de flujo de agua de enfriamiento.

Instalación del indicador redox (indica el valor del cloro libre en el ácido clorhídrico).

Quemador de hidrógeno (año 2000)

El quemador original de hidrógeno se cambió por el quemador tipo "**spin device**" que permite una combustión completa del cloro con menor exceso de hidrógeno.

Torre de colas (año 2000)

La torre de colas que consiste de un enfriador de gases, una torre rellena y platos de absorción reemplazó a la original que solo disponía de la torre rellena de anillos *raschig*.

D. LA UNIDAD DE SÍNTESIS SALE DE SERVICIO POR LOS SIGUIENTES MOTIVOS:

- Falla de alimentación eléctrica.
- Baja presión del aire de instrumentación.
- Cierre de la válvula de cloro o hidrógeno.
- Baja presión de cloro o hidrógeno.
- Bajo flujo del agua de absorción.
- Extinción de la llama.
- Insuficiente agua de enfriamiento.
- Explosión del disco de ruptura.

En todos los casos el sistema de seguridad cierra la válvula neumática de alimentación de cloro e hidrógeno y abre la de nitrógeno con la finalidad de hacer un venteo interior (eliminar el hidrógeno residual).

5.4 HIPOCLORITO DE SODIO

La producción de hipoclorito de sodio es un proceso por lotes. Para este fin se dispone de dos torres rellenas con anillos *raschig* empacadas al azar. Los anillos *raschig* son de PVC.

En la producción de hipoclorito de sodio una torre se encuentra en servicio (con circulación de soda cáustica y cloro), mientras que en la otra la soda cáustica circula sin admisión de cloro.

La torre rellena tiene dos ventiladores, dos bombas y un intercambiador de calor. El ventilador sirve para generar vacío en la torre y en la línea de cloro con aire. La bomba se utiliza para circular la solución (soda cáustica e hipoclorito de sodio) en proceso. El intercambiador de calor sirve para enfriar la solución.

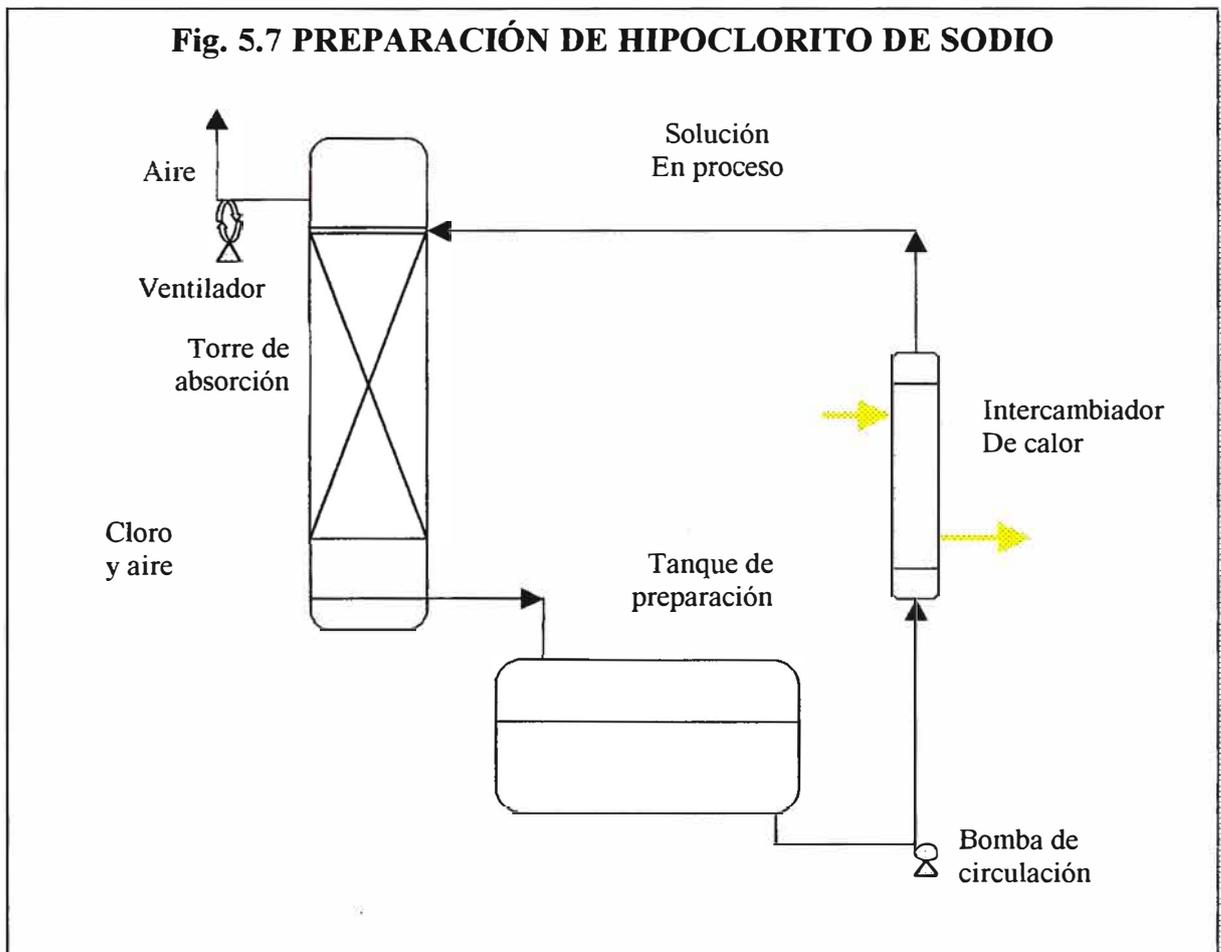
La concentración final del hipoclorito de sodio depende de la concentración inicial de la soda cáustica. Cuando la concentración inicial de la soda cáustica es de 185 gpl, la solución de hipoclorito de sodio tendrá una concentración de 120 gpl de cloro disponible. El cloro gaseoso contiene aire debido a que éste proviene de la dechloración de la salmuera.

El cloro y el aire ingresan por la parte inferior a la torre de absorción en tanto la soda cáustica ingresa por la parte superior de la torre. A medida que la soda cáustica cae a lo largo de la torre de absorción, reacciona con el cloro y forma el hipoclorito de sodio, mientras que por la parte superior de la torre sale aire libre de cloro.



Debido a que la reacción es exotérmica la temperatura de la solución se incrementa. Para enfriar la solución se emplea el intercambiador de calor. La temperatura de la solución depende del flujo de cloro. A mayor flujo de cloro mayor es la temperatura de preparación.

Durante la preparación del hipoclorito de sodio, la temperatura de la solución no debe ser superior a 45 C porque la estabilidad del producto depende de la temperatura de preparación.



A. ESTABILIDAD DEL HIPOCLORITO DE SODIO

La descomposición de la solución empieza desde la preparación. Y continúa hasta su total degradación. Sin embargo, la velocidad de la descomposición o la estabilidad depende de diversos factores:

- Concentración de la solución.
- Valor del pH de la solución.
- Temperatura de la solución, tanto en la preparación como en su almacenamiento.
- Concentración de ciertas impurezas que catalizan la descomposición.
- Exposición a la luz.

Concentración de la solución

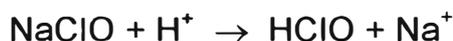
A menor concentración de hipoclorito de sodio su descomposición es más lenta.

Cuando las condiciones de almacenamiento son adversas, en un mismo intervalo de tiempo, las soluciones preparadas con alta concentración de soda tendrán más baja concentración final de hipoclorito de sodio que una preparada con baja concentración.

Valor del pH de la solución

La mayor estabilidad se obtiene con un valor de pH entre 9.5 y 10.5. Un leve exceso de soda tiende a proteger al hipoclorito de los efectos perjudiciales de la luz. Un exceso mayor al 0.5% en peso de soda tiende a descomponer al hipoclorito, retarda su efecto blanqueador y daña la ropa.

Cuando el valor del pH de la solución es inferior a siete se forma ácido hipocloroso y cloro gas.



Temperatura de la solución

Cuando la temperatura de la solución en la preparación es mayor a 45 C, el hipoclorito que se va produciendo se descompone. De igual manera cuando la temperatura de almacenamiento es elevada el hipoclorito de sodio se degrada según la siguiente reacción:



Concentración de ciertas impurezas

La calidad y estabilidad del hipoclorito de sodio depende de las impurezas. El níquel, cobre y cobalto forman óxidos insolubles que catalizan la descomposición del hipoclorito:



Sin embargo, el hierro, calcio o magnesio sedimentan y logran cambiar el color del hipoclorito de sodio.

Exposición a la luz

Si el producto está expuesto a los rayos solares este se degrada.

5.5 SERVICIOS AUXILIARES DE LA PLANTA CLORO SODA

A. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

La producción de hidrógeno, soda cáustica, cloro y sus derivados son procesos altamente exotérmicos; por consiguiente, para mantener un perfil de temperatura en las unidades de proceso es necesario retirar la energía que se genera. Con dicho fin el agua de enfriamiento se utiliza en un circuito cerrado donde la temperatura del agua se incrementa al pasar por las unidades de producción y se enfría al pasar a través de la torre de enfriamiento.

PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO

- El agua caliente ingresa a la torre de enfriamiento por la parte superior, donde se distribuye en forma homogénea al pasar a través de las **boquillas** para producir pequeñas gotas; esto permite disponer de una gran superficie para el contacto entre el aire y el agua.
- El agua desciende por acción de la gravedad a través de la torre donde existe un **relleno de madera**, cuya función es incrementar la superficie de contacto entre el agua y el aire al interior de la torre, ya sea distribuyendo el líquido sobre una gran superficie o incrementando el tiempo de residencia de las gotas de agua en la torre.
- En una torre de tiro inducido, por acción del **ventilador** el aire ingresa a través de las persianas. Al interior de la torre el aire incrementa su contenido de humedad, y sale a través del **abanico** a gran velocidad, de manera que se proyecta hacia arriba en dirección de las corrientes naturales de aire. De esta forma evita su asentamiento alrededor de la torre de enfriamiento.
- En la parte inferior de la torre existe una **bomba centrífuga** cuya función es distribuir el agua fría por las diferentes unidades de proceso con la finalidad de retirar la energía que se genera; entonces, el agua

caliente que sale de las unidades de proceso retorna a la torre para su enfriamiento.

Transferencia de calor

La operación de transferencia de calor comprende lo siguiente:

- Transferencia de **calor sensible**, que se debe a la diferencia de temperatura entre el agua y el aire. Éste último se calienta.

- Transferencia de **calor latente**, que es debido a la evaporación de una pequeña porción de agua.

El agua requiere energía para evaporarse (**calor latente**), esta energía lo toma del agua líquida; por consiguiente, el agua líquida se enfría al ceder parte de su energía para la evaporación del agua.

Cuando se evapora 1 gr de agua, 580 grs de agua se enfría en 1 C.

Enfriamiento del agua

El enfriamiento se debe a la evaporación del agua. Por tanto una pequeña porción del agua de enfriamiento debe ser purgada para evitar que se incremente la concentración de los sólidos en suspensión. De allí que es necesaria la reposición del agua de enfriamiento para compensar la pérdida por purga y evaporación.

La temperatura de agua fría que sale de la torre oscila entre 3 y 5 C por encima de la **temperatura de bulbo húmedo** dependiendo del ratio de producción.

La **temperatura de bulbo húmedo** es la temperatura más baja a la que el agua puede obtenerse por **humidificación** adiabática.

Se denomina **humidificación** al incremento de humedad del aire que se produce por evaporación del agua.

Tratamiento del agua

En el circuito de enfriamiento se usa agua blanda tratada para disminuir el ratio de incrustación y corrosión en las unidades de producción. El ratio de corrosión oscila entre 3 y 4 mpy.

TORRE MARLEY

Quimpac S.A. dispone de una torre de enfriamiento marca **Marley Company** con las siguientes **características y parámetros de operación**:

Torre de enfriamiento de tiro inducido

Procedencia: Estados Unidos

Flujo de agua: 1000 m³/h

Flujo de aire: 1020 m³/h

Capacidad instalada: 10 000 000 kcal/h

Temperatura de entrada de agua a la torre: 31 C

Temperatura de salida de agua de la torre: 21 C

Temperatura de aproximación: 4 C

Año de instalación y puesta en servicio: 1975

Labores de mantenimiento

Desde su instalación se han realizado las siguientes **labores de mantenimiento**:

- Cambio total del eliminador de niebla (año 1999). Con ello se logró eliminar la lluvia artificial alrededor de la torre.

- Cambio total del relleno de madera (año 2000). Con ello se logró incrementar la superficie de contacto agua-aire y el tiempo de residencia de las gotas.

B. AGUA INDUSTRIAL, DESMINERALIZADA Y BLANDA

AGUA INDUSTRIAL

El agua industrial se obtiene de un pozo profundo, una parte se usa en los procesos, y la otra en los servicios y mantenimiento de los jardines.

El agua industrial contiene diversos iones tales como el calcio, magnesio, cloruro, sulfato, etc.

AGUA DESMINERALIZADA

El agua desmineralizada se caracteriza por su bajo contenido de aniones y cationes. Para obtenerla, el agua industrial pasa a través de una columna rellena con resina catiónica y otra con resina aniónica.

La resina catiónica tiene afinidad por los cationes. Por ello, al pasar el agua industrial a través de esta columna el contenido de iones sodio, hierro, calcio y magnesio se reduce.

La resina aniónica tiene afinidad por los aniones. Por ello, al pasar el agua libre de cationes a través de esta columna el contenido de iones cloruro, sulfato y nitrato se reduce.

El agua industrial libre de los iones mencionados se hace burbujear con aire para eliminar el ácido carbónico.

La resina se satura con los cationes o aniones. Para restablecer su capacidad de intercambio iónico se realiza la regeneración de la resina catiónica con ácido clorhídrico (ion H^+) y agua industrial en tanto que la resina aniónica con hidróxido de sodio (ion OH^-) y agua desmineralizada.

El agua desmineralizada se utiliza para:

- Electrólisis del agua en el desamalgamador y dilución de la soda cáustica al 50%.
- Lavado de los filtros de grafito.
- Enfriamiento y sello hidráulico del mercurio.
- Preparación de floculante.

AGUA BLANDA

El agua blanda se caracteriza por su bajo contenido de los iones calcio y magnesio. Para su obtención, el agua industrial pasa a través de una columna rellena con resina catiónica que tiene afinidad por los cationes.

La resina retiene los iones calcio y magnesio bajando el contenido de dureza en el agua industrial.

La resina se satura y su capacidad de retención de dichos iones decrece. Para restablecer su capacidad de intercambio iónico la resina se regenera con una solución de cloruro de sodio, el ion sodio desplaza los iones calcio y magnesio de la resina. Posteriormente, la resina se lava con agua industrial para retirar el exceso de cloruro de sodio.

El agua blanda se utiliza para:

- Reposición del agua en el sistema de enfriamiento.
- Absorber el cloruro de hidrógeno en la unidad de síntesis del ácido clorhídrico.

- Dilución de soda cáustica (del 50 % al 20 %) que se utiliza en la preparación del hipoclorito de sodio.
- Preparación de salmuera.

VI. ANEXOS

- 6.1 Productos terminados de la Planta Cloro Soda
 - Características, especificaciones técnicas y usos
 - A. Hidróxido de sodio al 50%
 - B. Hidróxido de sodio al 97 - 98%
 - C. Hipoclorito de sodio
 - D. Ácido clorhídrico
 - E. Cloro líquido
- 6.2 Manipulación y transporte del cloro líquido
- 6.3 Propiedades termodinámicas del cloro
- 6.4 Propiedades termodinámicas del freón 22
- 6.5 Consumo unitario en la producción de cloro gaseoso
- 6.6 Usos básicos de los principales productos de la planta
 - Cloro Soda

HIDRÓXIDO DE SODIO

(SODA CÁUSTICA)
IMO 8
UN 1824

NaOH



UN 1824

3	Salud
3	Inflamabilidad
1	Reactividad
0	

0	Insignificante	3	Alto
1	Ligero	4	Extremo
2	Moderado		

CARACTERÍSTICAS

Solución líquida clara y viscosa, base fuerte altamente reactiva, higroscópica, ataca metales y aleaciones tales como el cinc, aluminio, cobre, plomo, bronce y latón.

El hidróxido de sodio reacciona violentamente con los ácidos y compuestos como el acrilonitrilo, acroleína, anhídrido maleico.

No es inflamable; puede formar compuestos explosivos como el dicloroacetileno por reacción con cloroetilenos.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS (*)

Alcalinidad total (como NaOH)	(%)	49.0- 50.0
Hidróxido de sodio (NaOH)	(%)	48.9- 49.8
Óxido de sodio (Na ₂ O)	(%)	38.0- 39.0
Cloruro de sodio (NaCl)	(%)máx.	0.15
Carbonato de sodio (Na ₂ CO ₃)	(%)máx.	0.20
Sulfato de sodio (Na ₂ SO ₄)	(%)máx.	0.096
Hierro (Fe)	(ppm)máx.	3.00
Apariencia		Limpia, transparente y clara.

(*) CONSULTAR NORMA ITINTEC N° 311.059

USOS

La soda cáustica se utiliza en las siguientes industrias:

- Papel.
- Producción de alúmina.
- Industria textil.

- Industria del rayón.
- Jabón y surfactantes.
- Química.
- Procesamiento de gas y petróleo.
- Tratamiento de agua.
- Sector alimenticio.

**SODA CÁUSTICA SOLIDIFICADA DE 97 - 99 %
(HIDRÓXIDO DE SODIO 97-99%)**

IMO 8

UN 1823

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

GENERALIDADES

Nombre Comercial: Soda cáustica sólida del 97-99%, en placas rectangulares, molida y/o granulada.

Fórmula química NaOH

Peso molecular 40.01

CARACTERÍSTICAS

Producto sólido en placas, sólido y/o granulado.

Muy higroscópico, su gran capacidad de adsorción de dióxido de carbono y agua del aire va acompañada de un calentamiento espontáneo. Muy corrosivo a todo tipo de tejido animal o vegetal.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Alcalinidad total	como NaOH	% prom.	97-99
Alcalinidad total	como Na ₂ O	% prom.	75.1-76.7
Hidróxido de sodio	como NaOH	% min.	96.25
Carbonato de sodio	como Na ₂ CO ₃	% máx.	1.00
Cloruros	como NaCl	% máx.	0.25
Sulfatos	como Na ₂ SO ₄	% máx.	0.05
Cloratos	como NaClO ₃	% máx.	exento
Hierro total	como Fe	% máx.	50.0
Manganeso	como Mn	% máx.	2.0
Sílice	como SiO ₂	% máx.	50.0
Total otros metales:			
pesados	como Pb	% máx.	30.0
Arsénico	como As	% máx.	exento
Plomo	como Pb	% máx.	1.0
Cobre	como Cu	% máx.	2.0

Granulometría

En placas rectangulares de dimensiones de 100 x 300 x 600 mm

Granulada	: malla-	3/4" (19.0 mm)	100%
	: malla-	100 mesh(150 Mn)	2%
Molida	: malla-	1/4" (6.3 mm)	100%
	: malla-	100 mesh(150 Mn)	2%

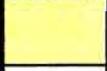
HIPOCLORITO DE SODIO

IMO 8

UN 1791

NaClO



	Salud
	Inflamabilidad
	Reactividad
OX	Oxidante

0	Insignificante	3	Alto
1	Ligero	4	Extremo
2	Moderado		

CARACTERÍSTICAS

Características físicas

Solución acuosa clara, ligeramente amarilla (ámbar), olor característico penetrante e irritante; con contenido de hidróxido de sodio y carbonato de sodio.

Características químicas

Fuertemente oxidante; dependiendo del pH de la solución se presenta disociado en forma de cloro activo, ácido hipocloroso HOCl y/o hipoclorito OCl^- . De estas formas de cloro libre activo depende su reactividad en las reacciones de oxidación, cloración y acción bioquímica tales como el control bacteriológico y microbiológico.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS (*)

Cloro activo	(gr/lit)	mín.	115.0
Hidróxido de sodio como NaOH	(gr/lit)	máx.	13.80
Carbonato de sodio como Na_2CO_3	(gr/lit)	máx.	11.70
Hierro como Fe	(ppm)	máx.	2.0
Peso específico	(gr/ml)		1.16

Apariencia	Transparente, libre de sedimentos
Color	Ligeramente amarillo verdoso.

(* CONSULTAR NORMA TÉCNICA PERUANA N° 311.091

USOS

Se destacan las siguientes industrias como principales consumidores:

- Tratamiento de agua.
- Blanqueadores.
- Obtención de hidróxido férrico, dióxido de manganeso, de nitratos, sulfatos y cianatos (por reacción con los cianuros).

ÁCIDO CLORHÍDRICO

IMO 8

UN 1789

HCl



UN 1789

	Salud
	Inflamabilidad
	Reactividad

0	Insignificante	3	Alto
1	Ligero	4	Extremo
2	Moderado		

CARACTERÍSTICAS

Características físicas

Es una solución acuosa, fumante, clara, ligeramente amarilla, olor penetrante e irritante.

Características químicas

Altamente reactivo. Ataca a la mayoría de los metales produciendo hidrógeno.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS (*)

Ácido clorhídrico	como HCl	(%)	30 - 33
Ácido clorhídrico	como HCl	(gr/lit)	345 - 363
Cloro residual	como Cl ₂	(ppm) máx.	180
Sulfatos	como SO ₄ ⁼	(ppm) máx.	500
Hierro expresado	como Fe	(ppm) máx.	3
Residuos por calcinación		(ppm) máx.	200

(*) Consultar Norma Técnica ITINTEC No. 311.003

USOS

Se utiliza especialmente en las siguientes industrias:

- Química y petroquímicas.
- Tratamientos de aguas.
- Alimentación.
- Acondicionamiento de superficies metálicas.
- Minería y petróleo.
- Textiles, adhesivos (goma), obtención de dióxido de cloro.

COLORO

IMO 2.3

UN 1017

COLORO



UN 1017

	Salud
	Inflamabilidad
	Reactividad
OX	Oxidante

0	Insignificante	3	Alto
1	Ligero	4	Extremo
2	Moderado		

CARACTERÍSTICAS

Características físicas

En estado gaseoso es de color amarillo-ámbar, olor picante e irritante y es poco soluble en agua. Dentro del recipiente, el cloro se encuentra en forma líquida y vapor.

Características químicas

Altamente reactivo, no es inflamable, pero en presencia de hidrógeno, amoníaco o hidrocarburos gaseosos puede formar mezclas explosivas; se hidroliza con agua produciendo ácido clorhídrico e hipocloroso.

En presencia de cloro seco (menos de 100 mg/m³ de aire) las partículas finamente divididas de antimonio, arsénico, bismuto, boro, cobre, hierro y fósforo, arden espontáneamente. El cloro "húmedo" ataca a los metales exceptuando al oro, plata, platino, tantalio y titanio.

A presión y temperatura normales, el cloro no ataca al vidrio grueso, porcelana, ebonita, cloruro de polivinilo y politetrafluoretileno.

TOXICIDAD

EL cloro es irritante, asfixiante. La concentración máxima recomendada para trabajar en forma continua durante 8 horas es de 1 ppm.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS (*)

Color	ámbar
Densidad relativa	1.5

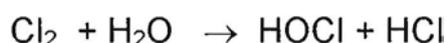
Pureza	(%) mín.	99.5
Humedad	(%) máx.	0.01
Gases inertes	(%) máx.	0.50

USOS DEL CLORO LÍQUIDO O GASEOSO

Se emplea principalmente para la obtención de:

Desinfección del agua

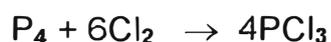
Desde el siglo XVIII el cloro es usado como desinfectante. Cuando el cloro se adiciona al agua se forma ácido hipocloroso o clorhídrico según:



El cloro, hipoclorito de sodio o dióxido de cloro destruyen fácilmente las bacterias y microorganismos, previenen el crecimiento de algas e incrustaciones en las tuberías y tanques de almacenamiento, inhiben la actividad de los agentes patógenos.

Tricloruro de fósforo, PCl_3

Cuando se quema el fósforo blanco con el cloro se obtiene el tricloruro de fósforo.

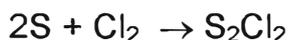


El tricloruro de fósforo es un compuesto intermedio en la preparación del pentacloruro de fósforo y óxido de tricloruro de fósforo. Estos compuestos

son usados en la manufactura de la penicilina y esterres de fosfato, respectivamente.

Dicloruro de azufre, S₂Cl₂

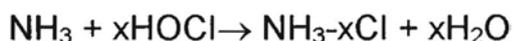
El dicloruro de azufre se forma de la combustión de cloro y azufre según:



El dicloruro de azufre se usa en aceites y aditivos de alta presión, en la vulcanización del caucho, en medicamentos

Cloroaminas, NH₃-xCl

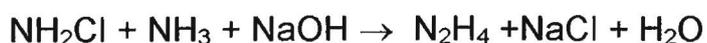
Las cloroaminas se preparan por la acción del ácido hipocloroso o cloro sobre las sales de amonio.



Las cloroaminas son usadas como desinfectantes y blanqueadores en la industria del papel.

Hidracina, N₂H₄

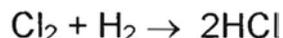
El amoníaco se oxida con hipoclorito de sodio para obtener la monocloroamina. Posteriormente, la monocloroamina se hace reaccionar con exceso de amoníaco y soda cáustica para obtener la hidracina.



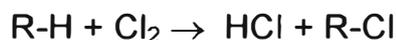
La hidracina se utiliza en el tratamiento de agua de calderos, pesticida y como iniciador en la polimerización entre otros múltiples usos.

Cloruro de hidrógeno (ácido clorhídrico) HCl

El cloruro de hidrógeno de alta pureza se produce a partir de la combustión del cloro con el hidrógeno.



También, el cloruro de hidrógeno de baja pureza se obtiene de la cloración de sustancias orgánicas.



El cloruro de hidrógeno se emplea en el tratamiento de superficies, refinación del azúcar, industria del caucho, etc.

Hipoclorito de sodio, NaClO

El hipoclorito de sodio se obtiene a partir del cloro con hidróxido de sodio.



El hipoclorito de sodio se utiliza como desinfectante, blanqueador (industria textil y pulpa – papel), etc.

Dióxido de cloro, ClO₂

La producción del dióxido de cloro se realiza mediante la reducción del clorato con ácido clorhídrico.



El dióxido de cloro se produce en el sitio donde se va emplear porque es explosivo.

El dióxido de cloro está reemplazando al cloro elemental como desinfectante, y también en los procesos de blanqueo (industria textil y pulpa - papel) .

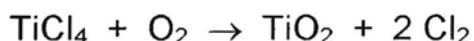
Tetracloruro de titanio, TiCl_4

La materia prima de óxido de titanio contiene impurezas (óxidos de silicio, vanadio, hierro, estaño).

Para la obtención del óxido de titanio de alta pureza se emplea el cloro con la finalidad de obtener el tetracloruro de titanio, el cual se separa de los otros cloruros (SiCl_4 , SnCl_4 , VOCl_2 , FeCl_3) mediante destilación.



El tetracloruro de titanio se quema con oxígeno para obtener el óxido de titanio puro.



Para obtener el titanio metálico, el tetracloruro de titanio se reduce con amalgama de sodio. El producto obtenido es el dicloruro de titanio, que a su vez es reducido con magnesio metálico.

El titanio se utiliza para la construcción de aviones, submarinos, equipos industriales y quirúrgicos.

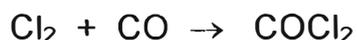
El óxido de titanio es usado como pigmento en las pinturas.

Pulpa y papel

El proceso de blanqueo de la pulpa se realiza con cloro para que los compuestos de la lignina sean solubles.

Fosgeno, COCl₂

El fosgeno se obtiene a partir del monóxido de carbono y cloro.



Este compuesto permite obtener productos libres de cloro tales como el poliuretano y policarbonatos.

El poliuretano se usa en la industria automotriz, construcción, adhesivos, etc.

Los policarbonatos se utilizan en el sector eléctrico (aislante), automotriz, construcción, etc.

1,2 Dicloroetano, C₂H₄Cl₂

El dicloroetano (EDC) es el producto que consume la mayor cantidad de cloro elemental.

El EDC se obtiene de la cloración del eteno.



El EDC se usa para fabricar el cloruro de vinilo (85% del EDC), 1,1,1 tricloroetano, solventes, etc.

6.2 MANIPULACIÓN, USO, ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DEL CLORO LÍQUIDO

Para todas las operaciones de manipulación de envases de cloro líquido se recomienda lo siguiente:

- Verificar la presencia del tapón ciego de seguridad en las válvulas de cierre.
- Verificar los cascos protectores de las válvulas del recipiente.
- Manipular los envases con cuidado.
- No golpear por ningún motivo el envase.
- Ventilar de manera exhaustiva el área donde se manipula los envases.

Para el uso del cloro líquido se debe seguir las siguientes recomendaciones:

- Utilizar el equipo de protección personal adecuado: máscara antigas con cartucho filtrante especial, gafas herméticas tipo "buceador", botas y guantes de cuero.
- Abrir la válvula de descarga del producto como máximo una vuelta.
- Usar las llaves adecuadas para abrir o cerrar las válvulas.
- Cuidar que la temperatura de trabajo sea inferior a 40 C.

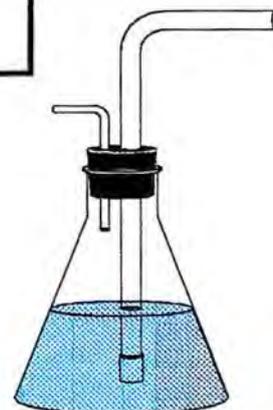
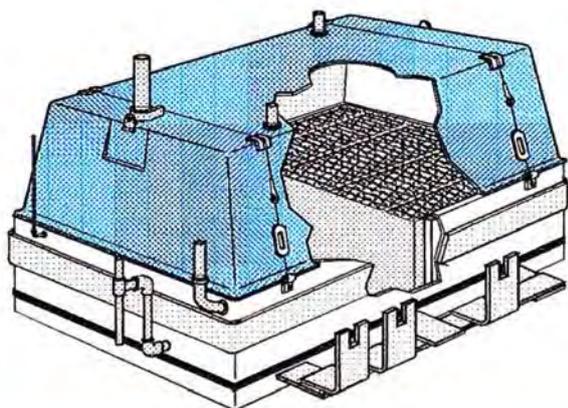
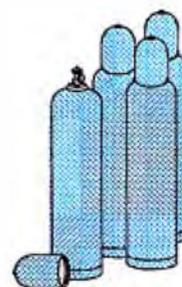
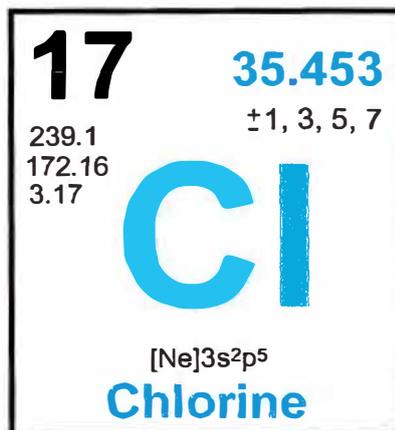
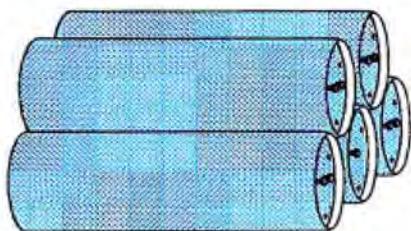
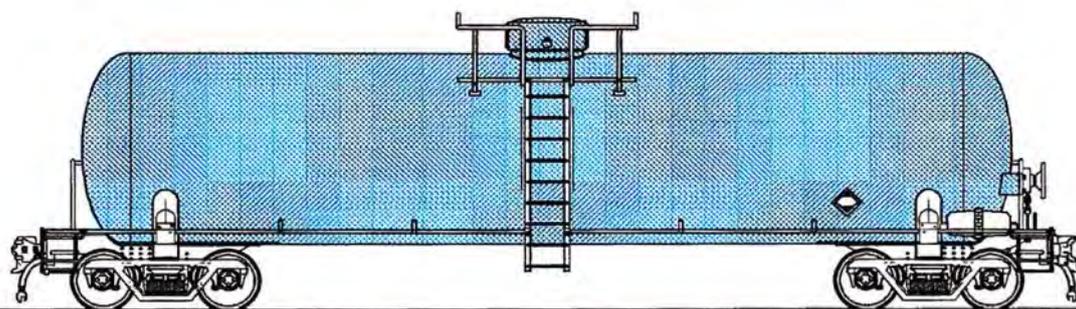
Para el almacenamiento y transporte las recomendaciones son:

- Verificar que la temperatura de almacenamiento o transporte sea inferior a 40 C.
- Poner cubierta superior (toldo) en el vehículo de transporte.
- Si el producto se encuentra en cilindros (907 kg), colocar éstos siempre en posición horizontal sobre tabloncillos apropiados que impidan su deslizamiento.
- Si el producto se encuentra en recipientes (45 o 68 kg) instalar éstos siempre en posición vertical.

- No transportar o almacenar el cloro junto a otros productos.
- Diseñar la zona destinada para el almacenamiento con una ventilación natural adecuada.
- No almacenar el cloro en ambientes subterráneos ni exponerlo a la luz solar directa o fuentes térmicas.
- Separar el área de almacenamiento del cloro líquido de las demás áreas.
- Separar los recipientes vacíos de los cilindros y/o recipientes llenos.

CHLORINE

HANDBOOK



OxyChem.

Technical Data

Table 4—Thermodynamic Properties of Saturated Chlorine

 (Base: $h = 0$, $s = 0$ for solid Cl_2 at 0°R)

Temp (°F)	Absolute Pressure (psi)	Volume (cu ft/lb)		Enthalpy (Btu/lb)			Entropy (Btu/lb-°R)		
		Liquid	Vapor	Liquid	Vaporization	Vapor	Liquid	Vaporization	Vapor
t	p	v _l	v _g	h _l	³ h	h _g	s _l	³ s	s _g
-130	0.51902	0.0093981	95.993	78.488	137.13	215.57	0.37472	0.41593	0.79065
-120	0.80251	0.0094727	63.930	80.890	135.72	216.61	0.38201	0.39956	0.78158
-110	1.2055	0.0095492	43.776	83.305	134.35	217.65	0.38901	0.38420	0.77322
-100	1.7643	0.0096277	30.738	85.697	133.00	218.69	0.39575	0.36976	0.76551
-90	2.5213	0.0097083	22.081	88.067	131.66	219.73	0.40225	0.35615	0.75840
-80	3.5258	0.0097911	16.193	90.420	130.34	220.76	0.40852	0.34328	0.75181
-70	4.8336	0.0098761	12.101	92.759	129.02	221.78	0.41459	0.33110	0.74570
-60	6.5073	0.0099636	9.1996	95.087	127.71	222.80	0.42048	0.31954	0.74003
-50	8.6157	0.010053	7.1037	97.406	126.40	223.81	0.42620	0.30854	0.73474
-40	11.234	0.010146	5.5642	99.719	125.08	224.80	0.43177	0.29805	0.72982
-30	14.443	0.010242	4.4156	102.02	123.76	225.79	0.43719	0.28802	0.72522
-29.29	14.696	0.010248	4.3457	102.19	123.66	225.86	0.43757	0.28732	0.72490
-20	18.329	0.010340	3.5462	104.33	122.41	226.75	0.44248	0.27842	0.72090
-10	22.984	0.010442	2.8793	106.64	121.05	227.70	0.44765	0.26920	0.71686
0	28.504	0.010547	2.3613	108.95	119.67	228.63	0.45271	0.26033	0.71305
10	34.987	0.010656	1.9544	111.27	118.26	229.53	0.45767	0.25179	0.70946
20	42.538	0.010768	1.6313	113.59	116.82	230.41	0.46252	0.24354	0.70606
30	51.265	0.010885	1.3722	115.92	115.34	231.26	0.46729	0.23555	0.70284
40	61.276	0.011006	1.1625	118.25	113.83	232.09	0.47196	0.22781	0.69978
50	72.684	0.011132	0.99128	120.59	112.28	232.88	0.47656	0.22029	0.69686
60	85.606	0.011263	0.85030	122.95	110.68	233.63	0.48109	0.21297	0.69406
70	100.15	0.011399	0.73335	125.32	109.02	234.35	0.48555	0.20583	0.69138
80	116.45	0.011541	0.63565	127.71	107.31	235.02	0.48994	0.19885	0.68879
90	134.63	0.011690	0.55346	130.11	105.54	235.65	0.49428	0.19200	0.68629
100	154.80	0.011846	0.48388	132.53	103.70	236.23	0.49857	0.18528	0.68385
110	177.09	0.012009	0.42462	134.98	101.78	236.76	0.50281	0.17866	0.68148
120	201.64	0.012181	0.37386	137.45	99.782	237.24	0.50702	0.17213	0.67915
130	228.57	0.012362	0.33014	139.96	97.685	237.65	0.51121	0.16565	0.67686
140	258.03	0.012554	0.29228	142.51	95.483	237.99	0.51537	0.15922	0.67459
150	290.14	0.012758	0.25934	145.09	93.162	238.26	0.51953	0.15280	0.67233
160	325.05	0.012975	0.23052	147.73	90.709	238.44	0.52368	0.14637	0.67006
170	362.91	0.013208	0.20520	150.43	88.105	238.54	0.52786	0.13991	0.66778
180	403.86	0.013458	0.18285	153.20	85.328	238.53	0.53206	0.13339	0.66545
190	448.07	0.013728	0.16301	156.06	82.354	238.41	0.53631	0.12676	0.66307
200	495.68	0.014023	0.14533	159.01	79.150	238.16	0.54063	0.11998	0.66061
210	546.88	0.014348	0.12947	162.07	75.677	237.75	0.54504	0.11300	0.65805
220	601.82	0.014710	0.11518	165.28	71.882	237.16	0.54958	0.10575	0.65534
230	660.70	0.015118	0.10221	168.66	67.696	236.36	0.55428	0.098155	0.65243
240	723.69	0.015587	0.090340	172.25	63.022	235.28	0.55919	0.090072	0.64926
250	790.99	0.016143	0.079352	176.13	57.713	233.84	0.56440	0.081322	0.64573
260	862.81	0.016827	0.069011	180.38	51.528	231.90	0.57004	0.071598	0.64164
270	939.35	0.017729	0.058995	185.19	44.007	229.20	0.57635	0.060310	0.63666
280	1020.8	0.019102	0.048647	191.04	33.987	225.03	0.58393	0.045948	0.62987
290	1107.5	0.022862	0.034207	200.80	14.060	214.86	0.59658	0.018756	0.61534
291.2	1118.37	0.027960	0.027960	207.77	00.000	207.77	0.60582	0.000000	0.60582

 REF: Kapoor, R.M.; Martin, J.J., Thermodynamic Properties of Chlorine,
 Engineering Research Institute, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan (1957).

Technical Data



Table 5—Thermodynamic Properties of Superheated Chlorine

v, volume (cu. ft./lb); h, enthalpy (Btu./lb); s, entropy (Btu./lb.°R)
 Base: h = 0, s = 0 for solid Cl₂ at 0°R

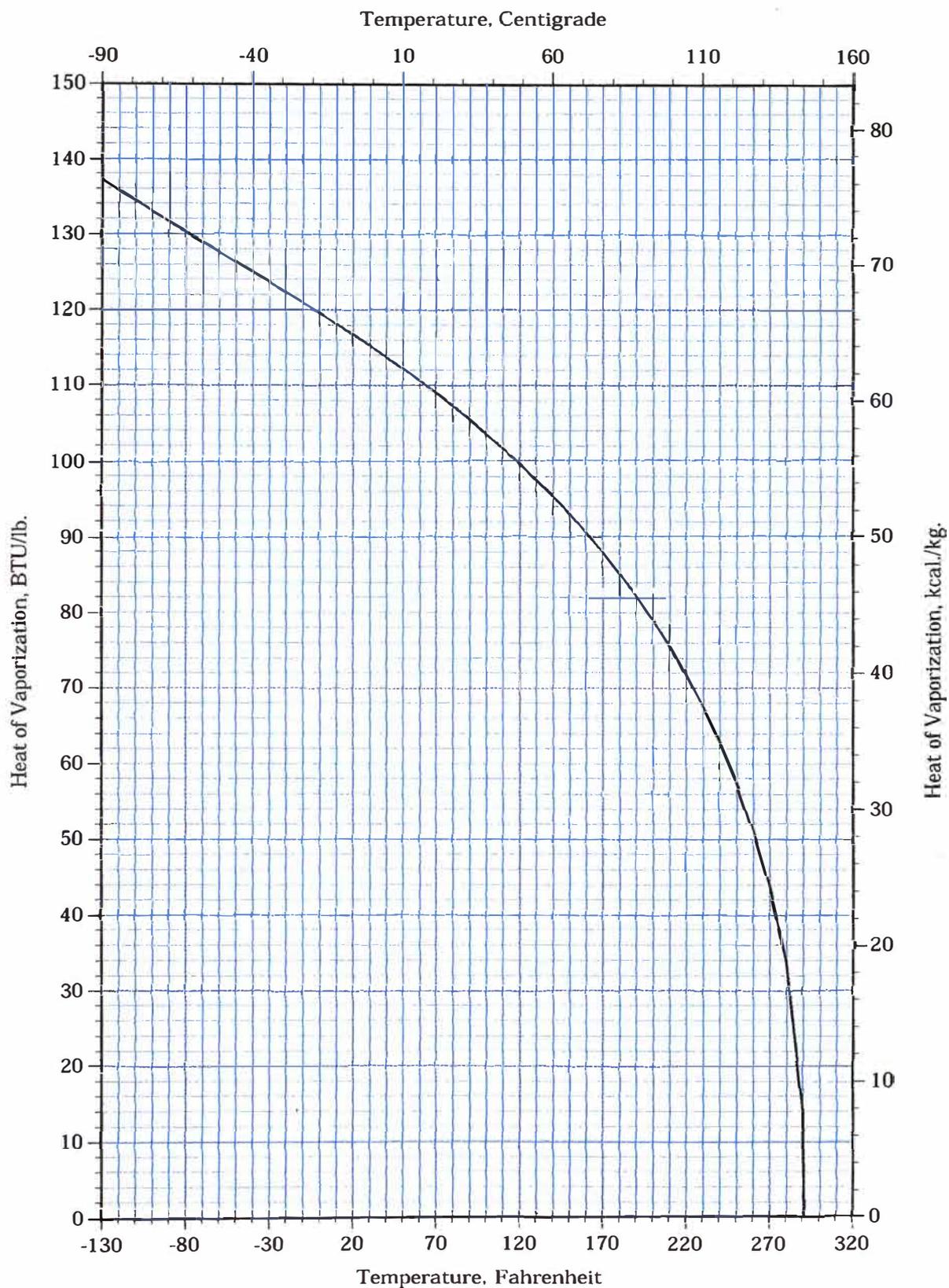
Figures in parenthesis under the pressures are the saturation temperatures

Temp. (°F)	10 psi (-44.4°F)			14.696 psi (-29.3°F)			20 psi (-16.2°F)			25 psi (-6.1°F)		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s	v	h	s
0	6.8782	229.30	0.74326	4.6552	229.13	0.73226	3.3996	228.94	0.72338	2.7036	228.76	0.71689
25	7.2623	232.10	0.74919	4.9185	231.94	0.73822	3.5948	231.77	0.72937	2.8610	231.60	0.72291
50	7.6458	234.92	0.75488	5.1812	234.78	0.74392	3.7892	234.61	0.73510	3.0178	234.45	0.72866
75	8.0288	237.77	0.76033	5.4434	237.63	0.74939	3.9832	237.48	0.74058	3.1739	237.33	0.73416
100	8.4113	240.63	0.76556	5.7050	240.51	0.75464	4.1766	240.36	0.74585	3.3296	240.22	0.73945
125	8.7934	243.52	0.77060	5.9663	243.40	0.75969	4.3697	243.26	0.75092	3.4849	243.13	0.74453
150	9.1752	246.42	0.77546	6.2273	246.30	0.76456	4.5624	246.17	0.75580	3.6398	246.05	0.74942
175	9.5567	249.33	0.78015	6.4879	249.23	0.76926	4.7548	249.10	0.76051	3.7944	248.98	0.75414
200	9.9380	252.27	0.78468	6.7483	252.16	0.77380	4.9469	252.05	0.76506	3.9487	251.94	0.75870
225	10.319	255.21	0.78907	7.0084	255.12	0.77819	5.1388	255.00	0.76946	4.1028	254.90	0.76311
250	10.699	258.17	0.79331	7.2684	258.08	0.78245	5.3305	257.97	0.77372	4.2566	257.87	0.76738
275	11.080	261.15	0.79743	7.5281	261.06	0.78657	5.5220	260.96	0.77785	4.4103	260.86	0.77151
300	11.460	264.13	0.80142	7.7877	264.04	0.79057	5.7133	263.95	0.78175	4.5638	263.86	0.77552
325	11.841	267.12	0.80530	8.0472	267.04	0.79445	5.9045	266.95	0.78574	4.7172	266.86	0.77942
350	12.221	270.13	0.80907	8.3065	270.05	0.79822	6.0956	269.96	0.78952	4.8704	269.88	0.78320
375	12.601	273.14	0.81273	8.5656	273.06	0.80189	6.2865	272.98	0.79319	5.0235	272.90	0.78687
400	12.981	276.15	0.81629	8.8247	276.08	0.80545	6.4773	276.00	0.79676	5.1765	275.92	0.79045
Temp. (°F)	30 psi (2.4°F)			35 psi (10.0°F)			40 psi (16.8°F)			45 psi (23.0°F)		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s	v	h	s
25	2.3717	231.43	0.71759	2.0222	231.25	0.71306	1.7600	231.08	0.70910	1.5559	230.90	0.70558
50	2.5034	234.30	0.72336	2.1358	234.14	0.71885	1.8601	233.97	0.71492	1.6456	233.81	0.71142
75	2.6343	237.18	0.72889	2.2489	237.03	0.72440	1.9597	236.88	0.72048	1.7348	236.73	0.71701
100	2.7648	240.08	0.73419	2.3614	239.94	0.72972	2.0588	239.80	0.72582	1.8234	239.66	0.72236
125	2.8949	242.99	0.73928	2.4735	242.86	0.73483	2.1574	242.73	0.73094	1.9115	242.60	0.72750
150	3.0246	245.92	0.74419	2.5852	245.80	0.73974	2.2556	245.67	0.73588	1.9993	245.55	0.73245
175	3.1540	248.87	0.74892	2.6966	248.75	0.74449	2.3535	248.63	0.74063	2.0867	248.51	0.73721
200	3.2831	251.82	0.75349	2.8077	251.71	0.74906	2.4512	251.60	0.74522	2.1738	251.49	0.74181
225	3.4120	254.79	0.75791	2.9186	254.69	0.75349	2.5486	254.58	0.74965	2.2607	254.47	0.74625
250	3.5407	257.77	0.76218	3.0293	257.67	0.75777	2.6457	257.57	0.75394	2.3474	257.47	0.75055
275	3.6692	260.76	0.76632	3.1398	260.67	0.76192	2.7427	260.57	0.75810	2.4339	260.47	0.75471
300	3.7975	263.76	0.77034	3.2501	263.67	0.76594	2.8395	263.58	0.76213	2.5201	263.49	0.75875
325	3.9256	266.77	0.77424	3.3602	266.69	0.76985	2.9361	266.60	0.76603	2.6063	266.51	0.76266
350	4.0536	269.79	0.77802	3.4702	269.71	0.77364	3.0326	269.62	0.76983	2.6923	269.54	0.76646
375	4.1815	272.82	0.78170	3.5801	272.74	0.77732	3.1290	272.66	0.77352	2.7782	272.58	0.77015
400	4.3093	275.85	0.78528	3.6898	275.77	0.78090	3.2253	275.69	0.77710	2.8639	275.62	0.77374
Temp. (°F)	50 psi (29.6°F)			60 psi (38.8°F)			70 psi (47.7°F)			80 psi (55.8°F)		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s	v	h	s
50	1.4740	233.65	0.70827	1.2163	233.31	0.70276	1.0321	232.97	0.69803	—	—	—
75	1.5547	236.57	0.71388	1.2846	236.26	0.70841	1.0915	235.95	0.70373	0.9465	235.62	0.69961
100	1.6350	239.51	0.71925	1.3523	239.22	0.71382	1.1503	238.93	0.70917	0.9987	238.63	0.70510
125	1.7148	242.46	0.72441	1.4196	242.19	0.71901	1.2086	241.91	0.71440	1.0503	241.63	0.71035
150	1.7941	245.42	0.72936	1.4864	245.17	0.72399	1.2665	244.91	0.71941	1.1015	244.65	0.71540
175	1.8732	248.39	0.73414	1.5529	248.15	0.72879	1.3240	247.91	0.72423	1.1523	247.66	0.72025
200	1.9519	251.37	0.73875	1.6190	251.15	0.73342	1.3812	250.92	0.72888	1.2028	250.68	0.72492
225	2.0303	254.37	0.74320	1.6850	254.15	0.73789	1.4382	253.93	0.73337	1.2530	253.71	0.72942
250	2.1087	257.37	0.74751	1.7507	257.16	0.74221	1.4949	256.96	0.73771	1.3030	256.75	0.73378
275	2.1868	260.38	0.75168	1.8161	260.18	0.74640	1.5514	259.99	0.74191	1.3528	259.79	0.73799
300	2.2647	263.40	0.75572	1.8814	263.21	0.75045	1.6077	263.03	0.74597	1.4023	262.84	0.74207
325	2.3424	266.42	0.75964	1.9466	266.25	0.75438	1.6638	266.07	0.74991	1.4517	265.89	0.74602
350	2.4200	269.46	0.76344	2.0116	269.29	0.75820	1.7198	269.12	0.75374	1.5010	268.95	0.74986
375	2.4975	272.50	0.76714	2.0764	272.33	0.76190	1.7757	272.17	0.75745	1.5501	272.01	0.75358
400	2.5748	275.54	0.77073	2.1412	275.39	0.76550	1.8315	275.23	0.76106	1.5991	275.08	0.75720
Temp. (°F)	90 psi (63.1°F)			100 psi (69.9°F)			125 psi (84.8°F)			150 psi (97.7°F)		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s	v	h	s
75	0.83371	235.30	0.69592	0.74329	234.96	0.69258	—	—	—	—	—	—
100	0.88072	238.32	0.70146	0.78621	238.02	0.69816	0.61574	237.23	0.69100	0.50165	236.40	0.68493
125	0.92717	241.35	0.70675	0.82855	241.07	0.70349	0.65075	240.33	0.69643	0.53187	239.57	0.69048
150	0.97317	244.38	0.71182	0.87041	244.11	0.70859	0.68522	243.43	0.70162	0.56150	242.73	0.69576
175	1.01871	247.41	0.71670	0.91186	247.16	0.71349	0.71925	246.53	0.70659	0.59063	245.87	0.70081
200	1.0640	250.45	0.72139	0.95298	250.22	0.71821	0.75291	249.62	0.71137	0.61936	249.00	0.70566
225	1.1090	253.49	0.72592	0.99380	253.27	0.72275	0.78625	252.71	0.71597	0.64775	252.13	0.71031
250	1.1538	256.54	0.73029	1.03437	256.33	0.72714	0.81932	255.80	0.72040	0.67584	255.26	0.71479
275	1.1983	259.59	0.73452	1.07471	259.39	0.73139	0.85215	258.89	0.72468	0.70369	258.38	0.71912
300	1.2426	262.65	0.73861	1.11487	262.46	0.73549	0.88478	261.98	0.72883	0.73132	261.50	0.72329
325	1.2868	265.71	0.74257	1.15485	265.53	0.73947	0.91723	265.08	0.73283	0.75877	264.62	0.72734
350	1.3308	268.78	0.74642	1.19467	268.61	0.74333	0.94952	268.17	0.73672	0.78604	267.74	0.73125
375	1.3747	271.85	0.75015	1.23436	271.68	0.74707	0.98167	271.27	0.74049	0.81317	270.86	0.73504
400	1.4184	274.92	0.75378	1.27393	274.76	0.75071	1.0136	274.37	0.74414	0.84017	273.97	0.73872
Temp. (°F)	200 psi (119.4°F)			300 psi (152.9°F)			400 psi (179.1°F)			500 psi (200.9°F)		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s	v	h	s
150	0.40616	241.25	0.68610	0.24844	237.90	0.67098	—	—	—	—	—	—
175	0.42934	244.50	0.69133	0.26630	241.48	0.67674	—	—	—	—	—	—
200	0.45202	247.73	0.69633	0.28338	244.97	0.68213	0.19729	241.80	0.67069	—	—	—
225	0.47430	250.95	0.70111	0.29987	248.40	0.68723	0.21139	245.55	0.67627	0.15684	242.26	0.66655
250	0.49625	254.14	0.70570	0.31590	251.78	0.69209	0.22479	249.19	0.68149	0.16913	246.28	0.67231
275	0.51792	257.33	0.71011	0.33155	255.12	0.69672	0.23767	252.74	0.68641	0.18064	250.13	0.67764
300	0.53934	260.51	0.71437	0.34690	258.44	0.70116	0.25015	256.23	0.69109	0.19158	253.85	0.68262
325	0.56056	263.68	0.71847	0.36199	261.74	0.70543	0.26230	259.68	0.69555	0.20211	257.48	0.68733
350	0.58160	266.85	0.72245	0.37687	265.01	0.70954	0.27419	263.08	0.69982	0.21230	261.05	0.69180
375	0.60247	270.01	0.72629	0.39155	268.27	0.71350	0.28585	266.46	0.70393	0.22222	264.56	0.69608
400	0.62321	273.17	0.73002	0.40607	271.52	0.71734	0.29732	269.81	0.70788	0.23192	268.03	0.70017

REF: Kapoor, R.M.; Martin, J.J., Thermodynamic Properties of Chlorine, Engineering Research Institute, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan (1957).

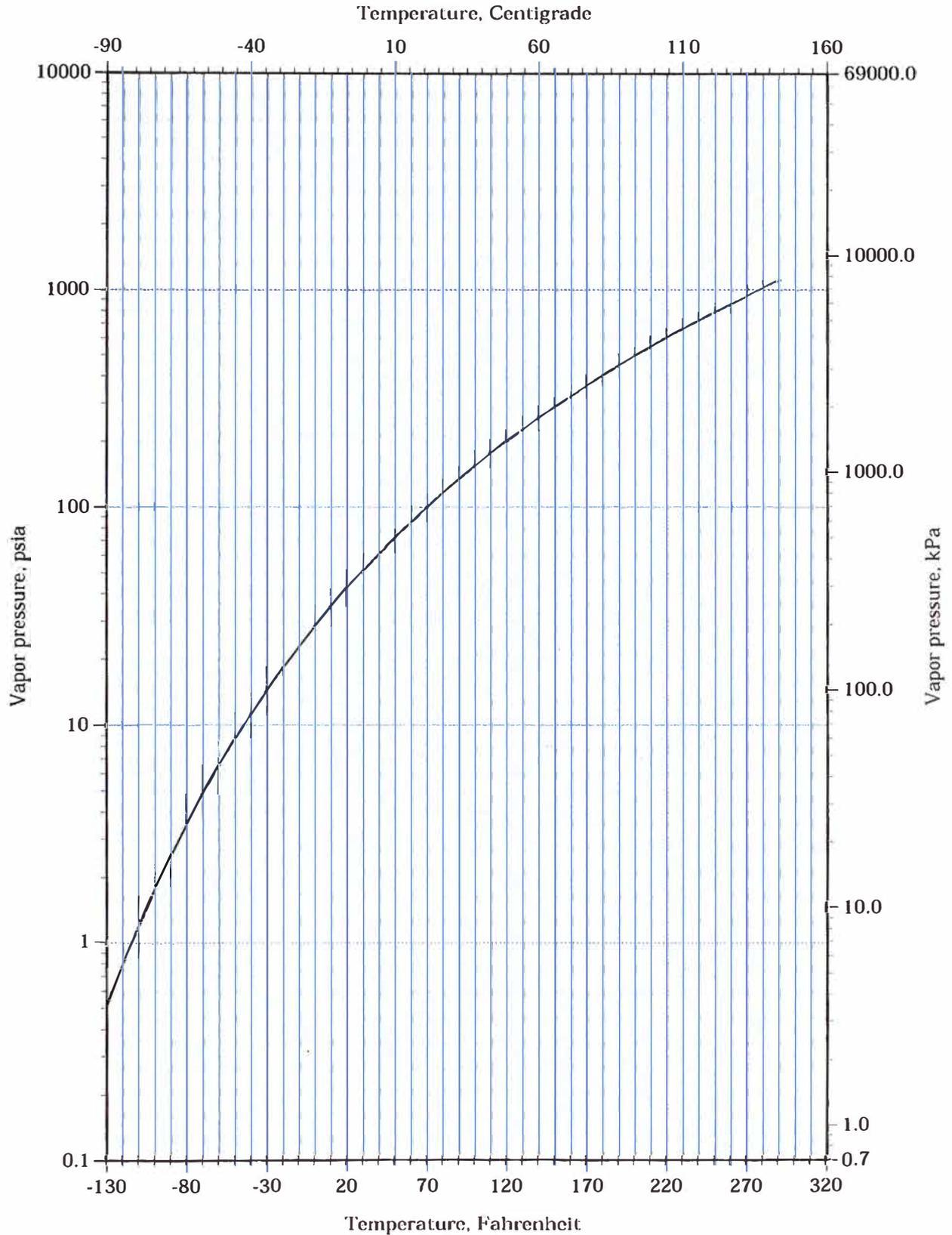
Technical Data

Latent Heat of Vaporization of Chlorine



Technical Data

Vapor Pressure of Saturated Chlorine




DuPont Fluorochemicals

Technical Information

T-22 SI

**Thermodynamic
Properties
of
Freon[®] 22
(R-22)**

**Thermodynamic Properties of R-22 Refrigerant
(CHClF₂)
SI Units**

Tables of the thermodynamic properties of R-22 have been developed and are presented here. This information is based on values calculated using the NIST REFPROP Database (McLinden, M.O., Klein, S.A., Lemmon, E.W., and Peskin, A.P., NIST Standard Reference Database 23, NIST thermodynamic and transport properties of refrigerants and refrigerant mixtures – REFPROP version 6.01, Standard Reference Data Program, National Institute of Standards and Technology, 1998.

Units

P = Pressure in kPa. Absolute

T = Temperature in Celcius

V_f = Fluid (liquid) specific volume
in cubic meters per kilogram

V_g = Vapour (gas) specific volume
in cubic meters per kilogram

h = Enthalpy (kJ/kg)

s = Entropy (kJ/kg.K)

Physical Properties

Chemical Formula	CHClF ₂
Molecular mass	86.47
Boiling Point At one atmosphere	-40.81°C
Critical Temperature	96.15°C
Critical Pressure	4990 kPa
Critical Density	523.8 kg/m ³
Critical Volume	0.0019 m ³ /kg

TABLE 1 (continued)
FREON®22 Saturation Properties - Temperature Table

Temp °C	Pressure [kPa]	Volume [m ³ /kg]		Density [kg/m ³]		Enthalpy [kJ/kg]			Entropy [kJ/K-kg]		Temp °C
		Liquid v _f	Vapour v _g	Liquid d _f	Vapour d _g	Liquid H _f	Latent H _{fg}	Vapour H _g	Liquid S _f	Vapour S _g	
-46	78.9	0.0007	0.2684	1424.0	3.726	148.4	236.9	385.3	0.794	1.838	-46
-45	82.9	0.0007	0.2563	1421.0	3.901	149.4	236.4	385.8	0.799	1.835	-45
-44	87.1	0.0007	0.2450	1418.0	4.082	150.5	235.8	386.3	0.804	1.833	-44
-43	91.3	0.0007	0.2342	1416.0	4.270	151.6	235.1	386.7	0.809	1.830	-43
-42	95.8	0.0007	0.2240	1413.0	4.464	152.7	234.5	387.2	0.813	1.828	-42
-41	100.4	0.0007	0.2144	1410.0	4.665	153.8	233.9	387.7	0.818	1.825	-41
-40	105.2	0.0007	0.2052	1407.0	4.873	154.9	233.2	388.1	0.823	1.823	-40
-39	110.2	0.0007	0.1965	1404.0	5.088	156.0	232.6	388.6	0.827	1.821	-39
-38	115.4	0.0007	0.1883	1401.0	5.311	157.1	232.0	389.1	0.832	1.819	-38
-37	120.7	0.0007	0.1805	1398.0	5.541	158.2	231.3	389.5	0.837	1.816	-37
-36	126.3	0.0007	0.1730	1395.0	5.779	159.3	230.7	390.0	0.841	1.814	-36
-35	132.0	0.0007	0.1660	1392.0	6.025	160.4	230.0	390.4	0.846	1.812	-35
-34	138.0	0.0007	0.1593	1389.0	6.279	161.5	229.4	390.9	0.851	1.810	-34
-33	144.1	0.0007	0.1529	1386.0	6.541	162.6	228.7	391.3	0.855	1.808	-33
-32	150.5	0.0007	0.1468	1383.0	6.811	163.7	228.1	391.8	0.860	1.806	-32
-31	157.1	0.0007	0.1410	1380.0	7.090	164.8	227.4	392.2	0.864	1.804	-31
-30	163.9	0.0007	0.1355	1377.0	7.379	165.9	226.8	392.7	0.869	1.802	-30
-29	170.9	0.0007	0.1303	1374.0	7.676	167.0	226.1	393.1	0.873	1.800	-29
-28	178.2	0.0007	0.1253	1371.0	7.982	168.1	225.5	393.6	0.878	1.798	-28
-27	185.7	0.0007	0.1205	1368.0	8.298	169.2	224.8	394.0	0.882	1.796	-27
-26	193.4	0.0007	0.1160	1365.0	8.623	170.3	224.2	394.5	0.887	1.794	-26
-25	201.4	0.0007	0.1116	1362.0	8.958	171.4	223.5	394.9	0.891	1.792	-25
-24	209.7	0.0007	0.1075	1359.0	9.304	172.6	222.7	395.3	0.896	1.790	-24
-23	218.2	0.0007	0.1035	1356.0	9.659	173.7	222.1	395.8	0.900	1.788	-23
-22	227.0	0.0007	0.0998	1353.0	10.030	174.8	221.4	396.2	0.905	1.786	-22
-21	236.0	0.0007	0.0961	1350.0	10.400	175.9	220.7	396.6	0.909	1.784	-21
-20	245.3	0.0007	0.0927	1347.0	10.790	177.0	220.1	397.1	0.914	1.783	-20
-19	254.9	0.0007	0.0894	1343.0	11.190	178.2	219.3	397.5	0.918	1.781	-19
-18	264.8	0.0008	0.0862	1340.0	11.600	179.3	218.6	397.9	0.922	1.779	-18
-17	275.0	0.0008	0.0832	1337.0	12.020	180.4	217.9	398.3	0.927	1.777	-17
-16	285.4	0.0008	0.0803	1334.0	12.450	181.6	217.1	398.7	0.931	1.776	-16
-15	296.2	0.0008	0.0775	1331.0	12.900	182.7	216.5	399.2	0.935	1.774	-15
-14	307.3	0.0008	0.0749	1328.0	13.360	183.8	215.8	399.6	0.940	1.772	-14
-13	318.7	0.0008	0.0723	1324.0	13.830	185.0	215.0	400.0	0.944	1.771	-13
-12	330.4	0.0008	0.0699	1321.0	14.310	186.1	214.3	400.4	0.949	1.769	-12
-11	342.4	0.0008	0.0675	1318.0	14.810	187.3	213.5	400.8	0.953	1.767	-11
-10	354.8	0.0008	0.0653	1315.0	15.320	188.4	212.8	401.2	0.957	1.766	-10
-9	367.5	0.0008	0.0631	1311.0	15.850	189.6	212.0	401.6	0.962	1.764	-9
-8	380.5	0.0008	0.0610	1308.0	16.380	190.7	211.3	402.0	0.966	1.763	-8
-7	393.9	0.0008	0.0590	1305.0	16.940	191.9	210.5	402.4	0.970	1.761	-7
-6	407.7	0.0008	0.0571	1302.0	17.500	193.0	209.8	402.8	0.974	1.760	-6
-5	421.8	0.0008	0.0553	1298.0	18.090	194.2	209.0	403.2	0.979	1.758	-5
-4	436.3	0.0008	0.0535	1295.0	18.680	195.3	208.2	403.5	0.983	1.757	-4
-3	451.1	0.0008	0.0518	1292.0	19.300	196.5	207.4	403.9	0.987	1.755	-3
-2	466.4	0.0008	0.0502	1288.0	19.920	197.7	206.6	404.3	0.992	1.754	-2
-1	482.0	0.0008	0.0486	1285.0	20.570	198.8	205.9	404.7	0.996	1.752	-1
0	498.0	0.0008	0.0471	1282.0	21.230	200.0	205.0	405.0	1.000	1.751	0
1	514.4	0.0008	0.0457	1278.0	21.910	201.2	204.2	405.4	1.004	1.749	1
2	531.2	0.0008	0.0442	1275.0	22.600	202.4	203.4	405.8	1.008	1.748	2
3	548.4	0.0008	0.0429	1271.0	23.310	203.5	202.6	406.1	1.013	1.746	3
4	566.1	0.0008	0.0416	1268.0	24.040	204.7	201.8	406.5	1.017	1.745	4
5	584.1	0.0008	0.0403	1264.0	24.790	205.9	200.9	406.8	1.021	1.744	5
6	602.6	0.0008	0.0391	1261.0	25.560	207.1	200.1	407.2	1.025	1.742	6
7	621.5	0.0008	0.0380	1257.0	26.340	208.3	199.2	407.5	1.030	1.741	7

TABLE 1 (continued)
FREON®22 Saturation Properties - Temperature Table

Temp °C	Pressure [kPa]	Volume [m ³ /kg]		Density [kg/m ³]		Enthalpy [kJ/kg]			Entropy [kJ/K-kg]		Temp °C
		Liquid v _f	Vapour v _g	Liquid d _f	Vapour d _g	Liquid H _f	Latent H _{fg}	Vapour H _g	Liquid S _f	Vapour S _g	
8	640.9	0.0008	0.0368	1254.0	27.150	209.5	198.4	407.9	1.034	1.739	8
9	660.7	0.0008	0.0358	1250.0	27.970	210.7	197.5	408.2	1.038	1.738	9
10	680.9	0.0008	0.0347	1247.0	28.820	211.9	196.7	408.6	1.042	1.737	10
11	701.7	0.0008	0.0337	1243.0	29.690	213.1	195.8	408.9	1.046	1.735	11
12	722.9	0.0008	0.0327	1239.0	30.570	214.3	194.9	409.2	1.051	1.734	12
13	744.5	0.0008	0.0318	1236.0	31.480	215.5	194.0	409.5	1.055	1.733	13
14	766.7	0.0008	0.0309	1232.0	32.410	216.7	193.2	409.9	1.059	1.732	14
15	789.3	0.0008	0.0300	1229.0	33.360	217.9	192.3	410.2	1.063	1.730	15
16	812.4	0.0008	0.0291	1225.0	34.340	219.1	191.4	410.5	1.067	1.729	16
17	836.1	0.0008	0.0283	1221.0	35.340	220.4	190.4	410.8	1.071	1.728	17
18	860.2	0.0008	0.0275	1217.0	36.360	221.6	189.5	411.1	1.076	1.726	18
19	884.8	0.0008	0.0267	1214.0	37.410	222.8	188.6	411.4	1.080	1.725	19
20	910.0	0.0008	0.0260	1210.0	38.480	224.1	187.6	411.7	1.084	1.724	20
21	935.7	0.0008	0.0253	1206.0	39.570	225.3	186.6	411.9	1.088	1.722	21
22	961.9	0.0008	0.0246	1202.0	40.700	226.5	185.7	412.2	1.092	1.721	22
23	988.7	0.0008	0.0239	1198.0	41.850	227.8	184.7	412.5	1.096	1.720	23
24	1016.0	0.0008	0.0232	1195.0	43.030	229.0	183.8	412.8	1.100	1.719	24
25	1044.0	0.0008	0.0226	1191.0	44.230	230.3	182.7	413.0	1.105	1.717	25
26	1072.0	0.0008	0.0220	1187.0	45.470	231.5	181.8	413.3	1.109	1.716	26
27	1101.0	0.0009	0.0214	1183.0	46.730	232.8	180.7	413.5	1.113	1.715	27
28	1131.0	0.0009	0.0208	1179.0	48.020	234.1	179.7	413.8	1.117	1.714	28
29	1161.0	0.0009	0.0203	1175.0	49.350	235.3	178.7	414.0	1.121	1.712	29
30	1192.0	0.0009	0.0197	1171.0	50.700	236.6	177.7	414.3	1.125	1.711	30
31	1223.0	0.0009	0.0192	1167.0	52.090	237.9	176.6	414.5	1.129	1.710	31
32	1255.0	0.0009	0.0187	1163.0	53.520	239.2	175.5	414.7	1.133	1.709	32
33	1288.0	0.0009	0.0182	1158.0	54.970	240.5	174.4	414.9	1.138	1.707	33
34	1321.0	0.0009	0.0177	1154.0	56.460	241.8	173.3	415.1	1.142	1.706	34
35	1355.0	0.0009	0.0172	1150.0	57.990	243.1	172.2	415.3	1.146	1.705	35
36	1389.0	0.0009	0.0168	1146.0	59.550	244.4	171.1	415.5	1.150	1.704	36
37	1424.0	0.0009	0.0164	1142.0	61.150	245.7	170.0	415.7	1.154	1.702	37
38	1460.0	0.0009	0.0159	1137.0	62.790	247.0	168.9	415.9	1.158	1.701	38
39	1497.0	0.0009	0.0155	1133.0	64.470	248.3	167.8	416.1	1.162	1.700	39
40	1534.0	0.0009	0.0151	1129.0	66.190	249.6	166.6	416.2	1.166	1.698	40
41	1571.0	0.0009	0.0147	1124.0	67.960	251.0	165.4	416.4	1.171	1.697	41
42	1610.0	0.0009	0.0143	1120.0	69.760	252.3	164.3	416.6	1.175	1.696	42
43	1649.0	0.0009	0.0140	1115.0	71.610	253.7	163.0	416.7	1.179	1.695	43
44	1689.0	0.0009	0.0136	1111.0	73.510	255.0	161.8	416.8	1.183	1.693	44
45	1729.0	0.0009	0.0133	1106.0	75.460	256.4	160.6	417.0	1.187	1.692	45
46	1770.0	0.0009	0.0129	1101.0	77.450	257.7	159.4	417.1	1.191	1.691	46
47	1812.0	0.0009	0.0126	1097.0	79.500	259.1	158.1	417.2	1.196	1.689	47
48	1855.0	0.0009	0.0123	1092.0	81.590	260.5	156.8	417.3	1.200	1.688	48
49	1899.0	0.0009	0.0119	1087.0	83.740	261.9	155.5	417.4	1.204	1.687	49
50	1943.0	0.0009	0.0116	1082.0	85.950	263.2	154.2	417.4	1.208	1.685	50
51	1988.0	0.0009	0.0113	1077.0	88.220	264.6	152.9	417.5	1.212	1.684	51
52	2033.0	0.0009	0.0110	1072.0	90.540	266.0	151.6	417.6	1.216	1.682	52
53	2080.0	0.0009	0.0108	1067.0	92.930	267.5	150.1	417.6	1.221	1.681	53
54	2127.0	0.0009	0.0105	1062.0	95.380	268.9	148.7	417.6	1.225	1.680	54
55	2175.0	0.0010	0.0102	1057.0	97.900	270.3	147.4	417.7	1.229	1.678	55
56	2224.0	0.0010	0.0100	1052.0	100.500	271.8	145.9	417.7	1.233	1.677	56
57	2274.0	0.0010	0.0097	1047.0	103.100	273.2	144.5	417.7	1.238	1.675	57
58	2324.0	0.0010	0.0094	1041.0	105.900	274.7	142.9	417.6	1.242	1.674	58
59	2375.0	0.0010	0.0092	1036.0	108.700	276.1	141.5	417.6	1.246	1.672	59
60	2427.0	0.0010	0.0090	1030.0	111.600	277.6	139.9	417.5	1.250	1.670	60
61	2480.0	0.0010	0.0087	1025.0	114.600	279.1	138.4	417.5	1.255	1.669	61

TABLE 2 (continued)

Freon[®]22 Superheated Vapour - Constant Pressure Tables

V = Volume in m³/kg H = Enthalpy in kJ/kg S = Entropy in kJ/kg.K Saturation Properties in ()

Temp °C	Absolute Pressure kPa												Temp °C
	800			850			900			950			
	(15.46°C)			(17.58°C)			(19.60°C)			(21.55°C)			
	V	H	S	V	H	S	V	H	S	V	H	S	
(0.0296)	(410.3)	(1.730)	(0.0278)	(410.9)	(1.727)	(0.0263)	(411.5)	(1.724)	(0.0249)	(412.1)	(1.722)		
20	0.0304	414.0	1.742	0.0282	412.9	1.734	0.0264	411.9	1.725	-	-	-	20
25	0.0312	417.9	1.756	0.0291	417.0	1.747	0.0272	416.0	1.739	0.0254	415.0	1.732	25
30	0.0321	421.9	1.769	0.0299	421.0	1.761	0.0279	420.1	1.753	0.0262	419.1	1.745	30
35	0.0329	425.8	1.781	0.0307	424.9	1.774	0.0287	424.1	1.766	0.0269	423.2	1.759	35
40	0.0337	429.6	1.794	0.0314	428.9	1.786	0.0294	428.1	1.779	0.0276	427.3	1.772	40
45	0.0344	433.5	1.806	0.0322	432.8	1.799	0.0301	432.0	1.791	0.0283	431.2	1.784	45
50	0.0352	437.3	1.818	0.0329	436.6	1.811	0.0308	435.9	1.804	0.0290	435.2	1.797	50
55	0.0360	441.2	1.830	0.0336	440.5	1.823	0.0315	439.8	1.816	0.0297	439.2	1.809	55
60	0.0367	445.0	1.841	0.0343	444.4	1.834	0.0322	443.7	1.827	0.0303	443.1	1.821	60
65	0.0374	448.8	1.853	0.0350	448.2	1.846	0.0329	447.6	1.839	0.0310	447.0	1.832	65
70	0.0382	452.7	1.864	0.0357	452.1	1.857	0.0335	451.5	1.850	0.0316	450.9	1.844	70
75	0.0389	456.5	1.875	0.0364	456.0	1.868	0.0342	455.4	1.862	0.0322	454.8	1.855	75
80	0.0396	460.4	1.886	0.0371	459.8	1.879	0.0348	459.3	1.873	0.0329	458.8	1.866	80
85	0.0403	464.2	1.897	0.0377	463.7	1.890	0.0355	463.2	1.884	0.0335	462.7	1.877	85
90	0.0410	468.1	1.908	0.0384	467.6	1.901	0.0361	467.1	1.894	0.0341	466.6	1.888	90
95	0.0417	471.9	1.918	0.0391	471.5	1.912	0.0368	471.0	1.905	0.0347	470.5	1.899	95
100	0.0424	475.8	1.929	0.0397	475.4	1.922	0.0374	474.9	1.916	0.0353	474.5	1.910	100
105	0.0431	479.7	1.939	0.0404	479.3	1.933	0.0380	478.9	1.926	0.0359	478.4	1.920	105
110	0.0437	483.7	1.950	0.0410	483.2	1.943	0.0386	482.8	1.937	0.0365	482.4	1.931	110
115	0.0444	487.6	1.960	0.0417	487.2	1.953	0.0392	486.8	1.947	0.0370	486.4	1.941	115
120	0.0451	491.5	1.970	0.0423	491.1	1.963	0.0398	490.7	1.957	0.0376	490.3	1.951	120
125	0.0458	495.5	1.980	0.0430	495.1	1.973	0.0404	494.7	1.967	0.0382	494.3	1.961	125
130	0.0464	499.5	1.990	0.0436	499.1	1.983	0.0410	498.7	1.977	0.0388	498.4	1.971	130
135	0.0471	503.5	2.000	0.0442	503.1	1.993	0.0416	502.7	1.987	0.0393	502.4	1.981	135
140	0.0478	507.5	2.009	0.0448	507.1	2.003	0.0422	506.8	1.997	0.0399	506.4	1.991	140
145	0.0484	511.5	2.019	0.0455	511.2	2.013	0.0428	510.8	2.007	0.0405	510.5	2.001	145
150	0.0491	515.6	2.029	0.0461	515.2	2.022	0.0434	514.9	2.016	0.0410	514.6	2.010	150
155	0.0497	519.6	2.038	0.0467	519.3	2.032	0.0440	519.0	2.026	0.0416	518.7	2.020	155
160	0.0504	523.7	2.048	0.0473	523.4	2.041	0.0446	523.1	2.035	0.0422	522.8	2.030	160
165	0.0511	527.8	2.057	0.0480	527.5	2.051	0.0452	527.2	2.045	0.0427	526.9	2.039	165
170	0.0517	531.9	2.066	0.0486	531.6	2.060	0.0458	531.3	2.054	0.0433	531.0	2.048	170

Temp °C	Absolute Pressure kPa												Temp °C
	1000			1100			1200			1300			
	(23.42°C)			(26.95°C)			(30.26°C)			(33.37°C)			
	V	H	S	V	H	S	V	H	S	V	H	S	
(0.0236)	(412.6)	(1.719)	(0.0214)	(413.5)	(1.715)	(0.0196)	(414.3)	(1.711)	(0.0180)	(415.0)	(1.707)		
25	0.0239	414.0	1.724	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25
30	0.0246	418.2	1.738	0.0219	416.2	1.724	-	-	-	-	-	-	30
35	0.0253	422.3	1.752	0.0225	420.5	1.738	0.0202	418.6	1.725	0.0182	416.5	1.712	35
40	0.0260	426.4	1.765	0.0232	424.7	1.751	0.0209	422.9	1.739	0.0188	421.1	1.726	40
45	0.0267	430.5	1.778	0.0238	428.9	1.765	0.0215	427.2	1.752	0.0194	425.5	1.740	45
50	0.0273	434.5	1.790	0.0245	433.0	1.777	0.0221	431.4	1.765	0.0200	429.8	1.754	50
55	0.0280	438.5	1.802	0.0251	437.1	1.790	0.0226	435.6	1.778	0.0206	434.1	1.767	55
60	0.0286	442.4	1.814	0.0257	441.1	1.802	0.0232	439.7	1.791	0.0211	438.3	1.780	60
65	0.0292	446.4	1.826	0.0263	445.1	1.814	0.0238	443.8	1.803	0.0216	442.5	1.792	65
70	0.0299	450.3	1.838	0.0268	449.1	1.826	0.0243	447.9	1.815	0.0222	446.6	1.804	70
75	0.0305	454.3	1.849	0.0274	453.1	1.838	0.0248	452.0	1.827	0.0227	450.8	1.816	75
80	0.0311	458.2	1.860	0.0279	457.1	1.849	0.0254	456.0	1.838	0.0232	454.9	1.828	80
85	0.0316	462.2	1.871	0.0285	461.1	1.860	0.0259	460.0	1.850	0.0236	459.0	1.840	85
90	0.0322	466.1	1.882	0.0290	465.1	1.871	0.0264	464.1	1.861	0.0241	463.0	1.851	90
95	0.0328	470.1	1.893	0.0296	469.1	1.882	0.0269	468.1	1.872	0.0246	467.1	1.862	95
100	0.0334	474.0	1.904	0.0301	473.1	1.893	0.0274	472.1	1.883	0.0251	471.2	1.873	100
105	0.0339	478.0	1.914	0.0306	477.1	1.904	0.0279	476.2	1.893	0.0255	475.3	1.884	105
110	0.0345	482.0	1.925	0.0312	481.1	1.914	0.0284	480.2	1.904	0.0260	479.3	1.895	110
115	0.0351	485.9	1.935	0.0317	485.1	1.924	0.0288	484.3	1.915	0.0264	483.4	1.905	115
120	0.0356	489.9	1.945	0.0322	489.1	1.935	0.0293	488.3	1.925	0.0269	487.5	1.916	120
125	0.0362	494.0	1.956	0.0327	493.2	1.945	0.0298	492.4	1.935	0.0273	491.6	1.926	125
130	0.0367	498.0	1.966	0.0332	497.2	1.955	0.0303	496.5	1.945	0.0278	495.7	1.936	130
135	0.0373	502.0	1.976	0.0337	501.3	1.965	0.0307	500.6	1.955	0.0282	499.8	1.946	135
140	0.0378	506.1	1.985	0.0342	505.4	1.975	0.0312	504.7	1.965	0.0286	503.9	1.956	140
145	0.0384	510.1	1.995	0.0347	509.5	1.985	0.0317	508.8	1.975	0.0291	508.1	1.966	145
150	0.0389	514.2	2.005	0.0352	513.6	1.995	0.0321	512.9	1.985	0.0295	512.2	1.976	150
155	0.0394	518.3	2.015	0.0357	517.7	2.004	0.0326	517.0	1.995	0.0299	516.4	1.986	155
160	0.0400	522.5	2.024	0.0362	521.8	2.014	0.0330	521.2	2.004	0.0304	520.5	1.996	160
165	0.0405	526.6	2.034	0.0367	526.0	2.023	0.0335	525.4	2.014	0.0308	524.7	2.005	165
170	0.0410	530.7	2.043	0.0372	530.1	2.033	0.0339	529.5	2.024	0.0312	528.9	2.015	170
175	0.0416	534.9	2.052	0.0377	534.3	2.042	0.0344	533.7	2.033	0.0316	533.1	2.024	175

TABLE 2 (continued)

Freon®22 Superheated Vapour - Constant Pressure Tables

V = Volume in m³/kg

H = Enthalpy in kJ/kg

S = Entropy in kJ/kg.K

Saturation Properties in ()

Temp °C	Absolute Pressure kPa												Temp °C
	1400 (36.31°C)			1500 (39.10°C)			1600 (41.75°C)			1700 (44.28°C)			
	V	H	S	V	H	S	V	H	S	V	H	S	
	(0.0167)	(415.6)	(1.703)	(0.0155)	(416.1)	(1.700)	(0.0144)	(416.5)	(1.696)	(0.0135)	(416.9)	(1.693)	
40	0.0171	419.1	1.714	0.0156	417.0	1.702	-	-	-	-	-	-	40
45	0.0177	423.7	1.729	0.0162	421.8	1.718	0.0148	419.8	1.706	0.0136	417.6	1.695	45
50	0.0183	428.2	1.743	0.0167	426.4	1.732	0.0153	424.6	1.721	0.0141	422.6	1.711	50
55	0.0188	432.5	1.756	0.0172	430.9	1.746	0.0159	429.2	1.736	0.0146	427.5	1.726	55
60	0.0193	436.9	1.769	0.0177	435.4	1.759	0.0164	433.8	1.750	0.0151	432.2	1.740	60
65	0.0198	441.1	1.782	0.0182	439.7	1.772	0.0168	438.3	1.763	0.0156	436.8	1.754	65
70	0.0203	445.3	1.795	0.0187	444.0	1.785	0.0173	442.7	1.776	0.0160	441.2	1.767	70
75	0.0208	449.5	1.807	0.0192	448.3	1.797	0.0177	447.0	1.788	0.0165	445.7	1.780	75
80	0.0213	453.7	1.819	0.0196	452.5	1.809	0.0182	451.3	1.801	0.0169	450.0	1.792	80
85	0.0217	457.8	1.830	0.0201	456.7	1.821	0.0186	455.6	1.813	0.0173	454.4	1.804	85
90	0.0222	462.0	1.842	0.0205	460.9	1.833	0.0190	459.8	1.824	0.0177	458.7	1.816	90
95	0.0226	466.1	1.853	0.0209	465.1	1.844	0.0194	464.0	1.836	0.0181	463.0	1.828	95
100	0.0231	470.2	1.864	0.0213	469.2	1.855	0.0198	468.2	1.847	0.0185	467.2	1.839	100
105	0.0235	474.3	1.875	0.0218	473.4	1.866	0.0202	472.4	1.858	0.0189	471.5	1.851	105
110	0.0239	478.4	1.886	0.0222	477.5	1.877	0.0206	476.6	1.869	0.0193	475.7	1.862	110
115	0.0244	482.6	1.896	0.0226	481.7	1.888	0.0210	480.8	1.880	0.0196	479.9	1.873	115
120	0.0248	486.7	1.907	0.0230	485.8	1.899	0.0214	485.0	1.891	0.0200	484.1	1.884	120
125	0.0252	490.8	1.917	0.0234	490.0	1.909	0.0218	489.2	1.902	0.0204	488.3	1.894	125
130	0.0256	494.9	1.928	0.0238	494.1	1.920	0.0222	493.4	1.912	0.0207	492.6	1.905	130
135	0.0260	499.1	1.938	0.0242	498.3	1.930	0.0225	497.5	1.922	0.0211	496.8	1.915	135
140	0.0265	503.2	1.948	0.0246	502.5	1.940	0.0229	501.7	1.933	0.0214	501.0	1.925	140
145	0.0269	507.4	1.958	0.0249	506.7	1.950	0.0233	505.9	1.943	0.0218	505.2	1.936	145
150	0.0273	511.5	1.968	0.0253	510.9	1.960	0.0236	510.2	1.953	0.0221	509.5	1.946	150
155	0.0277	515.7	1.978	0.0257	515.1	1.970	0.0240	514.4	1.963	0.0225	513.7	1.956	155
160	0.0281	519.9	1.987	0.0261	519.3	1.980	0.0243	518.6	1.972	0.0228	518.0	1.965	160
165	0.0285	524.1	1.997	0.0264	523.5	1.989	0.0247	522.9	1.982	0.0231	522.2	1.975	165
170	0.0289	528.3	2.007	0.0268	527.7	1.999	0.0250	527.1	1.992	0.0235	526.5	1.985	170
175	0.0292	532.6	2.016	0.0272	532.0	2.009	0.0254	531.4	2.001	0.0238	530.8	1.995	175
180	0.0296	536.8	2.026	0.0276	536.2	2.018	0.0257	535.6	2.011	0.0241	535.1	2.004	180
185	0.0300	541.1	2.035	0.0279	540.5	2.027	0.0261	539.9	2.020	0.0245	539.4	2.014	185
190	0.0304	545.3	2.044	0.0283	544.8	2.037	0.0264	544.2	2.030	0.0248	543.7	2.023	190

Temp °C	Absolute Pressure kPa												Temp °C
	1800 (46.71°C)			1900 (49.03°C)			2000 (51.27°C)			2100 (53.43°C)			
	V	H	S	V	H	S	V	H	S	V	H	S	
	(0.0127)	(417.1)	(1.690)	(0.0119)	(417.4)	(1.687)	(0.0113)	(417.5)	(1.683)	(0.0106)	(417.6)	(1.680)	
50	0.0130	420.6	1.700	0.0120	418.4	1.690	-	-	-	-	-	-	50
55	0.0135	425.6	1.716	0.0126	423.7	1.706	0.0116	421.6	1.696	0.0108	419.4	1.686	55
60	0.0140	430.5	1.731	0.0130	428.7	1.721	0.0121	426.9	1.712	0.0113	424.9	1.702	60
65	0.0145	435.2	1.745	0.0135	433.6	1.736	0.0126	431.9	1.727	0.0118	430.1	1.718	65
70	0.0149	439.8	1.758	0.0139	438.3	1.750	0.0130	436.8	1.741	0.0122	435.1	1.733	70
75	0.0154	444.3	1.771	0.0143	442.9	1.763	0.0134	441.5	1.755	0.0126	440.0	1.747	75
80	0.0158	448.8	1.784	0.0147	447.5	1.776	0.0138	446.1	1.768	0.0130	444.7	1.760	80
85	0.0162	453.2	1.796	0.0151	451.9	1.788	0.0142	450.7	1.781	0.0134	449.4	1.773	85
90	0.0166	457.5	1.808	0.0155	456.4	1.801	0.0146	455.2	1.793	0.0137	454.0	1.786	90
95	0.0169	461.9	1.820	0.0159	460.8	1.813	0.0149	459.6	1.806	0.0141	458.5	1.798	95
100	0.0173	466.2	1.832	0.0162	465.1	1.825	0.0153	464.1	1.817	0.0144	463.0	1.811	100
105	0.0177	470.5	1.843	0.0166	469.5	1.836	0.0156	468.5	1.829	0.0148	467.4	1.822	105
110	0.0180	474.7	1.854	0.0170	473.8	1.847	0.0160	472.8	1.841	0.0151	471.8	1.834	110
115	0.0184	479.0	1.866	0.0173	478.1	1.859	0.0163	477.2	1.852	0.0154	476.2	1.845	115
120	0.0188	483.3	1.876	0.0176	482.4	1.870	0.0166	481.5	1.863	0.0157	480.6	1.857	120
125	0.0191	487.5	1.887	0.0180	486.7	1.880	0.0170	485.8	1.874	0.0160	484.9	1.868	125
130	0.0194	491.8	1.898	0.0183	490.9	1.891	0.0173	490.1	1.885	0.0163	489.3	1.878	130
135	0.0198	496.0	1.908	0.0186	495.2	1.902	0.0176	494.4	1.895	0.0166	493.6	1.889	135
140	0.0201	500.3	1.919	0.0190	499.5	1.912	0.0179	498.7	1.906	0.0169	498.0	1.900	140
145	0.0205	504.5	1.929	0.0193	503.8	1.922	0.0182	503.0	1.916	0.0172	502.3	1.910	145
150	0.0208	508.8	1.939	0.0196	508.1	1.932	0.0185	507.3	1.926	0.0175	506.6	1.920	150
155	0.0211	513.0	1.949	0.0199	512.3	1.943	0.0188	511.7	1.936	0.0178	511.0	1.931	155
160	0.0214	517.3	1.959	0.0202	516.6	1.953	0.0191	516.0	1.946	0.0181	515.3	1.941	160
165	0.0218	521.6	1.969	0.0205	520.9	1.962	0.0194	520.3	1.956	0.0184	519.6	1.951	165
170	0.0221	525.9	1.978	0.0208	525.2	1.972	0.0197	524.6	1.966	0.0187	524.0	1.960	170
175	0.0224	530.2	1.988	0.0211	529.6	1.982	0.0200	529.0	1.976	0.0190	528.3	1.970	175
180	0.0227	534.5	1.998	0.0214	533.9	1.991	0.0203	533.3	1.986	0.0192	532.7	1.980	180
185	0.0230	538.8	2.007	0.0217	538.2	2.001	0.0206	537.7	1.995	0.0195	537.1	1.989	185
190	0.0233	543.1	2.017	0.0220	542.6	2.010	0.0209	542.0	2.005	0.0198	541.5	1.999	190
195	0.0236	547.5	2.026	0.0223	546.9	2.020	0.0211	546.4	2.014	0.0201	545.8	2.008	195
200	0.0240	551.8	2.035	0.0226	551.3	2.029	0.0214	550.8	2.023	0.0203	550.2	2.018	200

6.5 Consumo unitario en la producción de cloro – soda

Condiciones de operación de una celda electrolítica en particular:

Carga:	120 kA
Voltaje de la celda:	3.90 Vcc
Eficiencia:	96.5 %

Producción de cloro:	154 kg/h
Producción de soda cáustica:	173 kg/h
Producción de hidrógeno:	4.3 kg/h

Consumo unitario, (*t cloro)

Energía:	3200 kw.h/t
Sal:	1.7 t/t
Ácido clorhídrico:	40 kg/t
Soda cáustica:	14 kg/t
Carbonato de sodio:	12 kg/t
Floculante:	80 gr/t

**Tabla 6.1 Principales usos de los productos
de la planta Cloro – Soda:**

Soda cáustica	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Química orgánica. ✓ Pulpa y Papel. ✓ Química inorgánica. ✓ Producción de alúmina. ✓ Industria textil. ✓ Industria del rayón. ✓ .Secado. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Procesamiento de gas y petróleo. ✓ Tratamiento de aguas. ✓ Sector alimenticio. ✓ Neutralización. ✓ Jabón y surfactantes
Hipoclorito de sodio	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tratamiento de aguas. ✓ Industria textil. ✓ Pulpa y papel. ✓ Hidróxido férrico. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Dióxido de manganeso. ✓ Nitratos. ✓ Sulfatos. ✓ Cianatos.
Ácido clorhídrico	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Industria química y petroquímica. ✓ Tratamiento de aguas. ✓ Alimentación. ✓ Adhesivos. ✓ Dicloroetano. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Minería y petróleo. ✓ Industria textil. ✓ Acondicionamiento de superficies metálicas. ✓ Dióxido de cloro
Cloro	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Dicloroetano. ✓ Tratamiento de agua. ✓ Tricloruro de fósforo. ✓ Dicloruro de azufre. ✓ Cloroaminas. ✓ Cloruro de hidrógeno. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Hipoclorito de sodio. ✓ Dióxido de cloro. ✓ Tetracloruro de titanio. ✓ Pulpa y papel. ✓ Fosgeno. ✓ Hidracina
Hidrógeno	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cloruro de hidrógeno 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Combustible

VII. GLOSARIO

Acheson graphite

Grafito tratado con el proceso *Acheson*.

DDT

Difenil dicloro tricloroetano. Insecticida de alta toxicidad descubierto en 1939.

Dioxinas

El término dioxinas se refiere a un grupo de compuestos que tienen 2 anillos de benceno conectados con 1 o 2 átomos de oxígeno. El número de átomos de cloro varía de 1 a 8. La toxicidad de las dioxinas es variable, 17 de 210 dioxinas y furanos son tóxicos.

Minamata

En la bahía de Minamata (Japón) ocurrió un incidente de contaminación con mercurio alrededor del año 1950. La industria que ocasionó este incidente producía acetaldehído usando mercurio en su proceso.

POPs

Productos o subproductos químicos que son tóxicos y bioacumulables. La vida media de estos productos es mayor a 2 y 6 meses en agua y arcilla o tierra respectivamente.

Los POPs tiene una fuerte acumulación en la cadena alimenticia. Los POPs son bifenilos policlorados, dioxinas, furanos, aldrin, dieldrin, DDT, endrin, etc.

Seveso

Seveso es un incidente ocurrido en Italia el año 1976. Este incidente se refiere a una explosión de una planta química que ocasionó una contaminación ambiental con dioxinas.

Sintered graphite

Grafito sinterizado.

Stoneware

Recipientes fabricados con una arcilla especial.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Le Carbone Lorraine – Sintaclor, Three major innovations in the synthesis of hydrochloric acid.
- Regner, Albert - Electrochemical processes in chemical industries. Czechoslovakia, Artia, 1957. 468 Pág.
- Soda bleach solutions handbook. Oxichem. Website:
www.oxichem.com
- Schmittinger, Peter - Chlorine, Principles and industrial practice. 1st ed, Germany, Wiley-VCH, 2000. 256 Pág.
- Quimpac S.A - Instrucciones para manejo seguro de cloro. 30 Pág.
- Treybal, Roberto - Operaciones de transferencia de masa. 2^{da} ed. México, Mc Graw Hill, 1988. 860 Pág.
- Sconce, J. S. - Chlorine, Its manufacture, properties and uses. United States of America. Reinhold Publishing Corporation, 1962. 910 Pág.
- Stal - Instruction manual. 1982.