

14
lej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**Facultad de Estudios Superiores
"CUAUTITLAN"**

LICUEFACCION, VAPORIZACION Y RECUPERACION DE CLORO EN UNA PLANTA ELECTROLITICA CLORO - SOSA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A :
ALVARO ENRIQUE LIMA ARROYO

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

México,

1988



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

C O N T E N I D O

PROLOGO

I. INTRODUCCION

- 1.1 Propiedades físicas y químicas de cloro**
- 1.2 Historia industrial**
- 1.3 Generalidades de los métodos de fabricación**
- 1.4 Usos de cloro y principales compuestos clorados**

II. PROCESO ELECTROLITICO EN CELDAS DE DIAFRAGMA

- 2.1 Descripción del proceso electrolítico**
- 2.2 Balance de materia en celdas de diafragma**

III. LICUEFACCION

- 3.1 Principios básicos de licuefacción**
- 3.2 Licuefacción de cloro**
- 3.3 Ciclos de refrigeración**
- 3.4 Refrigerantes. Características deseables**

IV. VAPORIZACION

- 4.1 Principios básicos de vaporización**
- 4.2 Generalidades sobre equipo de vaporización de cloro**

V. RECUPERACION

- 5.1 Métodos de recuperación**
- 5.2 Selección del método de recuperación**

VI. BASES DE DISEÑO

- 6.1 Elección de bases de diseño**
- 6.2 Bases de diseño**

VII. ELECCION DE EQUIPO

- 7.1 Diseño termodinámico del sistema de licuefacción**
- 7.2 Descripción del método de recuperación**
- 7.3 Descripción del sistema de vaporización**
- 7.4 Materiales recomendados para la construcción de equipos, tuberías y accesorios para manejo de cloro.**

VIII. DISEÑO DE EQUIPO

- 8.1 Diseño del equipo de licuefacción**
- 8.2 Diseño del equipo de vaporización. Método de cálculo de los coeficientes individuales de transferencia de calor**
- 8.3 Diseño del equipo de recuperación**
- 8.4 Diafragmas. Bloques, proceso, tuberías e instrumentos y localización.**

IX. CONCLUSIONES

PROLOGO

Hecho muy frecuente en algunos países es encontrar un desequilibrio entre el consumo de cloro y su producción.

Siendo la sosa una materia prima de amplio uso industrial, el proceso electrolítico se ha desarrollado con el objetivo de obtener este producto, por lo que encontramos al cloro como un subproducto del proceso.

Debido a la gran demanda existente de sosa encontramos una sobreproducción de cloro que a pesar de su importancia en la industria, por ejemplo en desinfectantes, insecticidas, blanqueadores, productos de uso industrial (sales de cloro) e industria petroquímica, se tiene que desechar en algunas industrias productoras de sosa.

Por lo mencionado anteriormente se hace necesario idear un sistema de procesamiento en el cual se pueda almacenar el cloro, una forma adecuada de almacenarlo es en estado líquido.

El objetivo de este trabajo es describir y diseñar un sistema que incluya la licuefacción, recuperación y vaporización de cloro, aplicable a una planta que produzca cloro mediante un proceso electrolítico con una pureza en los gases de salida de los electrolizadores del 98% en peso base seca.

Establecer el método de cálculo apropiado para el diseño del equipo que constituye el sistema en estudio y efectuar el diseño de los mismos para una capacidad preestablecida de 250,000 toneladas por año de cloro.

El sistema diseñado tratará de procesar toda la producción de cloro y así evitar su desperdicio.

I

I N T R O D U C C I O N

Debido a que el objetivo principal de este trabajo es la obtención de cloro en este capítulo se abordan algunos aspectos que se consideran importantes para el conocimiento un poco más profundo de este elemento

1.1 Propiedades físicas y químicas de cloro**1.1.1 Propiedades físicas:**

El cloro es un gas amarillo verdoso, de olor penetrante, desagradable e irritante. Inflama las mucosas de la nariz y garganta, y respirado en cantidades apreciables (40.60 ppm) ^(g) con gestiona los tejidos pulmonares, pudiendo producir la muerte.

El gas es dos veces y media más pesado que el aire. El cloro es poco soluble en agua; a presión atmosférica, 100 g. de agua a 0°C disuelven 1.46 g. Enfriando a -33.70°C, el gas se convierte en un líquido amarillo a presión de un atmósfera, que a -102°C se congela en un sólido de color amarillo pálido. Su temperatura crítica es de 144°C, su presión crítica es de 76.10 atm. y su volumen crítico es $1.74 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$.

Símbolo	Cl
Número atómico	17
Peso molecular	35.457
Índice de Masa	35 y 37
Abundancia de Isótopos naturales	35 - 75.48
	37 - 24.68
Estado natural	Gas
Color de vapor	Amarillo
Punto de fusión	-102°C
Punto de ebullición	-33.70°C
Densidad de líquido	1.557 g/cm³
Solubilidad a -20°C	0.732 g. en 100 g. de agua
Calor específico	0.11 cal/g.°C
Calor de fusión	16.30 cal/gmol
Radio atómico - Covalente	0.994 Å°
Radio del ión - cloruro	1.81 Å°
Potencial de - Ionización	13.01 ev
Electroafinidad	3.78 ev

1.1.2 Propiedades Químicas:

El cloro se combina en la mayoría de los elementos para formar compuestos binarios llamados cloruros. Reacciona con muchos compuestos, desplazando otros elementos, tales como oxígeno, iodo y bromo.

1.1.2.1 Acción Sobre los Metales:

Casi todos los metales se combinan con el cloro para formar cloruros, variando de unos a otros la intensidad de la reacción. El sodio puesto en cloro seco se combina lentamente, pero cuando se caliente arde con llama brillante y se convierte en cloruro de sodio. Esparciendo antimonio finamente dividido en una atmósfera de cloro a temperatura ordinaria, se inflama en el acto y arde también con llama brillante, formando una nube blanca de tricloruro de antimonio sólido. Análogamente reaccionan con cloro los metales, hierro y cobre, estando el gas perfectamente seco, no existe acción sobre estos elementos, y por esto el cloro puede almacenarse y transportarse en cilindros o tubos de hierro o acero. A temperaturas ordinarias el cloro seco reacciona con aluminio, arsénico, oro, mercurio, selenio, telurio y titanio.

1.1.2.2 Acción Sobre no Metales:

El cloro se combina directamente con casi todos los elementos no metales, exceptuando el carbono, nitrógeno y oxígeno. Sin embargo, se conocen cloruros de estos elementos, los cuales pueden obtenerse por métodos indirectos. El fósforo arde en cloro, formando tricloruro de fósforo, líquido incoloro, o si existe cloro en exceso, pentacloruro de fósforo, sólido amarillo pálido. El cloro se combina directamente con azufre fundido, formando monoclорuro de azufre, líquido amarillo.

1.1.2.3 Acción Sobre Hidrógeno:

Cuando se introduce un dardo de hidrógeno encendido en una vasija de -

cloro, continúa ardiendo, y se forma ácido clorhídrico.



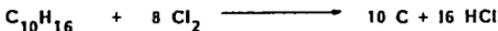
Cuando se mezclan hidrógeno y cloro a temperatura ordinaria, no hay reacción perceptible en la obscuridad; a la luz difusa reaccionan lentamente; pero a la luz solar directa, o en la de magnesio, rica en rayos actínico (de alta frecuencia o pequeña longitud de onda), la reacción se realiza con violencia explosiva.

1.1.2.4 Acción Sobre Compuestos Hidrogenados:

Puesto que el cloro se combina con el hidrógeno libre, debe esperarse - que reaccione así como con compuestos que lo contengan. Así, el gas - natural, que contiene gran proporción de metano, continúa ardiendo - cuando se introduce una corriente encendida en una vasija llena de cloro, pero la combustión es incompleta y se forma carbono libre.



Al introducir en gas cloro una tira de papel filtro previamente humedecido con trementina ($\text{C}_{10}\text{H}_{16}$), se inflama produciendo una nube negra - (carbón finamente dividido) y ácido clorhídrico.

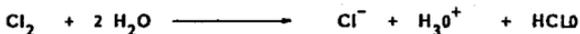


Regulando las condiciones de la reacción entre el cloro y un hidrocarburo, se puede conseguir una sustitución parcial del hidrógeno por cloro.

1.1.2.5 Acción Sobre Otros Compuestos:

Cuando el cloro se disuelve en agua reacciona con el disolvente. Una solución de cloro en agua contiene los ácidos clorhídrico e hipocloroso en

equilibrio con el cloro disuelto y el agua.



El equilibrio se alcanza cuando ha reaccionado aproximadamente una tercera parte del cloro. El ácido hipocloroso es inestable, y a la luz solar se descompone en ácido clorhídrico y oxígeno; este último se desprende de la disolución en forma de oxígeno molecular.



A medida que avanza esta reacción, el equilibrio anterior se desplaza hacia la derecha, hasta que, finalmente la disolución contiene tan solo ácido clorhídrico y un poco de oxígeno disuelto. Si se usa agua de cloro en una reacción en la que se consume cloro, el equilibrio se desplaza totalmente hacia la izquierda, los ácidos clorhídrico e hipocloroso reaccionan produciendo agua y cloro.

Si se disuelve cloro en una disolución de una sustancia que suministra una alta concentración de iones hidroxilo, tal como el hidróxido de sodio, se forman cloruro de sodio e hipoclorito de sodio.



El cloro desplaza varios elementos no metálicos de sus iones, lo que demuestra su mayor actividad expresada por su mayor potencial estándar de reducción. Estas reacciones de desplazamiento resultan de transferirse electrones de los iones de los elementos desplazados a los átomos de cloro.

1.2 Historia Industrial

Scheele, en 1774, haciendo actuar el ácido clorhídrico sobre dióxido de magnesio, obtuvo por vez primera el cloro, y lo denominó "GAS DE ACIDO MARINO DESFLOGISTICADO". La idea de que este gas era un cuerpo compuesto prevaleció hasta el año 1809 en que Gay-Lussac y Thenard indicaron que era probablemente un cuerpo simple; esta suposición fué confirmada por las investigaciones de Davy en 1810. Davy dió al cloro el nombre que todavía lleva y que deriva del griego amarillo verdoso debido a su color característico.

El cloro nunca se encuentra libre en la naturaleza; se encuentra, en cambio principalmente combinado con sodio, potasio, calcio, magnesio, etc. En forma de cloruros alcalinos, se encuentra también en cantidades considerables en el agua de mar y en muchas aguas minerales.

1.3 Generalidades de los Métodos de Fabricación.

El cloro se obtiene industrialmente por:

1.3.1 La acción del ácido clorhídrico sobre cuerpos capaces de oxidar el hidrógeno, obtenido así el cloro en libertad. Los métodos de oxidación adoptados:

1.3.1.1 Por la Acción de Dióxido de Magnesio:

Las materias empleadas son: una solución de ácido clorhídrico en agua o ácido muriático, la solución empleada debe ser lo más concentrada posible, pues el agotamiento del ácido por el dióxido de magnesio es imposible, y queda siempre un líquido residual que contiene una cantidad considerable que no se puede utilizar de dicho ácido. Cuando más concentrada es al principio la solución de ácido clorhídrico, tanto menor es la proporción de ácido perdido.

El ácido sulfúrico es la única impureza que se presenta en cantidad suficiente, en el ácido clorhídrico comercial, para perjudicar a la obtención de cloro.

1.3.1.2 Por Acción del Oxígeno Atmosférico Ayudada por la Presencia de un Catalizador:

Procedimiento Deacon. Después de muchos ensayos infructuosos, los trabajos de Deacon y Hurter en los años siguientes a 1868 dieron por resultado un procedimiento apropiado para la obtención de cloro; este procedimiento se halla fundado en la oxidación directa del hidrógeno del ácido clorhídrico por el oxígeno atmosférico, en él se aprovechan más los materiales que en cualquier otro método. Este procedimiento se funda en el hecho, bien conocido de que una mezcla de ácido clorhídrico y oxígeno, a cierta temperatura y especialmente en contacto con sustancias porosas, se descompone parcialmente en agua y cloro; la descomposición puede ser auxiliada por medio de catalizadores. Teóricamente, todo el ácido clorhídrico se convertiría así en cloro, pero en la práctica, aún en las mejores condiciones, la descomposición obtenida es de unos dos tercios.

Muchas sustancias de contacto han sido propuestas para la obtención del cloro mediante el ácido clorhídrico y el aire; algunas de estas sustancias, constituyen productos obtenidos en la fabricación de cloro mediante los cloruros metálicos. Iamy (1873) realizó una investigación general sobre la acción mutua del ácido clorhídrico y del oxígeno en presencia de ciertos compuestos metálicos, donde las sales de cobre resultaron ser el catalizador más eficiente.

1.2.3 Electrólisis de Cloruros Metálicos:

Durante los últimos años se ha desarrollado considerablemente el proceso electrolítico de descomposición de los cloruros metálicos, principalmente los de sodio y potasio, en cloro libre y álcalis. Las dificultades - - -

encontradas para la descomposición electrolítica de los cloruros metálicos en escala industrial, ha sido en primer término de orden económico, por el costo de la corriente eléctrica y en segundo de orden técnico, por la dificultad de impedir la recombinación del cloro puesto en libertad en el electrodo positivo o ánodo con el álcali cáustico, que se forma alrededor del electrodo negativo o cátodo.

Los baños electrolíticos se pueden dividir de una manera un tanto imperfecta, en cuatro clases:

- a) Baños donde el electrolito es una sal fundida.
- b) Baños donde el electrolito es una disolución de sal, y en los que el cátodo y el ánodo van separados por un diafragma poroso.
- c) Baños donde el electrolito es una disolución de sal, empleándose un cátodo de mercurio móvil para separar el sodio producido impidiendo así la acción del cloro.
- d) Baños donde el electrolito es una disolución de sal, y en que la separación del cloro y la base dependen de la densidad.

1.4 Usos de Cloro y Principales Compuestos Clorados.

Grandes cantidades de cloro se emplean en agentes blanqueadores. - - El efecto decolorante del cloro proviene de la acción del ácido hipocloroso (HClO) oxidante muy activo. Si se somete a la acción del cloro húmedo - unas tiras de tela estampada, la materia colorante se destruye, lo que no sucede si el cloro está seco. No debe usarse sobre fibras de origen animal (lana, seda, etc.), pues es demasiado enérgico y las destruye; incluso debilita las de origen vegetal (algodón, etc.) Alrededor del 65% de la producción total del cloro se destina al blanqueo de pasta de papel y un 20% a la industria textil. Un método conveniente para suministrar cloro - destinado a blanquear algodón es en forma de cloruro de cal, este producto se obtiene haciendo pasar cloro sobre cal apagada.



El producto se denomina también cloro-hipoclorítico cálcico. Cuando los polvos de gas se tratan con un ácido, se desprende cloro.



El cloro se usa muchísimo para esterilizar el agua potable y de las piscinas. En forma de hipoclorito se emplea para disoluciones germicidas.

Entre los diversos usos del cloro se cuentan la fabricación de colorantes, drogas, desinfectantes y cloruros muy importantes como los de azufre, carbono, titanio, silicio, fósforo, etc. También se emplea para extraer o recuperar metales como el oro y estaño, de los minerales auríferos y de los recortes de hojalata respectivamente. Los tetracloruros de silicio y titanio se usan en la producción de cortinas de humo. Al dispersar en el aire una mezcla de amoníaco y tetracloruro de silicio, reaccionan con la humedad del aire formando nubes de partículas finamente divididas de cloruro amónico y de hidróxido de silicio.

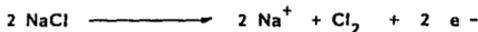
PROCESO ELECTROLITICO EN CELDAS DE DIAFRAGMA

Debido a el gran desarrollo de los procesos electrolfíticos, en la actualidad, son los procesos más utilizados para la obtención de álcalis y algunos sub productos, como cloro, así pues se hace necesario conocer algunos fundamentos de este tipo de procesos y en especial de las celdas de diafragma que son las seleccionadas para este trabajo.

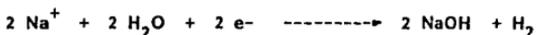
2.1 Descripción del proceso electrolfítico.

En un cristal de sal, el sodio y el cloro no están presentes en forma de moléculas neutras pero sí como átomos cargados eléctricamente (iones). El equilibrio entre las fuerzas de atracción y repulsión de los iones los mantiene estables, en formación regular que dá al cristal una forma cúbica visible. Cuando los cristales de sal son disueltos en agua o fundidos, la estructura organizada es destruída y los iones de sodio y cloro se movilizan. Si una corriente eléctrica se pasa a través de la solución (salmuera), o sal fundida, entre conductores sumergidos (electrodos), el ión positivo de sodio se mueve hacia el electrodo negativo (cátodo) y el ión negativo de cloro se mueve hacia el electrodo positivo (ánodo). En los electrodos los iones pierden su carga eléctrica y moléculas neutras de producto son liberadas. Las reacciones completas que toman lugar en el ánodo y el cátodo pueden ser representadas por las ecuaciones.

Anodo:



cátodo :



El proceso de descomposición se hace tan continuo como lo son los flujos de corriente. Faraday formuló sus leyes cuantitativas de la electroquímica como : (1) La cantidad de descomposición es proporcional a la cantidad de electricidad pasada, y (2) La misma cantidad de electricidad libera productos en proporción a sus respectivos equivalentes químicos. La segunda ley de Faraday es equivalente a la relación de que la misma cantidad de electricidad es corrida para todos los iones de la misma valencia.

Ambos sodio y cloro tienen valencia uno. Teóricamente por tanto, la corriente que libera 23 partes de sodio también libera 35.5 partes por peso de cloro, o en escala industrial, 1.54 toneladas de cloro son coproducidas con cada tonelada de sodio. Similarmente en la electrólisis de salmuera, 1.13 toneladas de hidróxido de sodio son coproducidas con cada tonelada de cloro. Estos rangos fijos de productos y coproductos son de gran importancia técnica y económica en la industria electroquímica.

En la producción electrolítica de cloro y sodio (o hidróxido de sodio), el principal artículo en los costos de manufactura es la energía eléctrica.

Todas las celdas electrolíticas para producir cloro e hidróxido de sodio a partir de salmuera, son de dos tipos principales : (1) "Celdas de Diafragma", son las que tienen un diafragma poroso, localizado entre los electrodos, previniendo así la reacción del cloro liberado en el ánodo

con el hidróxido de sodio formado en el cátodo; (2) "Celdas de Mercurio" o "Cátodo de Mercurio", son en las cuales se previene la reacción del sodio, con agua de la salmuera o cloro, por la formación de una amalgama con mercurio, el que también sirve como cátodo. La amalgama se hace reaccionar con agua en una celda por separado, liberando hidrógeno e hidróxido de sodio. En celdas que dependen del diafragma para mantener la separación de los productos de reacción, la salmuera contiene el hidróxido de sodio formado, el cual tiene que ser separado por concentración posterior del licor y removido del cloruro de sodio, que cristaliza.

Celdas de Diafragma : El diafragma poroso y químicamente resistente inventado en 1886 por Brever, fue el componente esencial de una celda de diafragma práctica. La invención de Brever fue usada por la compañía Griesheim en Alemania, en una escala de 300 Kw, en la primera planta comercial para la producción electrolítica de cloro usando cloruro de potasio como electrolito.

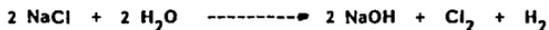
Todas las celdas de diafragma modernas tienen sus electrodos y diafragmas dispuestos en forma vertical solo las viejas, y en otro tiempo importantes celdas German Billiter, tienen un diafragma horizontal falso en un cátodo horizontal. Generalmente el cátodo sirve como un soporte del diafragma. En las modernas celdas el cátodo y el diafragma asociado separan el volumen principal del electrolito, conteniendo hidróxido de sodio, que casi sigue el comportamiento catódico. Le Sueur toma la decisión de mantener el nivel del electrolito más alto en el lado del ánodo, que en el lado del cátodo del diafragma, así la lenta infiltración de salmuera contrarresta la tendencia de los iones hidróxido a moverse hacia el compartimiento anódico. En 1890 James Hargreaves y Thomas Bird de Widnes-Lancashire, inventan una celda de diafragma en que el licor cáustico

sale del cátodo perforado a un compartimiento catódico casi vacío, así se previene la reacción del álcali con el cloro en la región electrolítica. La celda Hargreaves-Bird fue el prototipo de todas las celdas de este tipo. Durante los pasados 75 años, unos 20 distintos diseños de celdas de diafragma han sido usados a escala industrial, algunas novedades se han presentado en las celdas modernas, tales como la incorporación de ánodos metálicos, el uso de plásticos especiales en lugar de concreto, ánodo y diafragma ensamblado, etc.

2.2.- Balance de material en celdas de diafragma.

En este punto se define la cantidad necesaria de cloruro de sodio para producir 250,000.00 toneladas al año de cloro líquido. Se utiliza una celda de diafragma como la descrita en el punto anterior, se toma en cuenta para la base de cálculo el cloro recuperado y una pureza en los gases de salida de los electrolizadores del 98% en peso.

La reacción que se lleva a cabo en la celda es la siguiente :



NaCl (S)

Cl₂ (C)

H₂ (H)

H₂O (W)

NaOH (L)

Balance Global :



Balance por componentes (balance por átomo) :

Para sodio

$$2 S = 2 L$$

$$S = L$$

Para cloro

$$2 S = 2 C$$

$$S = C$$

Para oxígeno

$$2 W = 2 L$$

$$W = L$$

Para hidrógeno

$$4 W = 2 L + 2 H$$

$$2 W = L + H$$

Base de cálculo : 32,597.40 Kg/Hr de cloro

$$C = 32,597.40 \text{ Kg/Hr}$$

$$C = 32,597.40 \frac{\text{Kg}}{\text{Hr}} \frac{1 \text{ Kgmol}}{71 \text{ Kg}} \frac{2 \text{ átomos}}{1 \text{ Kgmol}}$$

$$C = 918.236 \frac{\text{átomos}}{\text{Hr}} = 459.118 \frac{\text{Kgmol}}{\text{Hr}}$$

$$C = S$$

$$S = 918.236 \frac{\text{átomos}}{\text{Hr}} \text{ de cloro}$$

$$S = 918.236 \frac{\text{átomos}}{\text{Hr}} \frac{1 \text{ átomo de sodio}}{1 \text{ átomo de cloro}}$$

$$S = 918.236 \frac{\text{átomos}}{\text{Hr}} = 918.236 \frac{\text{Kgmol}}{\text{Hr}}$$

$$S = L$$

$$L = 918.26 \frac{\text{átomos}}{\text{Hr}} \text{ de sodio}$$

$$L = 918.236 \frac{\text{átomos}}{\text{Hr}} \frac{1 \text{ átomo de oxígeno}}{1 \text{ átomo de sodio}}$$

$$L = 918.236 \frac{\text{átomos}}{\text{Hr}} = 918.236 \frac{\text{Kgmol}}{\text{Hr}}$$

$$L = W$$

$$W = 918.236 \frac{\text{átomos}}{\text{Hr}} \text{ de oxígeno.}$$

$$W = 918.236 \frac{\text{átomos}}{\text{Hr}} \frac{2 \text{ átomos de hidrógeno}}{1 \text{ átomo de oxígeno}}$$

$$W = 1,836.473 \frac{\text{átomos}}{\text{Hr}} = 918.236 \frac{\text{Kgmol}}{\text{Hr}}$$

$$L = 918.236 \frac{\text{átomos}}{\text{Hr}} \frac{1 \text{ átomo de hidrógeno}}{1 \text{ átomo de sodio}}$$

$$L = 918.236 \frac{\text{átomos}}{\text{Hr}} = 918.236 \frac{\text{Kgmol}}{\text{Hr}}$$

$$2 W = L + H$$

$$H = 2 W - L$$

$$H = 2(1,836.473) - 918.236$$

$$H = 2,754.708 \frac{\text{átomos}}{\text{Hr}} = 1,377.354 \frac{\text{Kgmol}}{\text{Hr}}$$

Se comprueba con el balance global

$$2 S + 2 W = 2 L + C + H$$

$$2(918.236) + 2(918.236) = 2(918.236) + 459.118 + 1,377.354$$

$$3,672.944 = 3,672.944$$

$$S = 918.236 \frac{\text{Kgmol}}{\text{Hr}} \text{ de cloruro de sodio}$$

$$S = 53,716.806 \frac{\text{Kg}}{\text{Hr}} \text{ de cloruro de sodio}$$

Considerando una conversión de 56.52% y una concentración de la salmuera de 25% en peso.

$$\text{Salmuera} = \frac{(918.236) (58.50)}{(0.5652) (0.25)}$$

$$\text{Salmuera} = 380,161.40 \frac{\text{Kg}}{\text{Hr}} \text{ de salmuera}$$

I I I

L I C U E F A C C I O N

En esta sección se tratan de revisar algunos conceptos relacionados con licuefacción, tanto generales como específicos para cloro. También se incluyen algunos conceptos de refrigeración, pues es uno de los métodos más comunes de enfriamiento.

3.1 Principios Básicos de Licuefacción.

La fuerza de atracción entre las moléculas, es la fuerza que mantiene a las moléculas más próximas al estado líquido. Algunas sustancias son gaseosas a temperatura ambiente, debido a que la energía térmica de sus moléculas es mucho mayor que la pequeña energía que pueden proveer las fuerzas de atracción. La energía cinética de las moléculas es tanta que no les permite atraerse. Sin embargo a temperaturas muy bajas las fuerzas de atracción predomina, por lo que las sustancias se vuelven líquidas.

La temperatura para licuar un gas depende de la presión. Cuando el gas está altamente comprimido, las moléculas se mantienen más próximas entre sí. La expansión de un gas, se utiliza comúnmente para enfriarlo, debido a que el gas al expandirse utiliza su energía interna.

3.2 Licuefacción de Cloro (g)

El cloro producido en celdas de diafragma y de mercurio contiene agua, hidrógeno y aire. Puede también contener dióxido de carbono, del que algunas cantidades proceden del carbonato de sodio que existe en la salmuera de alimentación o del ataque electrofítico a los ánodos si éstos están hechos de grafito.



El cloro de las celdas de mercurio puede contener de 0.1-1% en volumen de hidrógeno y 0.1-0.5% de dióxido de carbono, así como del 1 al 2% de aire.

El hidrógeno contenido en el cloro de las celdas de diafragma puede ser del 0.1-0.5% en volumen y el aire contenido es superior al 1%. En cambio en las celdas de mercurio, el contenido de dióxido de carbono depende de todas maneras de los ánodos de grafito que sean usados, así en las modernas celdas; para celdas con ánodos de grafito el contenido de dióxido de carbono puede ser tan alto como un 2%, pero en celdas de ánodo de metal el nivel es sólo del 0.1-0.3%. El cloro de las celdas de sodio Down está seco, y libre de hidrógeno, sin embargo contiene, cerca de 1% en volumen de aire, polvo, tetracloruro de silicón (vapor), monóxido y dióxido de carbono. Todas estas impurezas, excepto el aire, son sustancialmente removidas por un lavado con agua, lo que permite el curso del cloro frío y húmedo requerido para ser secado.

Anterior a la licuefacción, el cloro proveniente de las celdas de salmuera es enfriado y secado. La temperatura máxima permitida para el gas de las celdas es de 85°C. El gas es enfriado, por ejemplo, por el paso a través de tuberías enfriadas externamente con agua, o por el paso hacia una torre en la cual están cayendo gotitas de agua fría.

Las gotas de humedad residual y la neblina de la salmuera del electrolizador, pueden ser removidas del gas frío por filtración, por ejemplo, a través de colchoncillos sustituibles de fibra sintética. Los vapores fríos de cloro de los cuales la mayoría de la humedad ha sido removida, son secados en torres de varios diseños por contacto con ácido sulfúrico en recirculación. Un sistema de 2 ó 3 torres en serie son normalmente empleadas, el ácido sulfúrico más concentrado (95% en peso) que existe es alimentado en la torre final de la serie y el ácido más diluido es introducido en la -

primera torre donde se contacta con el cloro de más alto contenido de humedad. El ácido sulfúrico es usualmente retirado del sistema de contracorriente cuando su concentración en la primera torre comienza a ser de aproximadamente el 75% en peso, cualquier ácido diluido existente, es reconcentrado o usado en cualquier otro proceso de la fábrica.

No se puede permitir que la concentración del ácido sulfúrico sea menor del 75% sin peligro de corrosión en la primera torre, la cual por razones de economía, está normalmente construida de acero. El secado preliminar, referido antes, generalmente reduce la cantidad de ácido sulfúrico concentrado que ha de ser usado en el proceso de secado. Este proceso de secado, da un gas cloro conteniendo menos de 0.1 g. de agua por metro cúbico de gas, y los gases de este secado pueden ser manejados en equipos de acero sin dificultad de corrosión. El gas seco puede ser entonces filtrado para remover partículas de sulfato de sodio derivadas de la reacción del ácido sulfúrico con las trazas de la niebla de la salmuera, que no fué removida en los filtros. En esta etapa el tricloronitrógeno, el cual puede presentarse de las trazas de impurezas amoniacales en la salmuera de alimentación, puede ser removido el gas, por ejemplo, por medio de un método fotoquímico. Las impurezas gaseosas del cloro, por ejemplo hidrógeno, oxígeno, etc., son casi insolubles en cloro líquido y después de la licuefacción del cloro la mayor parte de estas impurezas son removidas en los gases de cola, los cuales pueden ser usados en otro proceso, por ejemplo en la producción de ácido hipocloroso o hipoclorito de sodio, alternativamente los gases de cola pueden ser tratados separadamente para la recuperación de cloro.

A presión atmosférica el cloro líquido ebulle a -33.70°C mientras que a 30°C la presión de vapor del líquido es 8.8 Kg/cm^2 abs., el gas por lo tanto puede ser licuado por una compresión moderada, por refrigeración, o por una combinación de estos dos procesos.

bromuro de litio que ha absorbido el vapor de agua, se bombea por el intercambiador de calor de la solución hacia el generador, para reconstituir la solución débil. En este último se emplea vapor de agua a baja presión (0.544 a 0.952 Kg/cm² man.), para emitir vapor de agua por ebullición, concentrando así la solución salina antes de volver a entrar al absorbedor. El agua desprendida por ebullición en el generador se condensa entonces para obtener un líquido dentro de la sección del condensador, y el condensado se devuelve al evaporador.

3.4 Refrigerantes. Características Deseables (7)

Se les da el nombre de refrigerantes a los cuerpos usados para absorber el calor de otro cuerpo que se desea enfriar. Existen varios compuestos que pueden ser empleados como refrigerantes como los siguientes.

- a) Solución acuosa de sales inorgánicas como cloruro de sodio o calcio. Se emplean comúnmente para sistemas de refrigeración de temperaturas hasta -40°C o mayores, se utilizan generalmente en su forma inhidrada pues son altamente corrosivas.
- b) Solución acuosa de compuestos orgánicos como alcoholes o glicoles. También como las soluciones acuosas de sales inorgánicas se emplean comúnmente para temperaturas de -40°C o mayores debido a su alto punto de congelamiento, su uso más general es como anticongelantes, debido a sus deficientes coeficientes de transferencia de calor a temperaturas bajas.
- c) Hidrocarburos y halocarburos clorados y fluorados que incluyen cloruro de metileno, tricloroetileno, etc. Se utilizan para refrigeración a temperaturas menores a -40°C debido a sus propiedades favorables a bajas temperaturas.

Para poder llevar a cabo una selección adecuada del refrigerantes es importante conocer su relación de temperatura-presión-volumen y propiedades como la entalpfa, densidad, peso molecular, flambilidad, toxfcidad, punto de ebullición, punto de congelamiento, etc.

Uno de los factores importantes para la selección de un refrigerante es su costo. Los requerimientos para el refrigerante ideal pueden variar en orden y número de importancia, dependiendo de las necesidades particulares del caso o del criterio del diseñador, pero es posible poder resumirlo estableciendo:

- a) El refrigerante debe ser inodoro, no irritante, no tóxico, no inflamable, no venenoso en cualquier concentración, con el fin de evitar toda posibilidad de pánico en los lugares de operación dándose el caso de que el refrigerante escapara del sistema en forma accidental o cuando se vea sujeto a reparación o labores de servicio.
- b) El refrigerante debe tener propiedades físicas, químicas y termodinámicas las cuales permiten su uso y rápida adaptación a los diseños actuales de equipo de refrigeración y al mismo tiempo producir un servicio eficiente a un costo bajo durante un relativamente largo período de operación.

En función del refrigerante seleccionado están los materiales de construcción.

I V

V A P O R I Z A C I O N

Este capítulo revisa algunos conceptos básicos de vaporización y también algunas generalidades sobre el equipo de vaporización para calor.

4.1.- Principios básicos de vaporización.

La vaporización de líquidos se puede deber a diversos mecanismos de transferencia de calor individuales o en combinación. Por ejemplo, una vaporización puede existir por el calor absorbido, por radiación y convección, en la superficie del líquido, o bien, como resultado del calor absorbido por convección natural a partir de una pared caliente bajo la superficie del líquido. También se producen vaporizaciones a partir de películas descendentes (lo inverso a la condensación) y mediante la descomposición completa y violenta de líquidos sobrecalentados por convección forzada, a presión (flash).

El método industrial más común de evaporación es la transferencia de calor a partir de una pared caliente colocada bajo la superficie del líquido a evaporar, esto se logra cuando en la superficie de la pared se forman burbujas al azar y el calor que pasa a través de la superficie de la pared donde no se forman burbujas, entra por convección al líquido que la rodea. Cuando se ha desarrollado suficiente fuerza ascendente entre la burbuja y el líquido, ésta se libera de las fuerzas que la mantienen adherida a la pared y sube a la superficie del líquido. Existen distintos factores que afectan la velocidad de transferencia de calor como son :

- (1) La naturaleza de la superficie y distribución de las burbujas;

(2) Propiedades del líquido tales como tensión superficial, coeficiente de expansión y viscosidad; (3) La diferencia de temperatura entre la superficie y el líquido que afecta la evolución y vigor de las burbujas.

4.2.- Generalidades sobre equipo de vaporización de cloro.

Los vaporizadores de cloro más utilizados son los recipientes enchaquetados y los calentadores de serpentín o banco de tubos. Los recipientes enchaquetados se utilizan cuando se necesita limpieza frecuente o para los de recubrimiento de vidrio que son difíciles de equipar con serpentines internos. La chaqueta elimina la necesidad de serpentín y da un mejor coeficiente de transferencia de calor que los serpentines externos, sin embargo, sólo se dispone de un área de transferencia de calor limitada.

Calentadores de serpentín o banco de tubos, en este caso se utilizan del tipo banco de tubos, colocados ya sea en posición vertical se utilizan generalmente para grandes cargas de evaporación y los tubos colocados en posición horizontal se utilizan para cargas de evaporación pequeñas, ambos tipos se utilizan para fluidos limpios que no forman incrustaciones en grandes cantidades; un criterio importante para la selección del equipo es la altura del mismo, que en el caso de colocación vertical es mayor que en el caso de colocación horizontal, debido a su alto costo de instalación y a la facilidad de manejo del banco de tubos.

V

RECUPERACION

Puesto que el contenido de cloro en los gases incondensables producto de la licuefacción es elevado, es necesario recuperarlo para evitar pérdidas económicas considerables, así como la contaminación atmosférica. Aquí se muestran algunos métodos de recuperación y se selecciona el método a utilizar para la recuperación.

5.1.- Métodos de recuperación.

5.1.1.- Neutralización con sosa : Este método consiste en la neutralización del cloro con sosa cáustica, obteniéndose una solución acuosa de hipoclorito de sodio, cuya principal aplicación es como blanqueador líquido. Los inconvenientes son : la estabilidad de la solución se puede perder a PH mayor de once y temperaturas más elevadas de 302.44°K, ade más de que no debe manejarse en metales catalíticos fuertes.

5.1.2. Absorción en sílica gel : Este método consiste en absorber el cloro gaseoso en camas de sílica gel a elevadas presiones y recuperándolo por desorción en vacío. Los equipos utilizados son relativamente pequeños comparados con los de otros métodos, también se manejan sustancias nobles tanto sólidas como gaseosas. Los inconvenientes son : es un proceso intermitente y las capacidades económicas de operación son pequeñas.

5.1.3. Absorción en tetracloruro de carbono : Este método consiste en absorber el cloro en tetracloruro de carbono frío en una torre empacada.

Los gases inherentes salen del sistema por la parte superior de la torre mientras tanto el tetracloruro de carbono rico en cloro sale por el fondo de la torre de absorción y se introduce por diferencia de presión a una torre de desorción la cual opera a bajas presiones.

El tetracloruro de carbono pobre en cloro, se enfría después de que sale del fondo de la torre de desorción y se bombea a través de un post-enfriador hasta la parte superior de la torre de absorción. El cloro que se separa sale por la parte superior de la torre de desorción y retorna al sistema principal de licuefacción. Se mantiene un reflujo de cloro líquido en la parte superior de la torre, para asegurar que el tetracloruro de carbono no sea arrastrado por el cloro recuperado.

Las ventajas de este método son : la absorción es de 10 a 12 veces mayor en tetracloruro de carbono que en agua; el cloro recuperado se alimenta directamente al sistema de licuefacción principal; el equipo puede ser de acero al carbón ya que no se manejan sustancias corrosivas. Las desventajas son : el costo del tetracloruro de carbono, así como los costos de instalación y la instalación de un sistema adicional de recuperación del tetracloruro de carbono de los gases incondensables ya que es una sustancia cancerígena.

5.1.4. Absorción en agua : Este método consisten en absorber el cloro en agua fría a alta presión en una torre empacada. El agua rica en cloro se lleva a un sistema de desorción que puede ser : el calentamiento de la solución, o bien el cambio de presión, o ambos en un sistema mixto.

La desventaja de este método consiste en que se manejan sustancias altamente corrosivas, como el cloro húmedo y el agua de cloro, por lo que los costos de instalación y operación se elevan por el costo de los

materiales especiales de construcción. La ventaja es el bajo costo del agua, su nula toxicidad y contaminación.

5.2.- Selección del método de recuperación.

El método seleccionado es el de absorción en agua debido a que se desea recuperar el cloro como tal, a la poca cantidad de cloro a recuperar, a las condiciones poco drásticas de presión y a que se trata de un sistema continuo. También se debe a la utilidad del agua clorada de desecho para venta o algún otro uso debido a su bajo contenido de cloro.

VI

BASES DE DISEÑO

En esta sección se establecen y justifican los lineamientos a seguir en el diseño del equipo de proceso.

6.1.- Elección de bases de diseño.

6.1.1.- Proceso.

En la actualidad un rango promedio de producción de cloro en celdas electrolíticas de diafragma es de 250,000 a 380,000 toneladas por año (9). En este trabajo se utilizará el límite inferior como base de diseño, lo que se supone caracterizaría una empresa de mediana capacidad, como las existentes en el país. El tiempo de operación es de 320 días por año, con lo cual se prevé un período de mantenimiento preventivo de 40 días por año (en los cuales se incluyen los días no laborables, por ejemplo 1° de Mayo).

La presión de operación mínima se selecciona de 1.1 Kg/cm² man., pues es una presión a la cual no se requieren equipos adicionales para mantenerla, los equipos no registran esfuerzos innecesarios y se asegura un exceso por alguna caída de presión que se puede presentar, como por ejemplo elevaciones o fricciones. La presión máxima de 8 Kg/cm² man. se selecciona por ser una presión relativamente baja y se encuentra en el rango de operación recomendado para cloro que es de 6.7 a 11.3 Kg/cm² abs.

La temperatura mínima de 273°K es seleccionada para disminuir la cantidad de cloro a recuperar de los gases incondensables. La temperatura máxima se fijó en 574°K para tratar de proveer el calentamiento debido a la compresión.

6.1.2.- Servicios Auxiliares.

El agua de absorción se alimenta a una presión próxima de 7 Kg/cm² man. y una temperatura cercana a 283°K, que son las condiciones del sistema de absorción.

El ácido sulfúrico se alimenta a la máxima concentración recomendada de 95% en peso y a condiciones próximas a las del sistema de secado, que son de 1 Kg/cm² man. de presión y 339°K de temperatura.

El cloruro de calcio que se utiliza como salmuera de enfriamiento se alimenta en concentración del 25% en peso y en condiciones cercanas a 1 Kg/cm² man. para manejarlo en condiciones de ligera presión, las temperaturas se manejan de 233°K la mínima recomendada hasta una máxima de 295°K que no es excesivamente alta y nos asegura hasta cierto punto un equipo pequeño de refrigeración, debido a una diferencia de temperatura relativamente corta. El cloruro de calcio se alimenta inhibido con dicromato de sodio debido a que es excesivamente corrosivo (se recomiendan 56.75 Kg para 28.317 m³ de salmuera y ajustar el PH a 7 con sosa).

El agua de enfriamiento se maneja a presiones próximas a 1 Kg/cm² man. y un cambio de temperatura de 293°K a 313°K recomendado para su manejo en torre de enfriamiento.

Para el vapor de calentamiento se utiliza una presión baja de 2.5 Kg/cm² man., pudiendo así utilizar un generador de vapor pequeño.

En la práctica, el cloro es licuado por cualquier proceso; por refrigeración a una presión cercana a la atmosférica, o por refrigeración acompañada por compresión. Un tipo común de refrigeración usado, es uno en el cual el cloro pasa a través de una serie de tubos rodeados por una chaqueta en la cual un refrigerante, tal como dióxido de carbono líquido o fluoro cloro-metano líquido, está recirculando. unidades simples de este tipo están siendo usadas para licuar de 500-1000 toneladas de cloro por día.

Puede ser calculado, utilizando las presiones de vapor correspondientes, que si el gas de celda contiene en volumen 98% de cloro, 0.4% de hidrógeno y 1.6% de aire, la licuefacción de cloro nos da un 95% de cloro y resultaría un gas de cola incondensable conteniendo cerca del 6% de hidrógeno. Existe un peligro de explosión cuando el hidrógeno contenido en los gases de cola excede del 4 ó 5%. Aunque el hidrógeno puede ser removido del gas de celda por tratamiento térmico o fotoquímico y después licuarse; el proceso más común y conveniente para evitar peligro es limitar el grado de licuefacción. Para que el gas de cola contenga menos hidrógeno que las proporciones peligrosas, como primer paso, se limita la licuefacción, como segundo paso, se diluyen los gases de cola con aire, con el 95% de cloro el gas de celda puede ser licuado con seguridad. Cuando los gases de cola contienen, por ejemplo, 80% de cloro pueden ser utilizados, para la producción de ácido clorhídrico. Una licuefacción menor del 95% puede realizarse sin inconvenientes. En general, un 95% de licuefacción es técnica y económicamente deseable para licuar una cantidad tan grande como sea posible de cloro. Varios procesos han sido ideados para recuperar cloro de los gases de cola, por absorción es un solvente frío, tal como el tetracloruro de carbono, y así obteniendo una solución fuerte de cloro, el cual es subsecuentemente liberado por calor.

3.3 Ciclos de Refrigeración (7)

3.3.1 Compresión:

Los cuatro componentes básicos del sistema de compresión son; compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador. El ciclo comprende dos presiones, una alta y otra baja, que permiten desarrollar un proceso continuo para producir un efecto de enfriamiento.

Conforme el refrigerante líquido fluye por el evaporador, el calor se absorbe de un fluido en vías de enfriamiento y el refrigerante hierve a consecuencia de ello. Luego el refrigerante vapor a baja presión se comprime y los niveles de presión y temperatura se elevan a un punto en que el vapor sobrecalentado se condensa utilizando el medio de enfriamiento disponible. Al comprimir el gas, el calor de compresión se agrega al vapor al aumentar la presión. Luego, el vapor pasa al condensador en donde el gas se licúa. A continuación, el refrigerante líquido fluye de éste a una válvula de expansión en donde su presión y su temperatura se reducen a las que prevalecen en el evaporador y, con ello, el ciclo queda completo.

3.3.2 Absorción:

Los cinco componentes básicos del sistema de absorción son; evaporador, absorbedor, solución intercambiadora de calor, generador y condensador. El ciclo de absorción consta de dos presiones que son normales, con temperaturas de agua fría de salida de 280.22°K a 281.33°K, una presión absoluta de 6.86 mm de Hg. en la sección evaporador-generador y 76.20 mm de Hg. de presión en la sección del generador-condensador.

El agua que deberá enfriarse penetra en el haz de tubos del evaporador (enfriador), en donde se enfría indirectamente con agua de rocío. El agua vaporizada se absorben mediante una solución fuerte o concentrada de bromuro de litio (absorbedor mas usado) a baja presión. A continuación, el

6.2.- Bases de diseño.

6.2.1.- Proceso.

Capacidad :	250,000 toneladas de cloro al año.
Tiempo de operación :	320 días por año.
Máxima presión de operación :	8 Kg/cm ² man.
Mínima presión de operación :	1.1 Kg/cm ² man.
Máxima temperatura de operación :	574° K
Mínima temperatura de operación :	273° K

6.2.2.- Servicios Auxiliares.

- Agua de absorción.

Máxima presión de alimentación :	8 Kg/cm ² man.
Mínima presión de alimentación :	7.1 Kg/cm ² man.
Máxima temperatura de alimentación :	287° K
Mínima temperatura de alimentación :	279° K

- Acido sulfúrico de absorción.

Concentración :	95% en peso
Máxima presión de alimentación :	1.1 Kg/cm ² man.

Mínima presión de alimentación : 0.9 Kg/cm² man.

Máxima temperatura de alimentación : 345.60° K

Mínima temperatura de alimentación : 332.40° K

- Salmuera de enfriamiento (cloruro de calcio inhibido)

Concentración : 25% en peso

Máxima presión de alimentación : 1.1 Kg/cm² man.

Mínima presión de alimentación : 0.9 Kg/cm² man.

Máxima temperatura de alimentación : 233° K

Mínima temperatura de retorno : 295° K

- Agua de enfriamiento

Máxima presión de alimentación : 1.1 Kg/cm² man.

Mínima presión de alimentación : 0.9 Kg/cm² man.

Máxima temperatura de alimentación : 295° K

Mínima temperatura de retorno : 309° K

- Vapor de calentamiento

Máxima presión de alimentación : 2.5 Kg/cm² man.

VII

ELECCION DE EQUIPO

En esta sección se define cada uno de los sistemas y algunas condiciones de operación del proceso, así como también algunas recomendaciones en cuanto a materiales para el manejo de cloro. La integración gráfica de los sistemas se encuentra en el diagrama de flujo de la sección 8.4.

7.1.- Diseño termodinámico del sistema de licuefacción.

El sistema de licuefacción será un sistema compuesto de compresión-condensación, subenfriando el cloro líquido para disminuir la cantidad de cloro en los incondensables a recuperar.

El cloro a comprimir se maneja a 339°K para evitar la disolución en el agua que contiene el ácido sulfúrico utilizado para el secado y también evitar la evaporación de la solución, debido al calentamiento que se genera al absorberse el agua en el ácido sulfúrico. La compresión se llevará hasta una presión de 7 Kg/cm² man. que es una presión baja, evitando así el uso de un compresor excesivamente grande. En el enfriamiento se elimina el sobrecalentamiento que se da debido a la compresión y se subenfriará a una temperatura de 273°K disminuyendo con esto la cantidad de cloro en los incondensables a recuperar.

7.2.- Descripción del método de recuperación.

El sistema de recuperación consta de una torre empacada, donde se realiza la absorción del cloro en agua. La desorción se llevará a cabo por un cambio de presión (lo cual nos ayuda también a manejar condiciones

menos drásticas de presión en los sistemas que no son de licuefacción) y por calentamiento (evaporación) con vapor en un cambiador de tubos y coraza. Tanto el cloro evaporado por cambio de presión, como el evaporado por calentamiento, se unen con el cloro generado en la celda electrolítica para ser secado.

7.3.- Descripción del sistema de vaporización.

El sistema de vaporización consta de un evaporador de tubos y coraza, con los tubos colocados en forma horizontal, debido a que los fluidos a manejar son fluidos limpios, que no depositan sales y que tienen poca carga de evaporación, por lo que se puede aprovechar el poco espacio vertical que ocupa el arreglo y su bajo costo con tubos rectos.

7.4.- Materiales recomendados para la construcción de equipos, tuberías y accesorios para manejo de cloro.

Debido a la nobleza del cloro seco en cuanto a corrosión e incrustaciones el material recomendado para la construcción de recipientes, accesorios y equipos es el acero al carbón A.S.T.M. A-203 grado C y para tuberías se recomienda acero al carbón cédula 80.

Debido a la excesiva corrosión que presenta el cloro húmedo, su manejo se realiza en materiales especiales. A bajas presiones se puede utilizar vidrio, políester reforzado con fibra de vidrio, cloruro de polivinilideno y porcelana, para altas presiones se pueden utilizar estos materiales reforzados con metales comunes. Los metales más usados para el manejo de cloro húmedo son titanio, tantalio, hastelloy alloy C y monel alloy B.

Para el manejo de cloro húmedo se recomienda utilizar como material para recipientes y tuberías el hastelloy alloy C por ser el de menor costo

con respecto a los demás metales que se pueden usar, para equipos y accesorios se recomiendan cloruro de polivinilideno y poliester reforzado con fibra de vidrio.

VIII**DISEÑO DE EQUIPO**

8.1. Equipo de licuefacción.

ENFRIADOR

Se enfría el gas que contiene cloro para tratar de prevenir una elevación en la temperatura en la torre de secado debido a la disolución de agua en ácido sulfúrico. El procedimiento de diseño es el presentado por Kern⁽¹³⁾ para equipos de transferencia de calor de tubos concéntricos.

- Condiciones de diseño.

Presión del gas :	1 Kg/cm ² man.
Temperatura de entrada del gas :	352.60° K
Temperatura de salida del gas :	339° K
Presión de agua :	1 Kg/cm ² man.
Temperatura de entrada de la agua :	293° K
Temperatura de salida de la agua :	313° K

Para el gas (cloro) :

$$G' = 33,074.92 \text{ Kg/Hr}$$

$$M_g = 71 \text{ Kg/Kgmol}$$

$$\dot{M}_g = 1.6 \times 10^{-5} \text{ Kg/m.seg} = 0.0576 \text{ Kg/m.Hr}$$

$$\rho_g = 16.174 \text{ Kg/m}^3$$

$$C_{pg} = 120 \text{ cal/Kg.}^\circ\text{K}$$

$$K_g = 2.25 \times 10^{-3} \text{ cal/m.seg.}^\circ\text{K}$$

$$\dot{M}_{wg} = 1.5 \times 10^{-5} \text{ Kg/m.seg} = 0.054 \text{ Kg/m.Hr}$$

Para agua :

$$M_1 = 18 \text{ Kg/Kgmol}$$

$$\dot{m}_1 = 8.50 \times 10^{-4} \text{ Kg/m.seg} = 3.06 \text{ Kg/m.Hr}$$

$$\rho_1 = 995.68 \text{ Kg/m}^3$$

$$Cp_1 = 1,000.00 \text{ cal/Kg.}^\circ\text{K}$$

$$K_1 = 0.1472 \text{ cal/m.seg.}^\circ\text{K}$$

$$\dot{m}_{w1} = 1.05 \times 10^{-3} \text{ Kg/m.seg} = 3.785 \text{ Kg/m.Hr}$$

Las propiedades del líquido se calcularon a una temperatura promedio de 303°K y las del gas se calcularon a 345.80°K (suponiendo una temperatura de pared de 320.50°K).

- Procedimiento de diseño.

Balance térmico :

$$Q = G' C_p \Delta T$$

$$Q = (33074.92) (120) (352.60 - 339)$$

$$Q = 53'978,269.00 \text{ cal/Hr}$$

$$Q = L' C_{p1} \Delta t$$

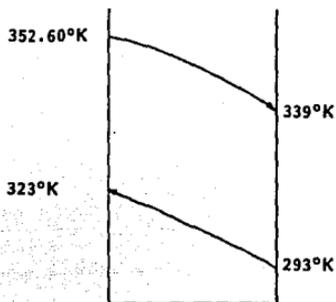
$$L' = \frac{Q}{C_{p1} \Delta t}$$

41.

$$L' = \frac{53978269.00}{(1000) (313 - 293)}$$

$$L' = 2,698.91 \text{ Kg/Hr}$$

Cálculo de la diferencia media logarítmica de temperatura (DMLT).



$$\Delta T_1 = 352.60 - 313$$

$$\Delta T_1 = 39.60^\circ \text{K}$$

$$\Delta T_2 = 339 - 293$$

$$\Delta T_2 = 46^\circ \text{K}$$

$$DMLT = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}$$

$$DMLT = \frac{39.60 - 46}{\ln \left(\frac{39.60}{46} \right)}$$

$$DMLT = 42.72 \text{ } ^\circ \text{K}$$

Suponiendo un coeficiente de transferencia de calor

$$U_s = 244,125.49 \text{ cal/Hr.m}^2 \cdot \text{ } ^\circ \text{K}$$

$$A = \frac{Q}{U_s DMLT}$$

$$A = \frac{(53978269)}{(244125.49) (42.72)}$$

$$A = 5.176 \text{ m}^2$$

Se tiene un arreglo triangular con tubos de 19.05 mm (3/4 in) de diámetro, con 25.4 mm (1 in) de paso, son tubos BWG 18.

$$a_1 = 0.06 \text{ m}^2/\text{m}$$

$$L_t = 2.44 \text{ m}$$

$$n_t = \frac{A}{a_1 L_t}$$

$$n_t = \frac{(5.176)}{(0.06) (2.44)}$$

$$n_t = 35.35$$

Cumple con un diámetro de coraza de 0.2032 m (8 in), 37 tubos y 1 paso.

$$\frac{L_t}{D_c} = \frac{2.44}{0.2032}$$

$$\frac{L_t}{D_c} = 12$$

Cálculo de coeficientes individuales

Para agua (coraza)

$$a_s = \frac{D_1 BC}{P_t n_p}$$

$$a_s = \frac{(0.2032) (0.1524) (0.0254 - 0.01905)}{(0.0254) (1)}$$

$$a_s = 0.00774 \text{ m}^2$$

$$L'_s = \frac{L'}{a_s}$$

$$L'_s = \frac{2698.91}{0.00774}$$

$$L'_s = 348,696.38 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{Hr}$$

$$Nre_1 = \frac{L_s De}{\mu_1}$$

$$D_{eq} = 0.0185 \text{ m}$$

$$N_{re_1} = \frac{(348696.38) (0.0185)}{(3.06)}$$

$$N_{re_1} = 2,108.13$$

$$J_h = 24$$

$$\frac{h_o}{\theta_a} = \frac{J_h K_f}{D_{eq}} \left(\frac{C_p l}{K_l} \right)^{0.33}$$

$$\frac{h_o}{\theta_a} = \frac{(24) (0.1472)}{(0.0185)} \left(\frac{(1000) (8.50 \times 10^{-4})}{(0.1472)} \right)^{0.33}$$

$$\frac{h_o}{\theta_a} = 342.60 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg. } ^\circ\text{K}$$

Para cloro (tubos)

$$a_t = \frac{n_t a_t^i}{n_p}$$

$$a_t' = 2.155 \times 10^{-4}$$

$$a_t = \frac{(37) (2.155 \times 10^{-4})}{(1)}$$

$$G_s' = \frac{G_s'}{a_t}$$

$$G_s' = \frac{33074.92}{0.008}$$

$$G_s' = 4134,365.00 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{Hr.}$$

$$Nre_g = \frac{G_s' D_t}{\mu}$$

$$Nre_g = \frac{(4134365) (0.01656)}{(0.0576)}$$

$$Nre_g = 1188,630.00$$

$$J_h = 1000.00$$

$$\frac{h_{io}}{\theta_s} = \frac{J K_g}{D_i} \left(\frac{C_{pg}}{K_g} \right)^{0.33} \frac{D_i}{D_e}$$

$$\frac{h_{io}}{\theta_s} = \frac{(1000) (2.25 \times 10^{-3})}{(0.0188)} \left(\frac{(120) (1.6 \times 10^{-5})}{(2.25 \times 10^{-3})} \right)^{0.33} \frac{0.0188}{0.02607}$$

$$\frac{h_{io}}{\theta_s} = 81.86 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg.} \cdot \text{°K}$$

$$U_o = \frac{h_o h_{io}}{h_o + h_{io}}$$

$$U_o = \frac{(342.60) (81.86)}{(342.60) + (81.86)}$$

$$U_o = 66.07 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg.} \cdot \text{°K} = 237,852.00 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{Hr.} \cdot \text{°K}$$

$$U_d = \frac{1}{\frac{1}{U_o} + R_d}$$

$$R_d = 4.186 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{seg} \cdot ^\circ\text{K}/\text{cal}$$

$$U_d = \frac{1}{\frac{1}{66.07} + 4.186 \times 10^{-4}}$$

$$U_d = 64.30 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg} \cdot ^\circ\text{K} = 231,480.00 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{Hr} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$A_r = a_l L_t n_t$$

$$A_r = (0.06) (2.44) (37)$$

$$A_r = 5.41 \text{ m}^2$$

$$U_r = \frac{Q}{A_r DMLT_b}$$

$$U_r = \frac{(53978269)}{(5.41) (42.72)}$$

$$U_r = 233,555.68 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{Hr} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$U_r = 233,555.68 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{Hr. } ^\circ\text{K}$$

$$\frac{U_o}{U_r} = \frac{237852.00}{233555.68}$$

$$\frac{U_o}{U_r} = 1.018$$

Temperatura de pared

$$T_w = \bar{T}_1 + \left(\frac{h_{i0} / \phi_s}{h_o / \phi_a + h_i / \phi_s} \right) (\bar{T}_2 - \bar{T}_1)$$

$$T_w = 303 + \left(\frac{81.86}{342.60 + 81.86} \right) (345.80 - 303)$$

$$T_w = 311.25^\circ\text{K}$$

$$h_o = \frac{h_{i0}}{\phi_a} \phi_a$$

$$h_o = (342.60) \left(\frac{8.50 \times 10^{-4}}{1.05 \times 10^{-3}} \right) 0.14$$

$$h_{10} = 332.61 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$h_{10} = \frac{h_{10}}{\phi_s} \phi_s$$

$$h_{10} = (81.86) \left(\frac{1.60 \times 10^{-5}}{1.58 \times 10^{-5}} \right) 0.14$$

$$h_{10} = 82.00 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg} \cdot ^\circ\text{K}$$

Cálculo de caída de presión

Para agua.

$$P_c = \frac{f L_s^2 D_s (N + 1)}{Deq S g r \phi_a 2.54 \times 10^{15}}$$

$$(N + 1) = \frac{L_s}{B}$$

$$(N + 1) = \frac{2.44}{0.1524}$$

$$(N = 1) = 16$$

$$D_1 = 0.2032 \text{ m}$$

$$\phi_a = \left(\frac{\rho_l}{\rho_w} \right)^{0.14} = \left(\frac{8.50 \times 10^{-4}}{1.05 \times 10^{-3}} \right)^{0.14}$$

$$\phi_a = 0.978$$

$$Sgr_l = \frac{\rho_l}{\rho_w}$$

$$Sgr_l = \frac{995.68}{1000}$$

$$Sgr_l = 0.995$$

$$L'_s = 348,696.38 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{Hr.}$$

$$Nre = 2,108.13$$

$$f_l = 0.4032$$

$$P_c = \frac{(0.4032) (348696.38)^2 (0.2032) (16)}{(0.0185) (0.995) (0.978) (2.54 \times 10^{15})}$$

$$P_c = 0.00348 \text{ Kg/cm}^2$$

Para cloro

$$P_t = \frac{f_g C_s^2 L_t n_p}{D_i S_{gr_g} \theta_s 2.54 \times 10^{15}}$$

$$L_t = 2.44 \text{ m}$$

$$n_p = 1$$

$$\theta_s = \left(\frac{f_g}{w_g} \right)^{0.14} = \left(\frac{1.60 \times 10^{-5}}{1.58 \times 10^{-5}} \right)^{0.14}$$

$$\theta_s = 1$$

$$S_{gr_g} = \frac{f_g}{w}$$

$$Sg_r = \frac{16.174}{1000}$$

$$Sg_g = 0.01617$$

$$G'_s = 3'211,157.28 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{Hr}$$

$$Nre = 1'048,086.06$$

$$f_g = 0.0144$$

$$P_t = \frac{(0.0144) (3211157.28)^2 (2.44) (1)}{(0.0188) (0.01617) (1) (2.54 \times 10^{15})}$$

$$P_t = 0.4692 \text{ Kg/cm}^2$$

Se tiene un equipo de tubos y coraza, manejando por los tubos el cloro y por la coraza el agua, los tubos son de 19.05 mm (3/4 in) de diámetro BWG 18, con 25.40 mm (1 in) de paso, siendo 37 tubos colocados en forma triangular y una longitud de 2.44 m. La coraza es de 0.2032 m de diámetro, la calda de presión por los tubos es de 0.4692 Kg/cm² y por la coraza es de 0.00348 Kg/cm².

TORRE DE SECADO

Se utiliza ácido sulfúrico al 95% en peso para el secado por ser uno de los métodos más usados industrialmente como se menciona en la sección 3.2. El método de diseño es el presentado por Treybal ⁽¹¹⁾ para torres empacadas.

Las condiciones de diseño fueron seleccionadas por razones de economía y facilidad de manejo de los componentes. La presión se seleccionó para evitar esfuerzos en la torre y la necesidad de equipos adicionales para mantener alguna otra presión. La temperatura se eligió para prevenir una posible evaporación de agua debido al calentamiento generado por la absorción del agua en ácido sulfúrico y también evitar pérdidas de cloro, debido a su solubilidad en agua.

- Condiciones de diseño.

Presión: 1 Kg/cm² man.

Temperatura: 339°K

Para el gas (cloro) :

$$M_g = 71 \text{ Kg/Kgmol}$$

$$\mu_g = 1.56 \times 10^{-5} \text{ Kg/m. seg}$$

$$D_g = 1.639 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{seg}$$

$$\rho_g = 2.623 \text{ Kg/m}^3$$

$$C_{pg} = 118.90 \text{ cal/Kg.}^\circ\text{K} = 497.83 \text{ N.m/Kg.}^\circ\text{K}$$

$$K_g = 2.25 \times 10^{-3} \text{ cal/m. seg.}^\circ\text{K} = 9.42 \times 10^{-3} \text{ W/m.}^\circ\text{K}$$

Para líquido (ácido sulfúrico al 95% en peso)

$$M_l = 59.27 \text{ Kg/Kgmol}$$

$$\mu_l = 6.75 \times 10^{-3} \text{ Kg/m. seg}$$

$$D_l = 1.19 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{seg}$$

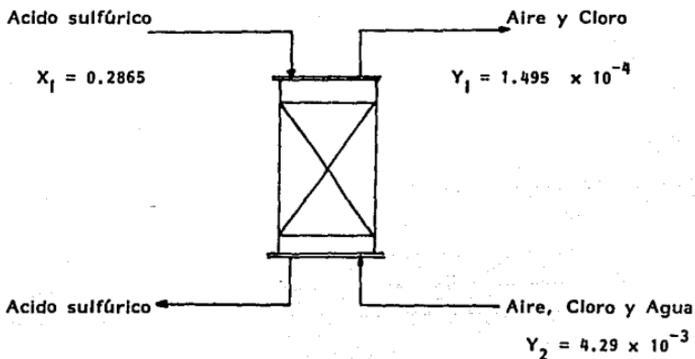
$$\rho_l = 1,730.00 \text{ Kg/m}^3$$

$$\sigma_l = 0.226 \text{ N/m}$$

$$C_{pl} = 435 \text{ cal/Kg.}^\circ\text{K} = 1,821.34 \text{ N.m/Kg.}^\circ\text{K}$$

$$K_l = 0.104 \text{ cal/m. seg.}^\circ\text{K} = 0.435 \text{ W/m.}^\circ\text{K}$$

- Procedimiento de diseño.



Se utilizan para empacar la torre anillos de Raschig con las siguientes características:

$$d = 50.66 \text{ mm}$$

$$C_f = 60$$

$$\beta = 0.74$$

$$d_s = 0.0725 \text{ m}$$

Cálculo del diámetro.

$$\frac{L_s^*}{G_s'} = \frac{Y_2^* - Y_1}{X_2^* - X_1}$$

$$\frac{L_s^*}{G_s'} = \frac{Y_2^* - Y_1}{X_2^* - X_1}$$

$$X_2^* = 1.505$$

$$L_s^* = \frac{4.29 \times 10^{-3} - 1.495 \times 10^{-4}}{1.505 - 0.2865}$$

$$\frac{L_s^*}{G_s'} = 3.4 \times 10^{-3}$$

$$G_s'$$

$$L_s^* = 3.4 \times 10^{-3} G_s'$$

$$G_s' = 468.11 \text{ Kgmol/Hr} = 33,039.13 \text{ Kg/Hr}$$

$$L_s^* = (3.4 \times 10^{-3}) (468.11)$$

$$L_s^* = 1.59 \text{ Kgmol/Hr} = 155.82 \text{ Kg/Hr}$$

$$L_s' = 1.5 L_s^*$$

$$L'_S = (1.5) (1.59)$$

$$L'_S = 2.385 \text{ Kgmol / Hr} = 233.73 \text{ Kg/Hr}$$

$$\frac{L'_S}{G'_S} = \frac{2.385}{468.11}$$

$$\frac{L'_S}{G'_S} = 5.095 \times 10^{-3}$$

$$\frac{L'_S}{G'_S} = 5.095 \times 10^{-3}$$

$$X_2 = \left(\frac{Y_2 - Y_1}{\frac{L'_S}{G'_S}} \right) + X_1$$

$$X_2 = \left(\frac{4.29 \times 10^{-3} - 1.495 \times 10^{-4}}{5.095 \times 10^{-3}} \right) + 0.2865$$

$$X_2 = 1.1$$

$$X_2 = 0.524$$

$$L' = L'_s + W_w + L'_{sw}$$

$$L' = 233.73 + 36.15 + 25.97$$

$$L' = 295.85 \text{ Kg/Hr} = 0.0822 \text{ Kg/seg}$$

$$G' = 33,075.28 \text{ Kg/Hr} = 9.187 \text{ Kg/seg}$$

$$\frac{L'}{G'} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right)^{0.5}$$

$$\frac{L'}{G'} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right)^{0.5} = \frac{0.0822}{9.187} \left(\frac{2.623}{1730 - 2.623} \right)^{0.5}$$

$$\frac{L'}{G'} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right)^{0.5} = 3.48 \times 10^{-4}$$

Utilizando un 66% de la calda de presión a la inundación se tiene:

$$\frac{G^2 C_f \mu_l^{0.1} \rho_l}{\rho_g (\rho_l - \rho_g)^{0.5}} = 0.2$$

$$G = \left(\frac{(0.2) \rho_g (\rho_L \rho_g) g_c}{C_f \mu_l^{0.1} J} \right)^{0.5}$$

$$G = \left(\frac{(0.2) (2.623) (1730 - 2.623) (1)}{(60) (6.75 \times 10^{-3})^{0.1} (1)} \right)^{0.5}$$

$$G = 4.99 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{seg}$$

$$\text{Area} = \frac{G'}{C}$$

$$\text{Area} = \frac{9.187}{4.99}$$

$$\text{Area} = 1.84 \text{ m}^2$$

Suponiendo una torre de forma cilíndrica

$$\text{Area} = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$D = \left(\frac{4 \text{ Area}}{\pi} \right)^{0.5}$$

61.

$$D = \left(\frac{(4) (1.84)}{\pi} \right)^{0.5}$$

$$D = 1.53 \text{ m}$$

$$L = \frac{L'}{\text{Area}}$$

$$L = \frac{0.0822}{1.84}$$

$$L = 0.0446 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{seg}$$

$$L_s = \frac{L'_s + L'_{sw}}{\text{Area}}$$

$$L_s = \frac{233.73 + 25.97}{1.84}$$

$$L_s = 141.14 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{Hr} = 0.0392 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{seg}$$

$$\bar{L} = \frac{L + L_s}{2}$$

$$\bar{L} = \frac{0.0446 + 0.0392}{2}$$

$$\bar{L} = 0.0419 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{seg}$$

$$\bar{L}_m = 7.069 \times 10^{-4} \text{ Kg/mol/m}^2 \cdot \text{seg}$$

$$G_s = \frac{G'_s}{\text{Area}}$$

$$G_s = \frac{33039.13}{1.84}$$

$$G_s = 17,956.05 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{Hr} = 4.987 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{seg}$$

$$\bar{G} = \frac{G + G_s}{2}$$

$$\bar{G} = \frac{4.99 + 4.987}{2}$$

$$\bar{G} = 4.988 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{seg.}$$

$$\bar{G}_m = 0.0702 \text{ Kgmol/m}^2 \cdot \text{seg.}$$

Cálculo de altura

$$\beta = 1.508 d_s^{0.376}$$

$$\beta = (1.508) (0.0725)^{0.376}$$

$$\beta = 0.5622$$

$$\psi_{lsw} = \frac{2.47 \times 10^{-4}}{d_s^{1.21}}$$

$$\psi_{lsw} = \frac{2.47 \times 10^{-4}}{(0.0725)^{1.21}}$$

$$\psi_{lsw} = 5.91 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$\psi_{ltw} = \frac{(2.09 \times 10^{-6}) (737.5 \text{ L})^\beta}{d_s^2}$$

$$\psi_{ltw} = \frac{(2.09 \times 10^{-6}) ((737.5) (0.0419))^{0.5622}}{(0.0725)^2}$$

$$\psi_{ltw} = 2.736 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$\psi_{low} = \psi_{ltw} - \psi_{lsw}$$

$$\psi_{low} = 2.736 \times 10^{-3} - 5.91 \times 10^{-3}$$

$$\psi_{low} = -3.174 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$\psi_{lo} = \psi_{low} H$$

$$H = \frac{(975.7) \bar{L}^{0.57} \bar{L}^{0.13}}{(1730)^{0.84} (2.024 \bar{L}^{0.43} - 1)} \left(\frac{\bar{L}}{0.073} \right)^{0.1737 - 0.262 \log \bar{L}}$$

$$H = \frac{(975.7) (0.0419)^{0.57} (6.75 \times 10^{-3})^{0.13}}{(1730)^{0.84} ((2.024) (0.0419)^{0.43} - 1)} \left(\frac{0.226}{0.073} \right)^{0.1737 - 0.262 \log (0.0419)}$$

$$H = -0.6034$$

$$\psi_{io} = (-3.174 \times 10^{-3}) \quad (-0.6034)$$

$$\psi_{io} = 1.915 \times 10^{-3} \quad \text{m}^3 / \text{m}^3$$

$$\psi_{is} = \frac{0.0486 \cdot 1^{0.02} \sigma_1^{0.99}}{d_s^{1.21} \rho^{0.37}}$$

$$\psi_{is} = \frac{(0.0486) (6.75 \times 10^{-3})^{0.02} (0.226)^{0.99}}{(0.0725)^{1.21} (1730)^{0.37}}$$

$$\psi_{is} = 0.0153 \quad \text{m}^3 / \text{m}^3$$

$$\psi_{it} = \psi_{io} + \psi_{is}$$

$$\psi_{it} = 1.915 \times 10^{-3} + 0.0153$$

$$\psi_{it} = 0.0172 \quad \text{m}^3 / \text{m}^3$$

$$a_{aw} = m \left(\frac{(808G)}{\rho^g} \right)^n \bar{L}^{\bar{P}}$$

$$a_{aw} = (31.52) \left(\frac{(1.808)(4.988)}{(2.623)^{0.5}} \right)^0 (0.0419)^{0.481}$$

$$a_{aw} = 6.853 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

$$a_v = 0.85 a_{aw} \frac{\psi_{lt}}{\psi_{lo}}$$

$$a_v = (0.85) (6.853) \left(\frac{0.0172}{1.915 \times 10^{-3}} \right)$$

$$a_v = 52.32 \text{ m}^2 / \text{m}^3$$

$$f_{lo} = f - \psi_{lt}$$

$$f_{lo} = 0.74 - 0.0172$$

$$f_{lo} = 0.7228$$

$$\frac{FgScg^{2/3}}{\bar{G}_m} = 1.195 \left(\frac{d_p \bar{G}}{g(1 - f_{lo})} \right)^{-0.36}$$

$$F_g = \frac{1.195 \bar{G}_m}{S_c^2/3} \left(\frac{d_g \bar{G}}{\mu_g (1 - f_{lo})} \right)^{-0.36}$$

$$S_{cg} = \frac{\mu_g}{f_g D_g}$$

$$S_{cg} = \frac{1.56 \times 10^{-5}}{(2.623) (1.639 \times 10^{-5})}$$

$$S_{cg} = 0.363$$

$$F_g = \frac{(1.195) (0.0702)}{(0.363)^{2/3}} \left(\frac{(0.0725) (4.988)}{(1.56 \times 10^{-6}) (1 - 0.7228)} \right)^{-0.36}$$

$$F_g = 1.216 \times 10^{-3} \text{ Kg/mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{seg.}$$

$$F_g^{a_v} = (1.216 \times 10^{-3}) (52.32)$$

$$F_g^{a_v} = 0.0636 \text{ Kg/mol} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{seg.}$$

$$\frac{K_1 d_g}{D_1} = 25.1 \left(\frac{d_g L}{\mu_1} \right)^{0.45} S_{c1}^{0.5}$$

$$K_1 = \frac{25.1 D_1}{d_s} \left(\frac{d_s L}{\mu_1} \right)^{0.45} Sc_1^{0.5}$$

$$Sc_1 = \frac{\mu_1}{\rho_1 D_1}$$

$$Sc_1 = \frac{(6.75 \times 10^{-3})}{(1730) (1.19 \times 10^{-9})}$$

$$Sc_1 = 3,278.768$$

$$K_1 = \frac{(25.1) (1.19 \times 10^{-9})}{(0.0725)} \left(\frac{(0.0725) (0.0419)}{(6.75 \times 10^{-3})} \right)^{0.45} (3278.768)^{0.5}$$

$$K_1 = 1.647 \times 10^{-5} \text{ Kgmol/m}^2 \cdot \text{seg. (Kgmol /m}^3)$$

$$F_1 = K_1 C$$

$$C = 29.19 \text{ Kgmol /m}^3$$

$$F_1 = (1.647 \times 10^{-5}) (29.19)$$

$$F_I = 4.807 \times 10^{-4} \text{ Kgmol/m}^2 \cdot \text{seg.}$$

$$F_{Ia_v} = (4.807 \times 10^{-4}) \quad (52.32)$$

$$F_{Ia_v} = 0.02515 \text{ Kgmol/m}^3 \cdot \text{seg.}$$

$$N_{tg} = \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y - y_1} + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 - y_2}{1 - y_1} \right)$$

La relación para obtener la composición en el equilibrio es:

$$\left(\frac{1 - y_1}{1 - y} \right) = \left(\frac{1 - x}{1 - x_1} \right)^{F_{Ia_v}/F_{g a_v}}$$

$$y_1 = 1 - \left(\frac{1 - x}{1 - x_1} \right)^{F_{Ia_v}/F_{g a_v}} (1 - y)$$

Utilizando la regla de Simpson de Integración se tiene:

$$\int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dy}{y - y_1} = 4.53$$

$$N_{tg} = 4.53 + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 - 4.27 \times 10^{-3}}{1 - 1.494 \times 10^{-4}} \right)$$

$$N_{tg} = 4.528$$

$$H_{tg} = \frac{G}{F g^a v}$$

$$H_{tg} = \frac{0.0702}{0.0636}$$

$$H_{tg} = 1.104 \text{ m}$$

$$Z = H_{tg} N_{tg}$$

$$Z = (1.104) (4.528)$$

$$Z = 5 \text{ m}$$

Tomando un sobrediseño de 10%

$$Z_r = 1.1 Z$$

$$Z_r = (1.1) (5)$$

$$Z_r = 5.5 \text{ m}$$

$$V = \text{Area } Z_r$$

$$V = (1.84) (5.5)$$

$$V = 10.12 \text{ m}^3$$

Balance térmico.

Por analogía con la transferencia de masa se hace.

$$J_d = J_h$$

$$J_h = 1.195 \left(\frac{d_g \bar{G}}{\mu_g (1 - \phi_{lo})} \right)^{-0.36}$$

$$J_h = \frac{h_g Pr_g^{2/3}}{C_{p_g} G}$$

$$h_g = \frac{1.195 C_p \bar{G}}{Pr_g^{2/3}} \left(\frac{d_s \bar{G}}{\mu_g (1 - f_{lo})} \right)^{-0.36}$$

$$Pr_g = \frac{C_p \mu_g}{k_g}$$

$$Pr_g = \frac{(118.90) (1.56 \times 10^{-5})}{(2.25 \times 10^{-3})}$$

$$Pr_g = 0.8244$$

$$h_g = \frac{(1.195) (4.97.83) (4.988)}{(0.8244)^{2/3}} \left(\frac{(0.0725) (4.988)}{(1.56 \times 10^{-5}) (1 - 0.7228)} \right)^{-0.36}$$

$$h_g = 57.05 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}$$

$$h_{g,v} = (57.05) (52.32)$$

$$h_{g,v} = 2,984.85 \text{ W/m}^3 \cdot \text{°K}$$

$$\frac{h_i d_s}{k_i} = 25.1 \left(\frac{d_s L}{\mu_i} \right)^{0.45} Pr_i^{0.5}$$

$$h_1 = \frac{25.1 K_1}{d_s} \left(\frac{d_s \Gamma}{l} \right)^{0.45} Pr_1^{0.5}$$

$$Pr_1 = \frac{Cp l \mu}{K_1}$$

$$Pr_1 = \frac{(435) (6.75 \times 10^{-3})}{(0.104)}$$

$$Pr_1 = 28.23$$

$$h_1 = \frac{(25.1) (0.435)}{(0.0725)} \left(\frac{(0.0725) (0.0419)}{(6.75 \times 10^{-3})} \right)^{0.45} (28.23)^{0.5}$$

$$h_1 = 558.653 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}$$

$$h_1 a_v = (558.653) (52.32)$$

$$h_1 a_v = 29,228.75 \text{ W/m}^3 \cdot \text{°K}$$

$$\frac{1}{U a_v} = \frac{1}{h_g a_v} + \frac{1}{h_1 a_v}$$

$$\frac{1}{Ua_v} = \frac{1}{2984.85} + \frac{1}{29228.725}$$

$$\frac{1}{Ua_v} = 3.69 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{°K/W}$$

$$Ua_v = 2,708.28 \text{ W/m}^3 \cdot \text{°K} = 2'328,590.60 \text{ cal/Hr. m}^3 \cdot \text{°K}$$

$$Q_d = Ua_v V DMLT$$

$$Q_d = 9'972,497.60 \text{ cal/Hr}$$

$$DMLT = \frac{Q_d}{Ua_v V}$$

$$DMLT = \frac{(9972497.60)}{(2328590.60) (10.12)}$$

$$DMLT = 0.4232 \text{ °K}$$

$$DMLT = \frac{(t_2 - T_1) - (t_1 - T_2)}{\ln \left(\frac{t_2 - T_1}{t_1 - T_2} \right)}$$

$$DMLT = \frac{t_2 - 339}{\ln\left(\frac{t_2 - 339}{339 - T_2}\right)}$$

$$DMLT = \frac{t_2 + T_2 - 678}{\ln\left(\frac{t_2 - 339}{339 - T_2}\right)}$$

$$Q_d = L'c_{p1} \Delta T_1 + G'c_{pg} \Delta t_g$$

$$Q_d = L'c_{p1} (T_2 - 339) + G'c_{pg} (t_2 - 339)$$

$$Q_d = L'c_{p1} T_2 + G'c_{pg} t_2 - (L'c_{p1} + G'c_{pg}) (339)$$

$$T_2 = \frac{Q_d - G'c_{pg} t_2 + (L'c_{p1} + G'c_{pg}) (339)}{L'c_{p1}}$$

$$T_2 = \frac{9972497.60 - (33075.28) (118.90)t_2 + ((295.85) (435) + (33075.28) (118.90)) (339)}{(295.85) (435)}$$

$$T_2 = 10775.643 - 30.558t_2$$

$$DMLT = \frac{t_2 + (10775.643 - 30.558 t_2) - 678}{\ln \left(\frac{t_2 - 339}{339 - (10775.643 - 30.558 t_2)} \right)}$$

$$DMLT = \frac{10097.643 - 29.558 t_2}{\ln \left(\frac{t_2 - 339}{30.558 t_2 - 10436.643} \right)}$$

Suponiendo $t_2 = 341.53575^\circ\text{K}$

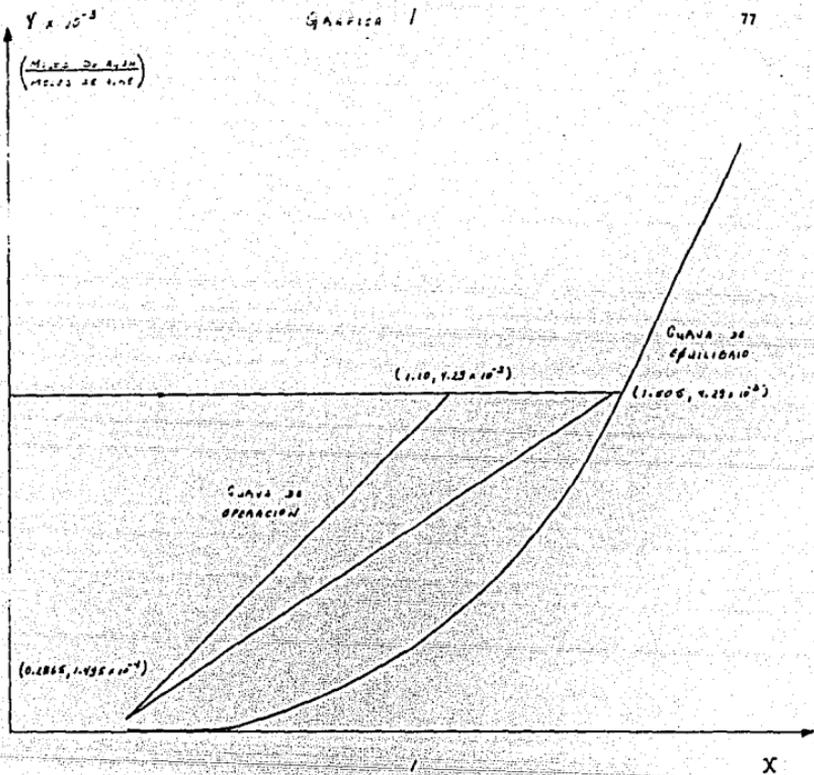
$$DMLT = 0.4233^\circ\text{K}$$

$$T_2 = 10775.643 - 30.558 (341.53575)$$

$$T_2 = 338.99^\circ\text{K}$$

Resumen:

Se tiene una torre empacada con anillos de Raschig, de cerámica, de 50 mm (2 in). La torre es de 1.53 m de diámetro y una altura de 5.5 m, los fluidos son introducidos a contracorriente y la caída de presión del gas en el empaque es de 0.09177 Kg/cm^2 .

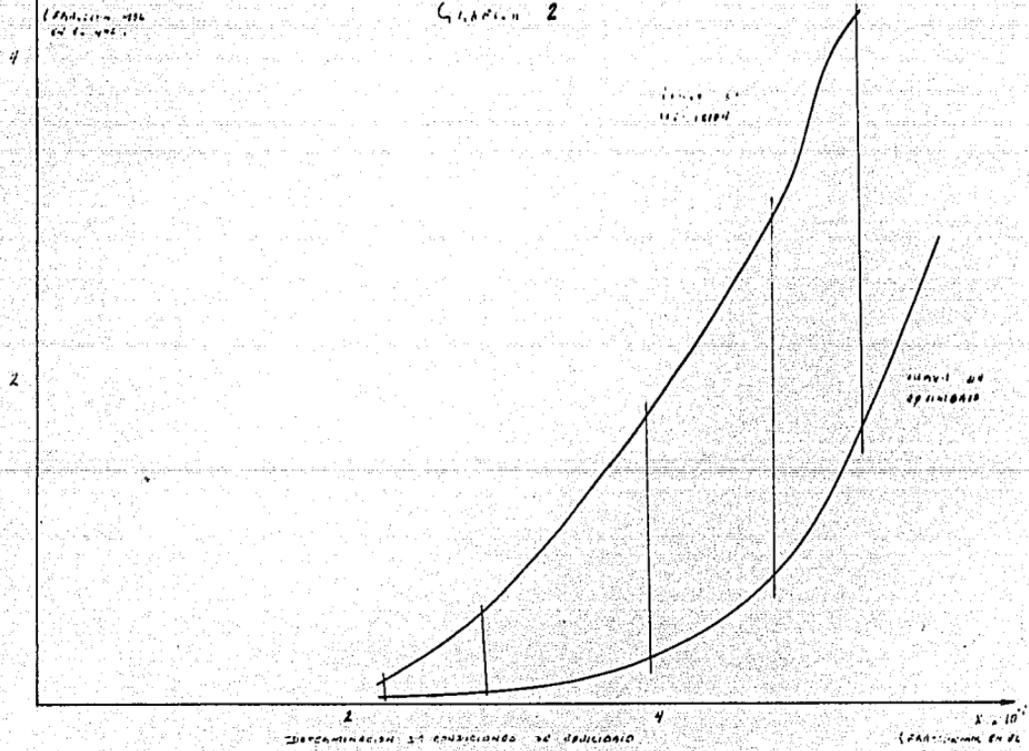


DETERMINACION DE CURVA DE OPERACION

(MOLAS DE AGUA / MOLAS DE ACIDO)

$y = 10^3$
(PUNTO DE EQUILIBRIO)
EN EL EJEN Y

GRÁFICA 2



DIFERENCIACIÓN DE CONDICIONES DE EQUILIBRIO

(PUNTO DE EQUILIBRIO EN EL EJEN X)

COMPRESOR

- Condiciones de Diseño

Presión de entrada: $1 \text{ Kg/cm}^2 \text{ man.}$

Presión de salida: $7 \text{ Kg/cm}^2 \text{ man.}$

Temperatura de entrada: $341.5356 \text{ }^\circ\text{K}$

$$G^i = 33,039.13 \text{ Kg/Hr}$$

$$Cp_g = 118.90 \text{ cal/Kg.}^\circ\text{K}$$

$$G^i_a = 135.68 \text{ Kg/Hr}$$

$$G^i_{cl} = 32,903.45 \text{ Kg/Hr}$$

Para presión de 7 Kg/cm^2

$$H_a = 161,015.50 \text{ cal/Kg} \quad \text{vapor sobrecalentado}$$

$$H_{cl} = 160,328.70 \text{ cal/Kg} \quad \text{vapor sobrecalentado}$$

Para presión de 1 Kg/cm²

$$H_a = 85,632.75 \text{ cal/kg} \quad \text{vapor sobrecalentado}$$

$$H_{cl} = 139,068.90 \text{ cal/Kg} \quad \text{vapor sobrecalentado}$$

- Procedimiento de Diseño.

$$\Delta H_m = \sum y_i \sum \Delta H_i$$

$$\Delta H_m = y_a \Delta H_a + y_{cl} \Delta H_{cl}$$

$$H_m = (0.99) (16\ 0328.70 - 139068.90) (71) + (0.01) (161015.50 - 85632.75) (29)$$

$$\Delta H_m = 1'516,212.30 \text{ cal/Kg mol} = 21,482.18 \text{ cal/Kg}$$

$$Q = \Delta H_m G'$$

$$Q = G' C_p \Delta T$$

$$\Delta H_m G' = G' C_p \Delta T$$

81.

$$\Delta H_m = C_{p_g} \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{\Delta H_m}{C_{p_g}}$$

$$T_2 = \frac{\Delta H_m}{C_{p_g}} + T_1$$

$$T_2 = \frac{21482.18}{118.90} + 341.5356$$

$$T_2 = 522.21 \text{ } ^\circ\text{K}$$

Cálculo de potencia.

$$P = \Delta H_m C'$$

$$P = (21482.18) (33039.13)$$

$$P = 7.097 \times 10^8 \text{ cal/Hr} = 615.51 \text{ H}_p$$

Teniendo una eficiencia del 70% motor-compresor

$$Pr = \frac{P}{0.70}$$

$$Pr = \frac{615.51}{0.70}$$

$$Pr = 879.30 \text{ Hp}$$

Por tanto es seleccionado un motor de 900 Hp de capacidad, de velocidad constante, horizontal, embalado, 60 ciclos, trifásico, corriente - 2300/4000 volts.

Se selecciona basándose en Hallock⁽⁴⁾ un compresor centrífugo de 5 - etapas, de 1.98 m de diámetro, 1.83 m de longitud y 5000 rpm.

CONDENSADOR

Siendo el condensador el equipo más importante del sistema se tomaron algunas consideraciones especiales, como un sobrediseño o factor de seguridad y el uso de una longitud mayor a la comercial mas usual.

El sistema de condensación consistirá en un cambiador de calor de tubos y coraza, manejando el cloro por la coraza debido a la gran carga de condensación y salmuera por los tubos. En el sistema se condensan 32,552.00 Kg/Hr, quedando 487.13 Kg/Hr como gas debido al equilibrio que se establece a 273°K, el gas no se consideró en el subenfriamiento por considerar su contribución al calor total como mínima. El procedimiento de diseño es el establecido por Kern para condensadores.

- Condiciones de diseño

Presión del gas: 7 Kg/cm² man.

Temperatura de entrada del gas: 522.21°K

Temperatura de salida del líquido: 273°K

Presión de salmuera: 1 Kg/cm² man.

Temperatura de entrada de la salmuera: 233°K

Temperatura de salida de la salmuera: 293°K

Para el gas (cloro y aire)

$$C'_g = 33,039.13 \text{ Kg/Hr}$$

$$M_g = 71 \text{ Kg/Kmol}$$

$$\mu'_g = 2.06 \times 10^{-5} \text{ Kg/m.Hr}$$

$$\rho_g = 14.156 \text{ Kg/m}^3$$

$$C_{p_g} = 133.82 \text{ cal/Kg.}^\circ\text{K} = 559.81 \text{ N.m/Kg.}^\circ\text{K}$$

$$K_g = 4.51 \times 10^{-3} \text{ cal/m. seg.}^\circ\text{K}$$

$$\lambda_c = 60,360.82 \text{ cal/Kg}$$

Para el condensado (cloro);

$$C'_c = 32,552. \text{Kg/Hr}$$

$$M_c = 71 \text{ Kg/Kgmol}$$

$$\mu'_c = 3.49 \times 10^{-4} \text{ Kg/m.seg} = 1.26 \text{ Kg/m. Hr}$$

$$\rho_c = 1,400.00 \text{ Kg/m}^3$$

$$Cp_c = 730.41 \text{ cal/Kg. } ^\circ\text{K}$$

$$K_c = 0.0261 \text{ cal/m. seg. } ^\circ\text{K}$$

$$\mu_{cw} = 3.53 \times 10^{-4} \text{ Kg/m. seg} = 1.272 \text{ Kg/m. Hr}$$

Para el líquido subenfriado (Cloro):

$$L'_1 = 32,552 \text{ Kg/Hr}$$

$$M_1 = 71 \text{ Kg/Kgmol}$$

$$\mu'_1 = 3.66 \times 10^{-4} \text{ Kg/m. seg} = 1.317 \text{ Kg/m. Hr}$$

$$\rho_1 = 1,403.60 \text{ Kg/m}^3$$

$$Cp_1 = 629.38 \text{ cal/Kg. } ^\circ\text{K}$$

$$K_1 = 0.027 \text{ cal/m. seg. } ^\circ\text{K}$$

Para salmuera:

$$\mu'_s = 4.05 \times 10^{-3} \text{ Kg/m. seg} = 14.60 \text{ Kg/m. Hr}$$

$$\rho_s = 1,190.00 \text{ Kg/m}^3$$

$$Cp_s = 800 \text{ cal/Kg. } ^\circ\text{K}$$

$$K_s = 0.1364 \text{ cal/m. seg. } ^\circ\text{K}$$

$$\mu_{ws} = 2.4 \times 10^{-3} \text{ Kg/m. seg.} = 8.64 \text{ Kg/m. Hr}$$

Las propiedades del gas se calcularon a una temperatura promedio de -408.21°K , las del líquido subenfriado a 283.55°K , las del condensado a -288.55°K y las de la salmuera a 263°K (suponiendo una temperatura de pared de 283°K).

- Procedimiento de diseño.

Balance térmico:

$$Q = G' Cp_g \Delta T + C' \lambda_c + L'_i Cp_l \Delta t$$

$$Q = (33039.13) (133.82) (522.21 - 294.11) + (32552) (60360.82) + (32552) (629.38) (294.11 - 273)$$

$$Q = 3.406 \times 10^9 \text{ cal/Hr}$$

$$Q = L'_s Cp_s \Delta T_s$$

$$L'_s = \frac{Q}{Cp_s \Delta T_s}$$

$$L'_s = \frac{3.406 \times 10^9}{(800) (293 - 233)}$$

$$L'_s = 70,958.33 \text{ Kg/Hr}$$

$$q_1 = G' C_p \Delta T$$

$$q_1 = (33039.13) (133.82) (522.21 - 294.11)$$

$$q_1 = 1.001 \times 10^9 \text{ cal/Hr} = 278,055.56 \text{ cal/seg}$$

$$q_2 = C' \lambda_c$$

$$q_2 = (32552) (60360.82)$$

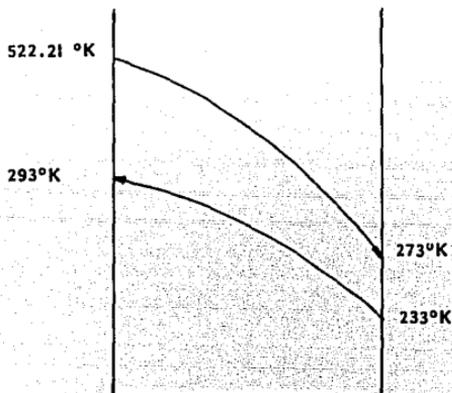
$$q_2 = 1.965 \times 10^9 \text{ cal/Hr} = 545,833.33 \text{ cal/seg}$$

$$q_3 = L'_p C_{pl} \Delta t$$

$$q_3 = (32552) (629.38) (249.11 - 273)$$

$$q_3 = 4.325 \times 10^8 \text{ cal/Hr} = 120,138.89 \text{ cal/seg}$$

Cálculo de la diferencia media logarítmica de temperatura (DMLT).



DMLT₁

$$\Delta T_1 = 522.21 - 293$$

$$\Delta T_1 = 229.21^\circ\text{K}$$

$$q_1 = L'_s C_{p_s} \Delta T_s$$

$$T_{s2} = T_{s1} - \frac{qI}{L'_s CP_s}$$

$$T_{s2} = 293 - \frac{1.001 \times 10^9}{(70958.33) (800)}$$

$$T_{s2} = 275.36^\circ\text{K}$$

$$\Delta T_2 = 18.75^\circ\text{K}$$

$$\text{DMLT}_1 = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}$$

$$\text{DMLT}_1 = \frac{229.21 - 18.75}{\ln \left(\frac{229.21}{18.75} \right)}$$

$$\text{DMLT}_1 = 84.07^\circ\text{K}$$

DMLT_2

$$\Delta T_1 = 294.11 - 275.36$$

$$\Delta T_1 = 18.75^\circ\text{K}$$

$$T_3 = T_2 - \frac{q2}{L_s C_p s}$$

$$T_3 = 275.36 - \frac{1.965 \times 10^9}{(70958.33) (800)}$$

$$T_3 = 240.745^\circ\text{K}$$

$$\Delta T_2 = 294.11 - 240.745$$

$$\Delta T_2 = 53.365^\circ\text{K}$$

$$\text{DMLT}_2 = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}$$

$$\text{DMLT}_2 = \frac{18.75 - 53.365}{\ln \left(\frac{18.75}{53.365} \right)}$$

$$\text{DMLT}_2 = 33.10^\circ\text{K}$$

DMLT_3

$$\Delta T_1 = 294.11 - 240.745$$

$$\Delta T_1 = 53.365^\circ\text{K}$$

$$\Delta T_2 = 273 - 233$$

$$\Delta T_2 = 40^\circ\text{K}$$

$$\text{DMLT}_3 = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}$$

$$\text{DMLT}_3 = \frac{53.365 - 40}{\ln \left(\frac{53.365}{40} \right)}$$

$$DMLT_3 = 46.36^\circ\text{K}$$

$$Q = DMLT_b \sum \frac{q_i}{DMLT_i}$$

$$DMLT_b = \frac{Q}{\sum \frac{q_i}{DMLT_i}}$$

$$DMLT_b = \frac{3.406 \times 10^9}{\frac{1.001 \times 10^9}{84.07} + \frac{1.965 \times 10^9}{33.10} + \frac{4.325 \times 10^8}{46.36}}$$

$$DMLT_b = 42.26^\circ\text{K}$$

Suponiendo un coeficiente de transferencia de calor.

$$U_s = 92,767.68 \text{ cal/Hr.m}^2\text{.}^\circ\text{K}$$

$$A = \frac{Q}{U_s DMLT_b}$$

$$A = \frac{(3.406 \times 10^9)}{(92,767.68) (42.26)}$$

$$A = 868.80 \text{ m}^2$$

Se tiene un arreglo triangular con tubos de 19.05 mm (3/4 in) de diámetro, con 25.4 mm (1 in) de paso, BMC 18.

$$a_j = 0.06 \text{ m}^2/\text{m}$$

$$L_t = 12.20 \text{ m}$$

$$n_t = \frac{A}{a_j L_t}$$

$$n_t = \frac{(868.80)}{(0.06) (12.20)}$$

$$n_t = 1,186.88$$

Cumple con un diámetro de coraza de 39 in, 1206 tubos y 1 paso.

$$\frac{L_t}{D_c} = \frac{12.20}{0.9906}$$

$$\frac{L_t}{D_c} = 12.31$$

$$B = 0.3048 \text{ m}$$

Cálculo de coeficientes individuales

Para salmuera

$$a_t = \frac{n_t a'_t}{n_p}$$

$$a'_t = 2.155 \times 10^{-4}$$

$$a_t = \frac{(1206) (2.155 \times 10^{-4})}{(1)}$$

$$a_t = 0.26$$

$$L'_{s2} = \frac{L'_s}{a_t}$$

$$L'_{s2} = \frac{70958.33}{0.26}$$

$$L'_{s2} = 272,916.65$$

$$Nre_s = \frac{L'_{s2} D_i}{\mu_s}$$

$$Nre_s = \frac{(272916.65) (0.01656)}{(14.60)}$$

$$Nre_s = 309.55$$

$$J_h = 2$$

$$h_{io} = \frac{J_h K_s}{D_i} \left(\frac{C_p K_s}{K_s} \right)^{0.33} \left(\frac{\mu_s}{\mu_{ws}} \right)^{0.14} \frac{D_i}{D_e}$$

$$h_{10} = \frac{(1.85) (0.1364)}{(0.021)} \left(\frac{(4.05 \times 10^{-3}) (800)}{(0.1364)} \right)^{0.33} \left(\frac{4.05 \times 10^{-3}}{2.40 \times 10^{-3}} \right)^{0.14}$$

$$\frac{0.021}{0.0267}$$

$$h_{10} = 31.43 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg} \cdot ^\circ\text{K}$$

Para cloro

Sección de desobrecalentamiento

$$a_s = \frac{D_{BC}}{P_t n_p}$$

$$a_s = \frac{(0.9906) (0.3048) (0.0254 - 0.01905)}{(0.0254) (1)}$$

$$a_s = 0.0755 \text{ m}^2$$

$$G'_s = \frac{G'}{a_s}$$

$$G'_s = \frac{33039.13}{0.0755}$$

$$G'_s = 437,604.37 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{Hr}$$

$$Nre_g = \frac{G'_s D_{eq}}{\mu_g}$$

$$D_{eq} = 0.0185 \text{ m}$$

$$Nre_g = \frac{(0.0185) (437604.37)}{(0.0741)}$$

$$Nre_g = 109,253.45$$

$$J_{f1} = 205$$

$$h_{ol} = \frac{J_{f1} K_g}{D_{eq}} \left(\frac{\mu_g C_{p_g}}{K_g} \right)^{0.33}$$

$$h_{ol} = \frac{(205) (4.51 \times 10^{-3})}{(0.0185)} \left(\frac{(2.06 \times 10^{-5}) (133.82)}{(4.51 \times 10^{-3})} \right)^{0.33}$$

$$h_{ol} = 42.41 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$U_1 = \frac{h_{io} h_{oi}}{h_{io} + h_{oi}}$$

$$U_1 = \frac{(31.43) (42.41)}{(31.43) + (42.41)}$$

$$U_1 = 18.052 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$A_1 = \frac{q_1}{U_1 D M L T_1}$$

$$A_1 = \frac{278055.56}{(18.052) (84.07)}$$

$$A_1 = 183.22$$

Sección de condensación.

$$G'' = \frac{G'_{2/3}}{L_t n_t}$$

$$G'' = \frac{(32552)}{(8.84) (1206) \frac{2}{3}}$$

$$G'' = 32.50 \text{ Kg/m. Kg}$$

$$h_{O_2} = 23.14 \left(\frac{K^3 g^2}{4G'' c} \right)^{0.33} \left(\frac{M}{M_{WC}} \right)^{0.14}$$

$$h_{O_2} = (23.14) \left(\frac{(0.0261)^3 (1400)^2 (9.8)}{(4) (32.50) (3.49 \times 10^{-4})} \right)^{0.33} \left(\frac{3.49 \times 10^{-4}}{3.53 \times 10^{-4}} \right)^{0.14}$$

$$h_{O_2} = 452.77 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg.}^\circ\text{K}$$

$$U_2 = \frac{h_{iO} h_{O_2}}{h_{iO} + h_{O_2}}$$

$$U_2 = \frac{(31.43) (452.77)}{(31.43) + (452.77)}$$

$$U_2 = 29.40 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg.}^\circ\text{K}$$

$$A_2 = \frac{q_2}{U_2 D M L T_2}$$

$$A_2 = \frac{(545833.33)}{(29.40) (33.10)}$$

$$A_2 = 561.00 \text{ m}^2$$

Sección de subenfriamiento.

$$L'_{sl} = \frac{L'_l}{a_s}$$

$$L'_{sl} = \frac{32552}{0.0755}$$

$$L'_{sl} = 431,152.32 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{Hr.}$$

$$Nre_l = \frac{L'_{sl} D_{eq}}{\mu_l}$$

$$Nre_l = \frac{(0.0185) (431152.32)}{(1.317)}$$

$$\text{Nre}_1 = 6,056.43$$

$$J_h = 42$$

$$h_{o3} = \frac{J_h K_f}{D_{eq}} \left(\frac{U'_{CP} U}{K_L} \right)^{0.33}$$

$$h_{o3} = \frac{(42.) (0.027)}{(0.0185)} \left(\frac{(3.66 \times 10^{-4}) (629.38)}{(0.027)} \right)^{0.33}$$

$$h_{o3} = 125.25 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg.}^\circ\text{K}$$

$$U_3 = \frac{h_{io} h_{o3}}{h_{io} + h_{o3}}$$

$$U_3 = \frac{(31.43) (125.25)}{(31.43) + (125.25)}$$

$$U_3 = 25.125 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg.}^\circ\text{K}$$

$$A_3 = \frac{q_3}{U_3 \text{DMLT}_3}$$

$$A_3 = \frac{(120138.89)}{(25.125) (46.36)}$$

$$A_3 = 103.14 \text{ m}^2$$

$$A = A_1 + A_2 + A_3$$

$$A = 183.22 + 561 + 103.14$$

$$A = 847.36 \text{ m}^2$$

$$U_c = \frac{Q}{ADMLT_b}$$

$$U_c = \frac{(3.406 \times 10^9)}{(847.36) (42.26)}$$

$$U_c = 95,114.60 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{Hr} \cdot \text{°K} = 26.42 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg} \cdot \text{°K}$$

$$\frac{1}{U_d} = \frac{1}{U_c} + R_d$$

$$R_d = 2.05 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{Hr. } ^\circ\text{K/cal}$$

$$\frac{I}{U_d} \approx \frac{I}{95114.60} + 2.05 \times 10^{-7}$$

$$\frac{I}{U_d} = 1.07 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{Hr. } ^\circ\text{K/cal.}$$

$$U_d = 93,295.50 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{Hr. } ^\circ\text{K}$$

$$A_r = a_j L_t n_t$$

$$A_r = (0.06) (12.20) (1206)$$

$$A_r = 877.00 \text{ m}^2$$

$$U_r = \frac{(3.406 \times 10^9)}{(877) (42.26)}$$

$$U_r = 91,899.67 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{Hr. } ^\circ\text{K}$$

$$\frac{U_c}{U_r} = \frac{95114.60}{91899.67}$$

$$\frac{U_c}{U_r} = 1.035$$

Temperatura de pared.

$$\frac{l}{h_o} = \frac{l}{U_c} - \frac{l}{h_{io}}$$

$$\frac{l}{h_o} = \frac{l}{26.42} - \frac{l}{29.01}$$

$$\frac{l}{h_o} = 0.00338$$

$$h_o = 295.85 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$T_w = \bar{T}_s + \left(\frac{h_{io}}{h_{io} + h_o} \right) \bar{T} - \bar{T}_s$$

$$T_w = 263 + \frac{295.85}{(29.01) + (295.85)} (294.11 - 263)$$

$$T_w = 291.33^\circ\text{K}$$

Cálculo de caída de presión

Para salmuera.

$$a_t = 0.52 \text{ m}^2$$

$$L'_{s2} = 170,819.28 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{Hr.}$$

$$\text{Nre}_s = 245.84$$

$$f_t = 0.2952$$

$$\phi_t = \left(\frac{\mu_s}{\mu_w} \right)^{0.14} = \left(\frac{4.05 \times 10^{-3}}{2.40 \times 10^{-3}} \right)^{0.14}$$

$$\phi_t = 1.076$$

$$\text{Sgr}_s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$$

$$Sgr_s = \frac{1190}{1000}$$

$$Sgr_s = 1.19$$

$$\Delta P_t = \frac{f_t L_{g2}^2 L_{tp}}{D_i Sgr_s \phi_t 2.54 \times 10^{15}}$$

$$\Delta P_t = \frac{(0.2952) (170819.28)^2 (12.20) (1)}{(0.021) (1.19) (1.076) (2.54 \times 10^{15})}$$

$$\Delta P_t = 1.54 \times 10^{-3} \text{ Kg/cm}^2$$

Para cloro

Sección de desobrecalentamiento

$$L_g = \frac{L_t A_t}{A}$$

$$L_g = (12.20) \frac{183.22}{847.36}$$

$$L_g = 2.638 \text{ m}$$

$$(N + 1)_l = \frac{L_g}{B}$$

$$(N + 1)_l = \frac{2.638}{0.3048}$$

$$(N + 1)_l = 8.65$$

$$D_l = 0.9906 \text{ m}$$

$$\theta_g = \left(\frac{\mu_g}{\mu_w} \right)^{0.14} = \left(\frac{2.06 \times 10^{-5}}{1.30 \times 10^{-5}} \right)^{0.14}$$

$$\theta_g = 1.066$$

$$Sgr_g = \frac{\rho_g}{\rho_w}$$

$$Sgr_g = \frac{14.156}{1000}$$

$$S_{gr_g} = 0.01415$$

$$G'_s = 437,604.37 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{Hr.}$$

$$N_{re_g} = 109,253.45$$

$$f_g = 0.193$$

$$P_{cl} = \frac{f_g G'_s{}^2 D_i (N + 1)}{D_{eq} S_{gr_g} \# 2.54 \times 10^{15}}$$

$$P_{cl} = \frac{(0.193) (437604.37)^2 (0.9906) (8.65)}{(0.0185) (0.01415) (1.066) (2.54 \times 10^{15})}$$

$$P_{cl} = 0.4467 \text{ Kg/cm}^2$$

Sección de condensación.

$$L_c = L_t \frac{A_2}{A}$$

$$L_c = (12.20) \frac{561.00}{847.36}$$

$$L_c = 8.077$$

$$(N + 1)_2 = \frac{L_c}{B}$$

$$(N + 1)_2 = \frac{8.077}{0.3048}$$

$$(N + 1)_2 = 26.50$$

$$D_1 = 0.9906 \text{ m}$$

$$\phi_c = \left(\frac{c}{w_c} \right)^{0.14} = \left(\frac{3.49 \times 10^{-4}}{3.53 \times 10^{-4}} \right)^{0.14}$$

$$\phi_c = 0.9984$$

$$Sgr_c = \frac{\phi_c}{\rho_w}$$

$$Sgr_c = \frac{1400}{1000}$$

$$Sgr_c = 1.4$$

$$C'_s = \frac{C'_s}{s_s}$$

$$C'_s = \frac{32552}{0.0755}$$

$$C'_s = 431,152.32 \text{ Kg/Hr.m}^2$$

$$Nre_c = \frac{C'_s D_{eq}}{\mu_c}$$

$$Nre_c = \frac{(431152.32) (0.0185)}{(1.26)}$$

$$Nre_c = 6,330.41$$

$$f_c = 0.3312$$

$$P_{c2} = \frac{f_c C'_s{}^2 D_i (N+1)}{D_{eq} Sgr_g \rho_g 2.54 \times 10^{15}}$$

$$P_{C2} = 0.0245 \text{ Kg/cm}^2$$

Sección de subenfriamiento.

$$L_1 = L_t \frac{A_3}{A}$$

$$L_1 = (12.20) \frac{103.14}{847.36}$$

$$L_1 = 1.485$$

$$(N + I)_3 = \frac{L_1}{B}$$

$$(N + I)_3 = \frac{1.485}{0.3048}$$

$$(N + I)_3 = 4.87$$

$$D_1 = 0.9906 \text{ m}$$

$$\theta_1 = \left(\frac{\mu}{\mu_{wg}} \right)^{0.14} = \left(\frac{3.66 \times 10^{-4}}{3.53 \times 10^{-4}} \right)^{0.14}$$

$$\theta_1 = 1.005$$

$$Sgr_1 = \frac{\rho_1}{\rho_w}$$

$$Sgr_1 = \frac{1403.60}{1000}$$

$$Sgr_1 = 1.4036$$

$$L'_{s1} = 431,152.32 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{Hr.}$$

$$Nre_1 = 6,056.43$$

$$f_1 = 0.3276$$

$$\Delta P_{c3} = \frac{f L_s^2 D_i (N + 1)}{D_{eq} S g r^3 2.54 \times 10^{15}}$$

$$\Delta P_{c3} = \frac{(0.3276) (431152.32)^2 (0.9906) (4.87)}{(0.0185) (1.4036) (1.005) (2.54 \times 10^{15})}$$

$$\Delta P_{c3} = 4.43 \times 10^{-3} \text{ Kg/cm}^2$$

$$\Delta P_{ct} = \Delta P_{cl} + \Delta P_{c2} + \Delta P_{c3}$$

$$\Delta P_{ct} = 0.4467 + 0.0245 + 4.43 \times 10^{-3}$$

$$\Delta P_{ct} = 0.4756 \text{ Kg/cm}^2$$

Resumen:

Se tiene un equipo de tubos y coraza, manejando por los tubos la salmuera y por la coraza el cloro, los tubos son de 19.05 mm (3/4 in) de diámetro BWG 18, con 25.4 mm (1 in) de paso, siendo 1206 tubos colocados en forma triangular y una longitud de 12.20 m. La coraza es de 0.9906 m de diámetro, la caída de presión por los tubos es de $1.54 \times 10^{-3} \text{ Kg/cm}^2$ y por la coraza es de 0.4756 Kg/cm^2 .

TANQUE ACUMULADOR (BALANCE)

- Condiciones de Diseño.

Presión: 7 Kg/cm² man.

Temperatura: 273°K

L' = 32,552.00 Kg/Hr

G' = 487.13 Kg/Hr

t = 11.25 min

$\rho_l = 1,523.11 \text{ Kg/m}^3$

$\rho_g = 9.54 \text{ Kg/m}^3$

- Procedimiento de Diseño:

$$u = k \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \right)^{0.5}$$

$$K = 0.0957$$

$$u = (0.0957) \left(\frac{1523.11 - 9.54}{9.54} \right)^{0.5}$$

$$u = 1.205 \text{ m/seg}$$

$$D_{\min} = 0.0187 \left(\frac{G'}{u g_{av} f_{av}} \right)^{0.5}$$

$$f_{av} = 0.05$$

$$D_{\min} = (0.0187) \left(\frac{487.13}{(1.205) (9.54) (0.05)} \right)^{0.5}$$

$$D_{\min} = 0.544 \text{ m} = 0.61 \text{ m} \quad \text{aproximado a estandares.}$$

$$f_{al} = 1 - f_{av}$$

$$f_{al} = 1 - 0.05$$

$$f_{al} = 0.95$$

$$\frac{h}{D} = 0.91$$

$$f_{hv} = D_{\min} \left(1 - \frac{h}{D} \right)$$

$$f_{hv} = (0.61) (1 - 0.91)$$

$$f_{hv} = 0.055$$

$$\frac{h}{D_{\min}} = \frac{0.1524}{D_{\min}}$$

$$\frac{h}{D_{\min}} = \frac{0.1524}{0.61}$$

$$\frac{h}{D_{\min}} = 0.25$$

$$f_{alm} = 0.1955$$

$$f_{alu} = f_{al} - f_{alm}$$

$$f_{alu} = 0.95 - 0.1955$$

$$f_{alu} = 0.7545$$

$$L = \frac{0.016L^4}{D^2 \cdot 9 \cdot f_{alu}}$$

$$L = \frac{(0.016) (32552) (11.25)}{(0.61)^2 (1523.11) (0.7545)}$$

$$L = 13.7 \text{ m}$$

Resumen:

Se tiene un recipiente cilíndrico horizontal de 0.61 m de diámetro y 13.7 m de longitud.

8.2. Equipo de recuperación.

TORRE DE ABSORCION

- Condiciones de Diseño.

Presión: 7 Kg/cm² man.

Temperatura: 283°K

Para el gas (Cloro):

$$M_g = 37.66 \text{ Kg/kgmol}$$

$$\mu_g = 1.456 \times 10^{-5} \text{ Kg/m. seg.}$$

$$D_g = 1.61 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg.}$$

$$\rho_g = 9.54 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{p_g} = 222.94 \text{ cal/Kg. } ^\circ\text{k} = 933.48 \text{ N.m/kg. } ^\circ\text{K}$$

$$K_g = 3.43 \times 10^{-3} \text{ cal/m. seg. } ^\circ\text{K} = 0.0145 \text{ W/m. } ^\circ\text{K}$$

Para el líquido (Agua):

$$M_l = 18 \text{ Kg/Kgmol}$$

$$\mu_l = 1.375 \times 10^{-3} \text{ kg/m. seg}$$

$$D_1 = 1.16 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{seg}$$

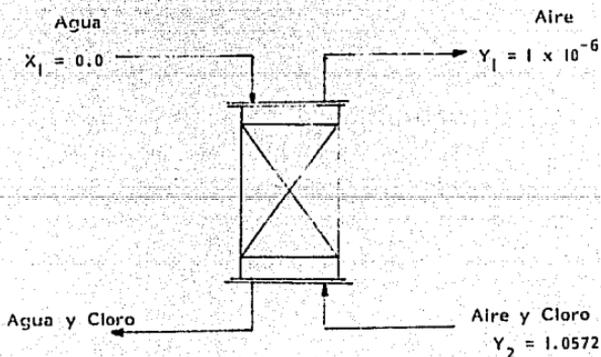
$$\rho_1 = 904.10 \text{ kg/m}^3$$

$$r_1 = 6.50 \text{ N/m}$$

$$C_{p1} = 1,799.11 \text{ cal/Kg} \cdot ^\circ\text{K} = 7,533.02 \text{ N} \cdot \text{m/Kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$K_1 = 0.1537 \text{ cal/m} \cdot \text{seg} \cdot ^\circ\text{K} = 0.6435 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{K}$$

- Procedimiento de dise~no.



Se utilizan para empacar la torre anillos de Raschig con las siguientes características:

$$d = 50.66 \text{ mm}$$

$$C_f = 60$$

$$f = 0.74$$

$$d_s = 0.0725 \text{ m}$$

Cálculo de diámetro.

$$\frac{L_s^*}{G_s} = \frac{Y_2^* - Y_1}{X_2 - X_1}$$

$$X_2^* = 6.315 \times 10^{-3}$$

$$\frac{L_s^*}{G_s} = \frac{1.0572 - 1 \times 10^{-6}}{6.315 \times 10^{-3} - 0.0}$$

$$\frac{L_s^*}{G_s} = 167.41$$

$$L_S^* = (167.41) G_S'$$

$$G_S' = 4.68 \text{ kgmol/Hr} = 135.68 \text{ Kg/Hr}$$

$$L_S^* = (167.41) (4.68)$$

$$L_S^* = 783.48 \text{ Kgmol/Hr} = 14,102.62 \text{ Kg/Hr}$$

$$L_S^i = 1.5 L_S^*$$

$$L_S^i = (1.5) (783.48)$$

$$L_S^i = 1,175.22 \text{ Kgmol/Hr} = 21,153.96 \text{ Kg/Hr}$$

$$\frac{L_S^i}{G_S} = \frac{1175.22}{4.68}$$

$$\frac{L_S^i}{G_S} = 251.11$$

$$X_2 = \left(\frac{Y_2 - Y_1}{\frac{L_S^i}{G_S}} \right) + X_1$$

$$X_2 = \left(\frac{1.0572 - 1 \times 10^{-6}}{251.11} \right)^{-0.0}$$

$$X_2 = 4.21 \times 10^{-3}$$

$$X_2 = 4.19 \times 10^{-3}$$

$$L' = L'_s + W_{cl}$$

$$L' = 21153.96 + 351.45$$

$$L' = 21,505.41 \text{ Kg/Hr} = 5.97 \text{ Kg/seg.}$$

$$G' = 487.13 \text{ Kg/Hr} = 0.135 \text{ Kg/seg}$$

$$\frac{L'}{G'} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right)^{0.5}$$

$$\frac{L'}{G'} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right)^{0.5} = \frac{5.97}{0.135} \left(\frac{9.54}{904.10 - 9.54} \right)^{0.5}$$

$$\frac{L'}{G'} \left(\frac{\rho}{\rho_l - \rho_g} \right)^{0.5} = 4.56$$

Utilizando un 65% de la caída de presión a la inundación se tiene:

$$\frac{G^2 C_f \mu_l^{0.1}}{\rho_g (\rho_l - \rho_g) g^c} = 0.0028$$

$$G = \left(\frac{(0.0028) \rho_g (\rho_l - \rho_g) g^c}{C_f \mu_l^{0.1}} \right)^{0.5}$$

$$G = \left(\frac{(0.0028) (9.54) (904.10 - 9.54) (1)}{(60) (1.375 \times 10^{-3})^{0.1} (1)} \right)^{0.5}$$

$$G = 0.877 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{seg.}$$

$$\text{Area} = \frac{G'}{G}$$

$$\text{Area} = \frac{0.135}{0.877}$$

$$\text{Area} = 0.154 \text{ m}^2$$

Suponiendo una torre de forma cilíndrica

$$\text{Area} = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$D = \left(\frac{4 \text{ Area}}{\pi} \right)^{0.5}$$

$$D = \left(\frac{(4) (0.154)}{\pi} \right)^{0.5}$$

$$D = 0.443 \text{ m}$$

$$L = \frac{L'}{\text{Area}}$$

$$L = \frac{5.97}{0.154}$$

$$L = 38.76 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{seg}$$

$$L_s = \frac{L'_s}{\text{Area}}$$

$$L_s = \frac{21153.96}{0.154}$$

$$L_s = 137,363.38 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{Hr} = 38.15 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{seg}$$

$$\bar{L} = \frac{L + L_s}{2}$$

$$\bar{L} = \frac{38.76 + 38.15}{2}$$

$$\bar{L} = 38.455 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{seg}$$

$$\bar{L}_m = 2.136 \text{ Kgmol/m}^2 \cdot \text{seg}$$

$$G_s = \frac{G'_s}{\text{Area}}$$

$$G_s = \frac{135.68}{0.154}$$

$$G_s = 881.04 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{Hr.} = 0.24 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{seg}$$

$$\bar{G} = \frac{G + G_s}{2}$$

$$\bar{G} = \frac{0.877 + 0.245}{2}$$

$$\bar{G} = 0.561 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{seg}$$

$$\bar{G} = 0.561 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{seg}$$

$$\bar{G}_m = 0.0141 \text{ Kgmol/m}^2 \cdot \text{seg}$$

Cálculo de altura

$$\beta = 1.508 d_s^{0.376}$$

$$\beta = (1.508) (0.0725)^{0.376}$$

$$\beta = 0.5622$$

$$\psi_{lsw} = \frac{2.47 \times 10^{-4}}{d_s^{1.21}}$$

$$\psi_{lsw} = \frac{2.47 \times 10^{-4}}{(0.0725)^{1.21}}$$

$$\psi_{lsw} = 5.91 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$\psi_{ltw} = \frac{(2.09 \times 10^{-6}) (737.5 \text{ L})^0}{d_s^2}$$

$$\psi_{ltw} = \frac{(2.09 \times 10^{-6}) ((737.5) (38.455))^{0.5622}}{(0.0725)^2}$$

$$\psi_{ltw} = 0.1267 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$\psi_{low} = \psi_{ltw} - \psi_{lsw}$$

$$\psi_{low} = 0.1267 - 5.91 \times 10^{-3}$$

$$\psi_{\text{low}} = 0.1208 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$a_{\text{aw}} = m \left(\frac{808C}{9.5g} \right)^n L^{-p}$$

$$a_{\text{aw}} = (34.03) \left(\frac{(808) (0.561)}{(9.54) 0.5} \right)^0 (38.455)^{0.362}$$

$$a_{\text{aw}} = 127.53 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

$$a_{\text{vw}} = 0.85 a_{\text{aw}} \left(\frac{\psi_{\text{ltw}}}{\psi_{\text{low}}} \right)$$

$$a_{\text{vw}} = (0.85) (127.53) \left(\frac{0.1267}{0.1208} \right)$$

$$a_{\text{vw}} = 113.70 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

$$f_{\text{lo}} = f - \psi_{\text{ltw}}$$

$$f_{\text{lo}} = 0.74 - 0.1267$$

$$\xi_{10} = 0.61$$

$$\frac{F_g S_c^{2/3}}{G_m} = 1.195 \left(\frac{d_g G}{g (1 - \xi_{10})} \right)^{-0.36}$$

$$F_g = \frac{1.195 G_m}{S_c^{2/3}} \left(\frac{d_g G}{g (1 - \xi_{10})} \right)^{-0.36}$$

$$S_c = \frac{g}{\rho_g D_g}$$

$$S_c = \frac{(1.456 \times 10^{-5})}{(9.54) (1.61 \times 10^{-6})}$$

$$S_c = 0.948$$

$$F_g = \frac{(1.195) (0.0141)}{(0.948)^{2/3}} \left(\frac{(0.0725) (0.561)}{(1.456 \times 10^{-5}) (1 - 0.61)} \right)^{-0.36}$$

$$F_g = 7.15 \times 10^{-4} \text{ Kgmol/m}^2 \cdot \text{seg}$$

$$F_{g_{vw}} = (7.15 \times 10^{-4}) \quad (113.70)$$

$$F_{g_{vw}} = 0.0813 \text{ Kgmol/m}^3 \cdot \text{seg}$$

$$\frac{K_1 d_s}{D_1} = 25.1 \left(\frac{d_s \bar{L}}{D_1} \right)^{0.45} S_{cl}^{0.5}$$

$$K_1 = \frac{25.1 D_1}{d_s} \left(\frac{d_s \bar{L}}{D_1} \right)^{0.45} S_{cl}^{0.5}$$

$$S_{cl} = \frac{1}{f_1 D_1}$$

$$S_{cl} = \frac{(1.375 \times 10^{-3})}{(904.10) (1.16 \times 10^{-9})}$$

$$S_{cl} = 1,311.08$$

$$K_1 = \frac{(25.1) (1.16 \times 10^{-9})}{(0.0725)} \left(\frac{(0.0725) (38.455)}{(1.375 \times 10^{-3})} \right)^{0.45} (1311.08)^{0.5}$$

$$K_1 = 4.47 \times 10^{-4} \text{ Kgmol/m}^2 \cdot \text{seg. (Kgmol/m}^3)$$

$$F_1 = K_1 C$$

$$C = 50.22 \text{ Kgmol/m}^3$$

$$F_1 = (4.47 \times 10^{-4}) (50.22)$$

$$F_1 = 0.0224 \text{ Kgmol/m}^2 \cdot \text{seg.}$$

$$F_1 a_{vw} = (0.0224) (113.70)$$

$$F_1 a_{vw} = 2.547 \text{ Kgmol/m}^3 \cdot \text{seg.}$$

$$N_{tg} = \frac{y_1}{y_2} \int \frac{dy}{y - y_1} + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 - y_2}{1 - y_1} \right)$$

La relación para obtener la composición en el equilibrio es:

$$\frac{1 - y_1}{1 - y} = \left(\frac{1 - x}{1 - x_1} \right)^{F_1 a_{vw} / F_g a_v}$$

$$y_1 = 1 - \left(\frac{1 - x}{1 - x_1} \right)^{F_j^{a_v} / F_g^{a_v}} (1 - y)$$

Utilizando la regla de Simpson de integración se tiene:

$$\int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y - y_1} = 14.105$$

$$N_{tg} = 14.105 + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 - 0.5139}{1 - 0.0} \right)$$

$$N_{tg} = 14.465$$

$$H_{tg} = \frac{\bar{C}_m}{F_g^{a_{vw}}}$$

$$H_{tg} = \frac{0.0141}{0.0813}$$

$$H_{tg} = 0.173 \text{ m}$$

$$Z = H_{tg} N_{tg}$$

$$Z = (0.173) (14.465)$$

$$Z = 2.50 \text{ m}$$

Tomando un sobrediseño de 10%

$$Z_r = 1.1 Z$$

$$Z_r = (1.1) (2.5)$$

$$Z_r = 2.75 \text{ m}$$

$$V = \text{Area } Z_r$$

$$V = (0.154) (2.75)$$

$$V = 0.4235 \text{ m}^3$$

Balance térmico

Por analogía con la transferencia de masa se hace.

$$J_d = J_h$$

$$J_h = 1.195 \left(\frac{ds\bar{G}}{g (1 - \phi) \phi} \right)^{-0.36}$$

$$J_h = \frac{h_g Pr_g^{2/3}}{C_{pg} \bar{G}}$$

$$h_g = \frac{1.195 C_{pg} \bar{G}}{Pr_g^{2/3}} \left(\frac{ds\bar{G}}{g (1 - \phi) \phi} \right)^{-0.36}$$

$$Pr_g = \frac{C_{pg} g}{K_g}$$

$$Pr_g = \frac{(222.94) (1.456 \times 10^{-5})}{(3.43 \times 10^{-3})}$$

$$Pr_g = 0.946$$

$$h_g = \frac{(1.195) (933.48) (0.561)}{(0.946)^{2/3}} \left(\frac{(0.0725) (0.561)}{(1.456 \times 10^{-5}) (1 - 0.61)} \right)^{-0.36}$$

$$h_g = 26.59 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}$$

$$h_g a_{vw} = (26.59) (113.70)$$

$$h_g a_{vw} = 3,023.28 \text{ W/m}^3 \cdot \text{°K}$$

$$\frac{h_d d_s}{k_l} = 25.1 \left(\frac{d_s L}{l} \right)^{0.45} Pr_l^{0.5}$$

$$h_l = \frac{25.1 k_l}{d_s} \left(\frac{d_s L}{l} \right)^{0.45} Pr_l^{0.5}$$

$$Pr_1 = \frac{C_{pl} \dot{q}_l}{k_l}$$

$$Pr_1 = \frac{(1799.11) (1.375 \times 10^{-3})}{(0.1537)}$$

$$Pr_1 = 16.10$$

$$h_1 = \frac{(25.1) (0.6435)}{(0.0725)} \left(\frac{(0.0725) (38.455)}{(1.375 \times 10^{-3})} \right)^{0.45} (16.10)^{0.5}$$

$$h_1 = 27,506.91 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}$$

$$h_1 a_{vw} = (27506.91) (113.70)$$

$$h_1 a_{vw} = 3,127,535.70 \text{ W/m}^3 \cdot \text{°K}$$

$$\frac{1}{U_{a_{vw}}} = \frac{1}{h_g a_{vw}} + \frac{1}{h_l a_{vw}}$$

$$\frac{1}{U_{a_{vw}}} = \frac{1}{3023.28} + \frac{1}{3127535.70}$$

$$\frac{1}{U_{a_{vw}}} = 3.31 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{°K/W}$$

$$U_{a_{vw}} = 3,020.36 \text{ W/m}^3 \cdot \text{°K} = 2'596,918.30 \text{ cal/m}^3 \cdot \text{Hr. °K}$$

$$L' C_{p_l} \Delta T_l = G' C_{p_g} \Delta t_g$$

$$\Delta T_l = \frac{G' C_{p_g} \Delta t_g}{L' C_{p_l}}$$

$$T_2 = T_1 - \frac{G' C_{p_g} (t_2 - t_1)}{L' C_{p_l}}$$

$$T_2 = 283 - \frac{(487.13)(222.94)(t_2 - 273)}{(21505.41)(1799.11)}$$

$$T_2 = 283.766 - 2.807 \times 10^{-3} t_2$$

$$G'C_p \Delta t_g = Ua_{vw} VDMLT$$

$$\Delta t_g = \frac{Ua_{vw} VDMLT}{G'C_p}$$

$$t_2 = t_1 + \frac{Ua_{vw} VDMLT}{G'C_p}$$

$$t_2 = 273 + \frac{(2596918.30)(0.4235) DMLT}{(487.13)(222.94)}$$

$$t_2 = 273 + 10.13 DMLT$$

$$DMLT = \frac{(t_2 - t_1) - (T_1 - t_2)}{\ln \left(\frac{T_2 - t_1}{T_1 - t_2} \right)}$$

$$DMLT = \frac{(283.766 - 2.807 \times 10^{-3}t_2 - 273) - (283 - t_2)}{\ln \left(\frac{283.766 - 2.807 \times 10^{-3}t_2 - 273}{283 - t_2} \right)}$$

$$DMLT = \frac{(0.9972t_2 - 272.234)}{\ln \left(\frac{10.766 - 2.807 \times 10^{-3}t_2}{283 - t_2} \right)}$$

$$t_2 = 273 + (10.13) \left(\frac{(0.9972t_2 - 272.234)}{\ln \left(\frac{10.766 - 2.807 \times 10^{-3}t_2}{283 - t_2} \right)} \right)$$

Suponiendo $t_2 = 272.9618 \text{ } ^\circ\text{K}$

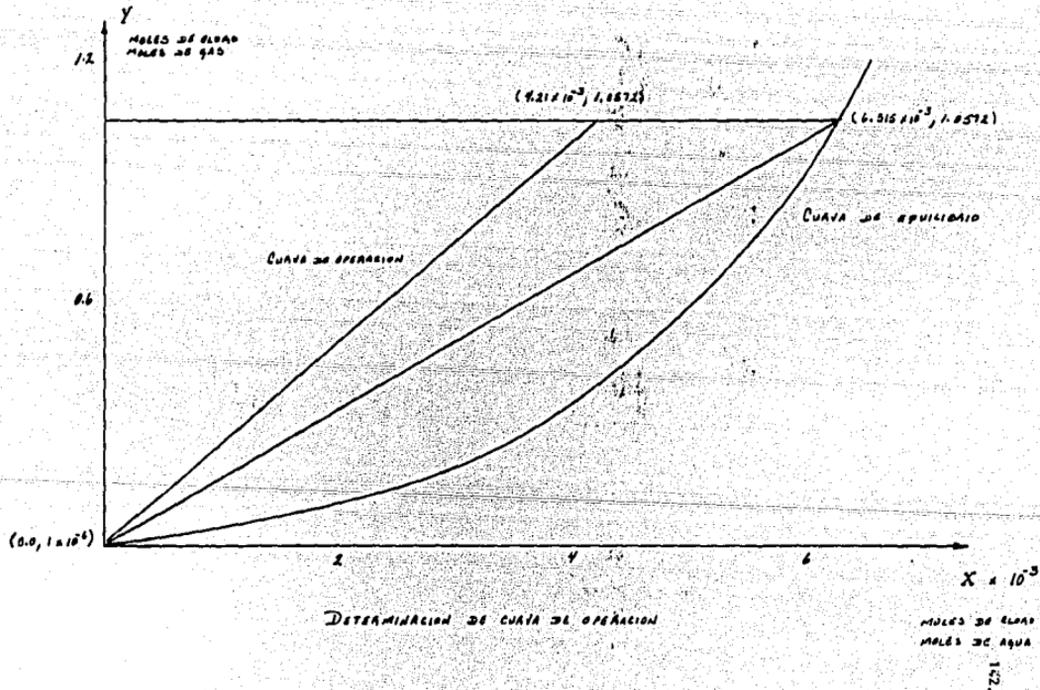
$$t_2 = 272.935 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_2 = 283^\circ\text{K}$$

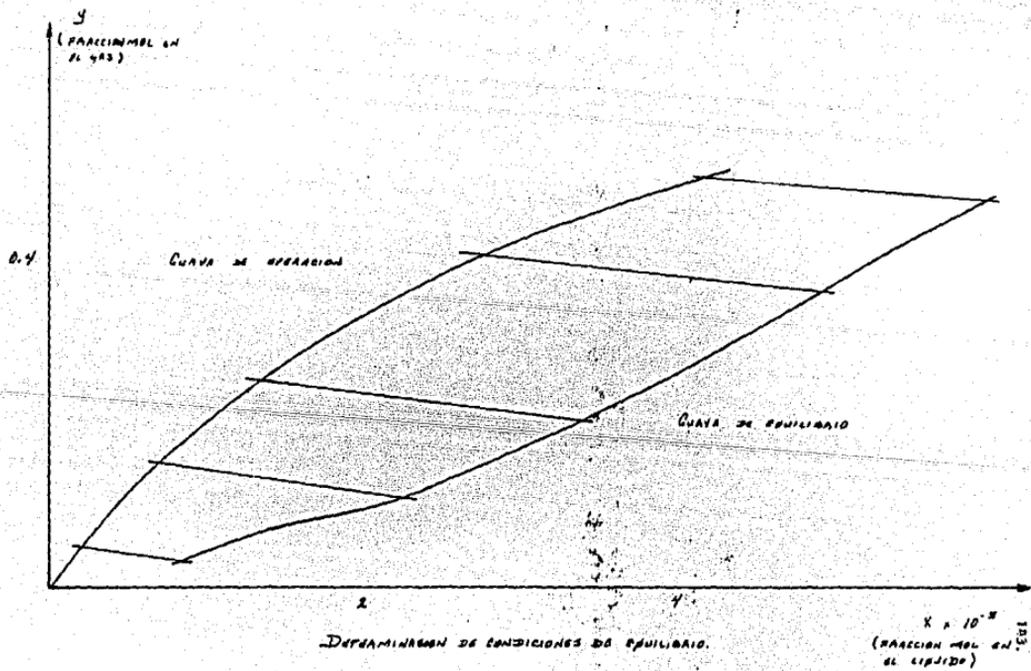
Resumen:

Se tiene una torre empacada con anillos de Raschig, de cerámica, de 50 mm (2 in), la torre es de 0.443 m de diámetro y una altura de 2.75 m, los flujos son introducidos a contracorriente y la caída de presión del gas en el empaque es de 0.0153 Kg/cm^2 .

GRAFICA 3



GRAFICA 4



8.3. Equipo de vaporización.

TANQUE DE VAPORIZACION

- Condiciones de diseño.

Presión de entrada: 7 Kg/cm² man.

Presión de salida: 1 Kg/cm² man.

Temperatura de entrada: 272.953°K

$G' = 172.80 \text{ kg/Hr}$

$\rho_l = 904.10 \text{ kg/m}^3$

$\rho_g = 0.08367 \text{ kg/m}^3$

- Procedimiento de diseño.

$$V_a = (0.061) \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \right)^{0.5}$$

$$V_a = (0.061) \left(\frac{904.10 - 0.08367}{0.08367} \right)^{0.5}$$

$$V_a = 6.34 \text{ m/seg}$$

$$V_d = 0.4V_a$$

$$V_d = (0.4) (6.34)$$

$$V_d = 2.536 \text{ m/seg}$$

$$D = (0.016) \left(\frac{G'}{\rho_g V_d} \right)^{0.5}$$

$$D = (0.016) \left(\frac{(172.80)}{(0.08367) (2.536)} \right)^{0.5}$$

$$D = 0.4566 \text{ m} = 0.4572 \text{ m}$$

$$L = 1.12 \text{ m}$$

$$\frac{L}{D} = \frac{1.12}{0.4572}$$

$$D = 0.4572$$

$$\frac{L}{D} = 2.44 \text{ m}$$

$$D$$

Resumen:

Se tiene un recipiente cilíndrico vertical de 0.4572 m de diámetro y -

1.12 m de altura.

EVAPORADOR

La recuperación del cloro disuelto en agua se realiza por calentamiento. El proceso es una desorción por cambio de temperatura, con lo cual se recupera cloro húmero, la humedad es debida a el arrastre de agua que realiza el cloro en la desorción.

Se considera que la desorción ocurre a 283°K y que el cloro gas se calienta hasta 353°K, también se supone que la evaporación del agua se lleva a cabo a 353 °K, estas consideraciones se hacen para asegurar un máximo de calor necesario y con ésto tratar de preveer las condiciones mas drásticas en el equipo. El procedimiento de diseño es el presentado por Kern para vaporizadores.

- Condiciones de diseño.

Presión del líquido:	1 Kg/cm ² man.
Temperatura de entrada del líquido:	283°K
Temperatura de salida del líquido:	353°K
Presión del vapor:	2 Kg/cm ² man.
Temperatura del vapor:	393.65°K

Para el líquido (agua clorada)

$$L_1^i = 21,163.71 \text{ Kg/Hr}$$

$$M_1 = 18.15 \text{ Kg/Kg mol}$$

$$\mu_1 = 6.5 \times 10^{-4} \text{ Kg/m. seg} = 2.34 \text{ Kg/m. Hr}$$

$$\rho_1 = 990.25 \text{ Kg/m}^3$$

$$C_{pl} = 1,002.50 \text{ cal/Kg. } ^\circ\text{K} = 4,197.46 \text{ N.m/m. Hr}$$

$$K_1 = 0.1517 \text{ cal/m. seg. } ^\circ\text{K}$$

$$\mu_{w1} = 2.1 \times 10^{-4} \text{ Kg/m. seg} = 0.756 \text{ Kg/m. Hr}$$

$$\lambda_w = 560,900.00 \text{ cal/kg}$$

Para el gas desorbido (cloro y agua)

$$L_2^i = 138.60 \text{ Kg/Hr}$$

$$M_2 = 71 \text{ Kg/Kgmol}$$

$$\dot{m}_2 = 3.07 \times 10^{-4} \text{ Kg/m. seg} = 1.10 \text{ Kg/m. Hr}$$

$$\rho_2 = 1,081.42 \text{ Kg/m}^3$$

$$C_{p2} = 972.43 \text{ cal/Kg.}^\circ\text{K} = 4,071.57 \text{ N.m/Kg.}^\circ\text{K}$$

$$K_2 = 0.03 \text{ cal/m. seg.}^\circ\text{K}$$

$$\dot{m}_{w2} = 2.26 \times 10^{-4} \text{ Kg/m. seg} = 0.8136 \text{ Kg/m.Hr}$$

Para el líquido evaporado (agua)

$$L'_w = 30.80 \text{ Kg/Hr.}$$

$$M_w = 18 \text{ Kg/Kgmol}$$

$$\dot{m}_w = 1 \times 10^{-3} \text{ Kg/m. seg} = 3.6 \text{ Kg/m.Hr}$$

$$\rho_w = 1,000.00 \text{ Kg/m}^3$$

$$C_{p_w} = 1,000.00 \text{ cal/kg. } ^\circ\text{K} = 4,430.81 \text{ N.m/Kg. } ^\circ\text{K}$$

$$K_w = 0.1537 \text{ cal/m. seg. } ^\circ\text{K}$$

$$\mu_w = 6.5 \times 10^{-4} \text{ Kg/m. seg} = 2.34 \text{ Kg/m. Hr}$$

Para vapor de calentamiento

$$M_g = 18 \text{ Kg/Kgmol}$$

$$\mu_g = 2 \times 10^{-4} \text{ Kg/m. seg.} = 0.72 \text{ Kg/m. Hr}$$

$$\rho_g = 945.05 \text{ Kg/m}^3$$

$$K_g = 0.1628 \text{ cal/m. seg. } ^\circ\text{K}$$

$$\mu_{wg} = 2.1 \times 10^{-4} \text{ Kg/m. seg.} = 0.756 \text{ Kg/m. Hr.}$$

$$\lambda_g = 525,192.42 \text{ cal/kg}$$

$$g = 9.8 \text{ m/seg}^2$$

Las propiedades del líquido se calcularon a una temperatura promedio de 318 °K, las del gas a 283°K, las del líquido evaporado a 353°K y - las del vapor a 390.82°K (suponiendo una temperatura de pared de - 388°K)

- Procedimiento de diseño.

Balance térmico:

$$Q = L_1 w C_{pl} \Delta T + L'_w \lambda_w + L'_2 C_{pc} \Delta T$$

$$Q = (21118.31) (1002.50) (353-283) + (30.80) (560900)$$

$$+ (138.60) (118.70) (353 - 283)$$

$$Q = 1.50 \times 10^9 \text{ cal/Hr}$$

$$Q = G' \lambda_g$$

$$G' = \frac{Q}{\lambda_g}$$

$$G' = \frac{1.50 \times 10^9}{525192.42}$$

$$G' = 2,856.86 \text{ Kg/Hr}$$

$$q_1 = L'_w C_{p1} \Delta T$$

$$q_1 = (21118.31) (1002.50) (353-283)$$

$$q_1 = 1.482 \times 10^9 \text{ cal/Hr} = 411,660.49 \text{ cal/seg}$$

$$q_2 = L'_2 C_{p2} \Delta T$$

$$q_2 = (138.60) (118.70) (353 - 283)$$

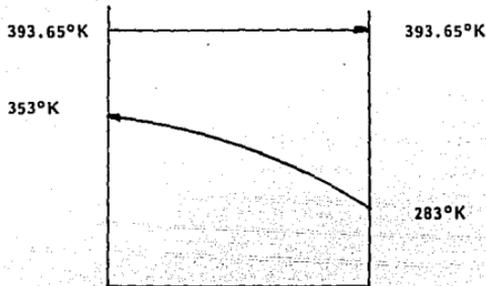
$$q_2 = 1151,627.40 \text{ cal/Hr} = 319.90 \text{ cal/seg}$$

$$q_3 = L'_w \lambda_w$$

$$q_3 = (30.80) (560900)$$

$$q_3 = 17'275,720.00 \text{ cal/Hr} = 4,798.81 \text{ cal/seg}$$

Cálculo de la diferencia media logarítmica de temperatura (DMLT).



DMLT₁

$$\Delta T_1 = 393.65 - 353$$

$$\Delta T_1 = 40.65^\circ\text{K}$$

$$\Delta T_2 = 393.65 - 283$$

$$\Delta T_2 = 110.65^\circ\text{K}$$

$$DMLT_1 = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}$$

$$DMLT_1 = \frac{40.65 - 110.65}{\ln \left(\frac{40.65}{110.65} \right)}$$

$$DMLT_1 = 69.90^\circ\text{K}$$

DMLT₂

$$\Delta T_1 = 393.65 - 353$$

$$\Delta T_1 = 40.65$$

$$\Delta T_2 = 393.65 - 283$$

$$\Delta T_2 = 110.65^\circ\text{K}$$

$$DMLT_2 = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}$$

$$DMLT_2 = \frac{40.65 - 110.65}{\ln \left(\frac{40.65}{110.65} \right)}$$

$$DMLT_2 = 69.90^\circ\text{K}$$

DMLT₃

$$DMLT_3 = 393.65 - 353$$

$$DMLT_3 = 40.65^\circ\text{K}$$

$$Q = DMLT_b \sum \frac{q_i}{DMLT_i}$$

$$DMLT_b = \frac{Q}{\sum \frac{q_i}{DMLT_i}}$$

$$DMLT_b = \frac{1.50 \times 10^9}{\frac{1.4820 \times 10^9}{69.90} + \frac{1151627.40}{69.90} + \frac{17275720.00}{40.65}}$$

$$DMLT_b = 69.30^\circ\text{K}$$

Suponiendo un coeficiente de transferencia de calor.

$$U_s = 1415,927.83 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{Hr.}^\circ\text{K}$$

$$A = \frac{Q}{U_s DMLT_b}$$

$$A = \frac{(1.50 \times 10^9)}{(1415927.83) (69.30)}$$

$$A = 15.287 \text{ m}^2$$

Se tiene un arreglo triangular con tubos de 19.05 mm (3/4 in) de diámetro, con 25.4 mm (1 in) de paso, son tubos BWG 18.

$$a_t = 0.060 \text{ m}^2/\text{m}$$

$$L_t = 3.048 \text{ m}$$

$$n_t = \frac{A}{a_t L_t}$$

$$n_t = \frac{15.287}{(0.060)(3.048)}$$

$$n_t = 83.60$$

Cumple con un diámetro de coraza de 0.3048 m (12 in), 92 tubos y un paso.

$$\frac{L_t}{D_c} = \frac{3.048}{0.3048}$$

$$\frac{L_t}{D_c} = 10$$

$$B = 0.3048 \text{ m}$$

Cálculos de coeficientes individuales

Para vapor

$$G'' = \frac{G'}{(0.5) L_t n_t}$$

$$G'' = \frac{2856.86}{(0.5) (3.048) (92)}$$

$$G'' = 20.37 \text{ Kg/m. Hr}$$

$$h_{10} = 23.14 \left(\frac{\text{kg}^3 \text{ g}^2}{4G'' \text{ g}} \right)^{0.33} \left(\frac{\text{g}}{\text{wg}} \right)^{0.14} \frac{D_i}{D_e}$$

$$h_{10} = (23.14) \left(\frac{(0.1628)^3 (945.05)^2 (9.8)}{(4) (20.37) (2 \times 10^{-4})} \right)^{0.33} \left(\frac{2 \times 10^{-4}}{2.1 \times 10^{-4}} \right)^{0.14} \frac{0.021}{0.027}$$

$$h_{10} = 2,252.72 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg. } ^\circ\text{K}$$

Para líquido

Sección de calentamiento.

$$a_s = \frac{D_i BC}{P_t n_p}$$

$$a_s = \frac{(0.3048) (0.3048) (0.0254 - 0.01905)}{(0.0254) (1)}$$

$$a_s = 0.0232 \text{ m}^2$$

$$L'_{sl} = \frac{L'_l}{a_s}$$

$$L'_{sl} = \frac{21118.31}{0.0232}$$

$$L'_{sl} = 910,272.00 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{Hr}$$

$$N_{re} = \frac{L'_{sl} D_{eq}}{\mu}$$

$$D_{eq} = 0.0185 \text{ m}$$

$$N_{re} = \frac{(910272.00) (0.0185)}{(2.34)}$$

$$N_{re} = 7,196.60$$

$$J_h = 46$$

$$h_{oi} = \frac{J_h K_f}{D_{eq}} \left(\frac{C_{pl}}{k_f} \right)^{0.33} \left(\frac{\dot{q}}{wl} \right)^{0.14}$$

$$h_{oi} = \frac{(46)(0.1517)}{(0.0185)} \left(\frac{(1002.50)(6.5 \times 10^{-4})}{(0.1517)} \right)^{0.33} \left(\frac{6.5 \times 10^{-4}}{2.1 \times 10^{-4}} \right)^{0.14}$$

$$h_{oi} = 714.76 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg.} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$U_1 = \frac{h_{io} h_{oi}}{h_{io} + h_{oi}}$$

$$U_1 = \frac{(2252.72)(714.76)}{(2252.72) + (714.76)}$$

$$U_1 = 542.60 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg.} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$A_1 = \frac{qI}{U_1 D M L T_1}$$

$$A_1 = \frac{411660.49}{(542.60)(69.90)}$$

$$A_1 = 10.85 \text{ m}^2$$

Sección de sobrecalentamiento.

$$L'_{s2} = \frac{L_2}{a_s}$$

$$L'_{s2} = \frac{138.60}{0.0232}$$

$$L'_{s2} = 5,974.14 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{Hr.}$$

$$N_{re} = \frac{L'_{s2} D_{eq}}{2}$$

$$N_{re} = \frac{(5974.14) (0.0185)}{(1.10)}$$

$$N_{re} = 100.47$$

$$J_h = 5.3$$

$$h_{o2} = \frac{j h K_2}{D_{eq}} \left(\frac{C_{p2}}{k_2} \right)^{0.33} \left(\frac{z}{w_2} \right)^{0.14}$$

$$h_{o2} = \frac{(5.3) (0.03)}{(0.0185)} \left(\frac{(972.43) (3.07 \times 10^{-4})}{(0.03)} \right)^{0.33} \left(\frac{3.07 \times 10^{-4}}{2.26 \times 10^{-4}} \right)^{0.14}$$

$$h_{o2} = 19.15 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg. } ^\circ\text{K}$$

$$U_2 = \frac{h_{i0} h_{o2}}{h_{i0} + h_{o2}}$$

$$U_2 = \frac{(2252.72) (19.15)}{(2252.72) + (19.15)}$$

$$U_2 = 19.00 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg. } ^\circ\text{K}$$

$$A_2 = \frac{q_2}{U_2 D M L T_2}$$

$$A_2 = \frac{319.90}{(19.00) (69.90)}$$

$$A_2 = 0.241 \text{ m}^2$$

Sección de evaporación.

$$q = \left(\frac{C_{p,w} \Delta T}{\lambda C_{sf} Pr_w^{1.7}} \right)^3 \left(\frac{w \lambda}{g(\rho_w - \rho_{wv})} \right)^{1/2}$$

$$q = \left(\frac{(1000) (35)}{(560900) (0.0133) (6.5)^{1.7}} \right)^3 \left(\frac{(1 \times 10^{-3}) (560900)}{(9.81) (0.006372)} \right)^{1/2}$$

$$q = 1,635.06 \frac{\text{cal}}{\text{m}^2 \cdot \text{seg.}} = 5'886,216.00 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{Hr.}$$

$$A_3 = \frac{q_3}{q}$$

$$A_3 = \frac{4798.81}{1635.06}$$

$$A_3 = 2.935 \text{ m}^2$$

$$A = A_1 + A_2 + A_3$$

$$A = 10.85 + 0.241 + 2.935$$

$$A = 14.026 \text{ m}^2$$

$$U_c = \frac{Q}{ADMLT_b}$$

$$U_c = \frac{(1.50 \times 10^9)}{(14.026) (69.30)}$$

$$U_c = 1543,207.02 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{Hr.} \cdot \text{°K} = 428.67 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg.} \cdot \text{°K}$$

$$\frac{1}{U_d} = \frac{1}{U_c} + R_d$$

$$R_d = 2.05 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{Hr.} \cdot \text{°K/cal.}$$

$$\frac{1}{U_d} = \frac{1}{1543207.02} + 2.05 \times 10^{-7}$$

$$\frac{l}{U_d} = 8.53 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{Hr} \cdot \text{°K/cal}$$

$$U_d = 1172,331.30 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{Hr} \cdot \text{°K}$$

$$A_r = a_l L_t n_t$$

$$A_r = (0.060) (3.048) (92)$$

$$A_r = 16.82 \text{ m}^2$$

$$U_r = \frac{Q}{A_r DMLT_b}$$

$$U_r = \frac{(1.50 \times 10^9)}{(16.82) (69.30)}$$

$$U_r = 1286,862.17 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{Hr} \cdot \text{°K}$$

$$\frac{U_e}{U_r} = \frac{154320.7.02}{1286862.17}$$

$$\frac{U_c}{U_r} = 1.20$$

Temperatura de pared.

$$\frac{l}{h_o} = \frac{l}{U_c} - \frac{l}{h_{io}}$$

$$\frac{l}{h_o} = \frac{l}{428.67} = \frac{l}{2252.72}$$

$$\frac{l}{h_o} = 1.88 \times 10^{-3}$$

$$h_o = 529.41 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg.} \cdot \text{°K}$$

$$T_w = \bar{T} + \left(\frac{h_{io}}{h_{io} + h_o} \right) (\bar{T}_g - \bar{T})$$

$$T_w = 318 + \left(\frac{2252.72}{2252.72 + 529.41} \right) (393.65 - 318)$$

$$T_w = 379.25 \text{ } ^\circ\text{K}$$

Cálculo de caída de presión.

Para vapor

$$a_t = \frac{n_t a_t^1}{n_p}$$

$$a_t^1 = 2.155 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$a_t = \frac{(92) (2.155 \times 10^{-4})}{(1)}$$

$$a_t = 0.020 \text{ m}^2$$

$$C_s^1 = \frac{C^1}{a_t}$$

$$C_s^1 = \frac{2856.86}{0.020}$$

$$G'_s = 142,843 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{Hr}$$

$$N_{re} = \frac{G'_s D_t}{\mu}$$

$$N_{re} = \frac{(142,843) (0.01656)}{(0.72)}$$

$$N_{re} = 3,285.40$$

$$f_t = 0.0533$$

$$\mu_t = \left(\frac{\mu_s}{\mu_w} \right)^{0.14} = \left(\frac{2 \times 10^{-4}}{2.1 \times 10^{-4}} \right)^{0.14}$$

$$\mu_t = 0.9932$$

$$S_g r_g = \frac{\rho_s}{\rho_w}$$

$$S_g r_g = \frac{945.05}{1000}$$

$$S_g r_g = 0.945$$

$$\Delta P_t = \frac{f_t G_s^2 L_t n_p}{D_i S_g r_g 2.54 \times 10^{15}}$$

$$\Delta P_t = \frac{(0.053) (142843)^2 (3.048) (1)}{(0.021) (0.945) (0.9932) (2.54 \times 10^{15})}$$

$$\Delta P_t = 6.62 \times 10^{-5} \text{ Kg/cm}^2$$

Para líquido

Sección de calentamiento.

$$L_1 = L_t \frac{A_1}{A}$$

$$L_1 = (3.048) \frac{10.85}{14.026}$$

$$L_1 = 2.36 \text{ m}$$

$$(N + 1)_1 = \frac{L_1}{B}$$

$$(N + 1)_1 = \frac{2.36}{0.3048}$$

$$(N + 1)_1 = 7.74$$

$$D_1 = 0.3048 \text{ m}$$

$$\phi_1 = \left(\frac{L_1}{wl} \right)^{0.14} = \left(\frac{6.5 \times 10^{-4}}{2.1 \times 10^{-4}} \right)^{0.14}$$

$$\phi_1 = 1.17$$

$$S_g r_1 = \frac{1}{\phi_1 w}$$

$$S_g r_1 = \frac{990.25}{1000}$$

$$Sgr_1 = 0.99$$

$$L'_{sl} = 910,272.00 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{Hr}$$

$$N_{re} = 7,196.60$$

$$f_1 = 0.3168$$

$$\Delta P_1 = \frac{f_1 L'_{sl}{}^2 D_1 (N+1)}{D_{eg} Sgr_1 \theta_1 2.54 \times 10^{15}}$$

$$\Delta P_1 = \frac{(0.3168) (910272.00)^2 (0.3048) (7.74)}{(0.0185) (0.990) (1.17) (2.54 \times 10^{15})}$$

$$\Delta P_1 = 0.011 \text{ Kg/cm}^2$$

Sección de sobrecalentamiento.

$$L_2 = L_t \frac{A_2}{A}$$

$$L_2 = (3.048) \frac{0.241}{14.026}$$

$$L_2 = 0.0524 \text{ m}$$

$$(N + 1)_2 = \frac{L_2}{B}$$

$$(N + 1)_2 = \frac{0.0524}{0.3048}$$

$$(N + 1)_2 = 0.172$$

$$D_1 = 0.3048 \text{ m}$$

$$\theta_2 = \left(\frac{f_2}{f_w} \right)^{0.14} = \left(\frac{3.07 \times 10^{-4}}{2.26 \times 10^{-4}} \right)^{0.14}$$

$$\theta_2 = 1.044$$

$$Sgr_2 = \frac{f_2}{f_w}$$

$$Sgr_2 = \frac{1081.42}{1000}$$

$$Sgr_2 = 1.081$$

$$L'_{s2} = 5,974.14 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{Hr.}$$

$$N_{re} = 100.47$$

$$f_2 = 0.8928$$

$$\Delta P_2 = \frac{f_2 L'^2_{s2} D_1 (N + 1)_2}{D_{eq} Sgr_2 \theta_2 2.54 \times 10^{15}}$$

$$\Delta P_2 = \frac{(0.8928) (5974.14)^2 (0.3048) (0.172)}{(0.0185) (1.081) (1.044) (2.54 \times 10^{15})}$$

$$\Delta P_2 = 3 \times 10^{-8} \text{ Kg/cm}^2$$

Sección de evaporación.

$$L_3 = L_t \frac{A_2}{A}$$

$$L_3 = (3.048) \frac{2.935}{14.026}$$

$$L_3 = 0.6378 \text{ m}$$

$$(N + 1)_3 = \frac{L_3}{B}$$

$$(N + 1)_3 = \frac{0.6378}{0.3048}$$

$$(N + 1)_3 = 2.092$$

$$D_1 = 0.3048 \text{ m}$$

$$\theta_3 = \left(\frac{w}{ww} \right)^{0.14} = \left(\frac{1 \times 10^{-3}}{6.5 \times 10^{-4}} \right)^{0.14}$$

$$\theta_3 = 1.062$$

$$Sgr_3 = \frac{\rho}{\rho_w}$$

$$Sgr_3 = \frac{1000}{1000}$$

$$Sgr_3 = 1$$

$$L'_{sw} = 1,327.60 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{Hr}$$

$$N_{re} = 6.82$$

$$f_3 = 5.00$$

$$\Delta P_3 = \frac{f_3 L'_{sw}{}^2 D_1 (N + 1)_3}{D_{eq} Sgr_3 \theta_3 2.5 \times 10^{15}}$$

$$\Delta P_3 = \frac{(5) (1327.60)^2 (0.3048) (2.092)}{(0.0185) (1) (1.062) (2.54 \times 10^{15})}$$

$$\Delta P_3 = 1.26 \times 10^{-7} \text{ Kg/cm}^2$$

$$\Delta P_t = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3$$

$$\Delta P_t = 0.011 + 3 \times 10^{-8} + 1.26 \times 10^{-7}$$

$$\Delta P_t = 0.011 \text{ Kg/cm}^2$$

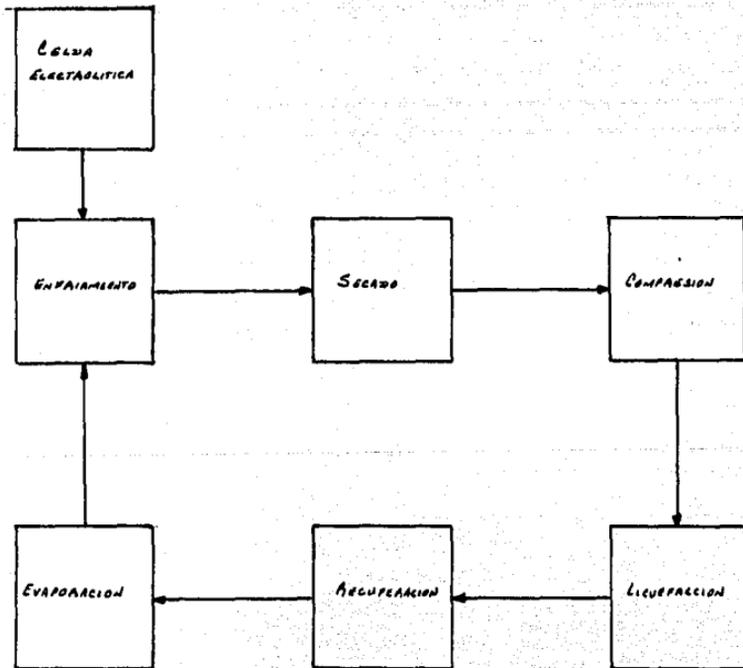
Resumen:

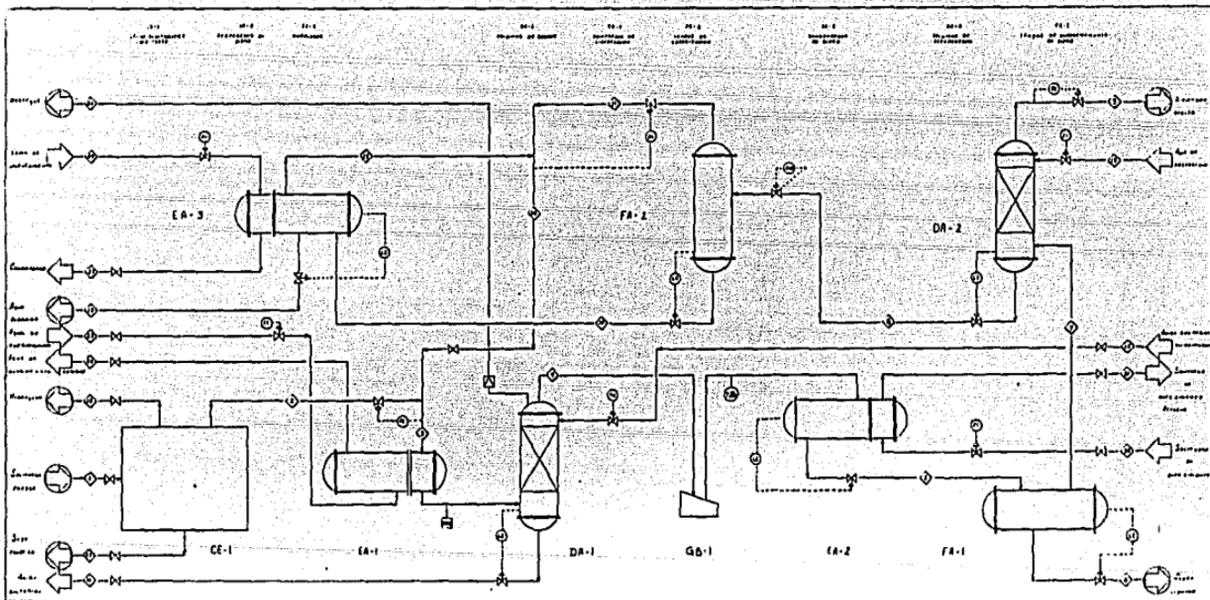
Se tiene un equipo de tubos y coraza, manejando por los tubos vapor y por la coraza el agua clorada, los tubos son de 19.05 mm (3/4 in) de diámetro BWC 18, con 25.4 mm (1 in) de paso, siendo 92 tubos colocados en forma triangular y una longitud de 3.048 m. La coraza es de 0.3048 m de diámetro, la caída de presión por los tubos es de $7.29 \times 10^{-5} \text{ Kg/cm}^2$ y por la coraza es de 0.011 Kg/cm^2 .

8.4 Diafragma de Equipo.

**Diafragmas de proceso, tubería e instrumentos y localización y -
simbología.**

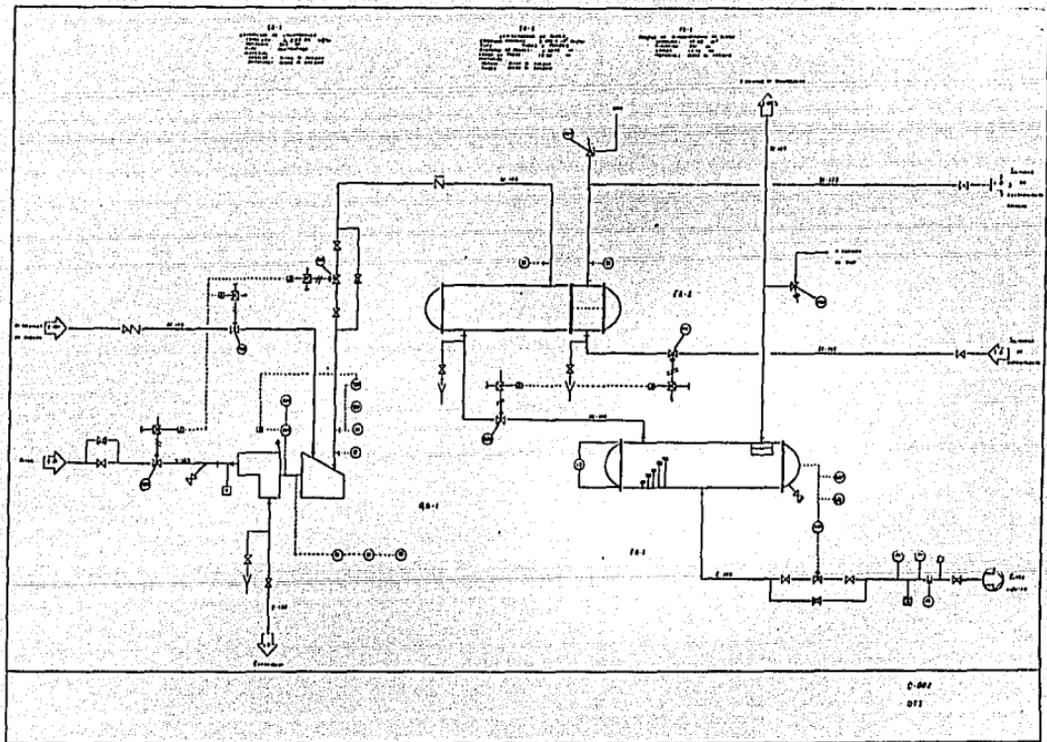
DIAGRAMA DE CICLOS.

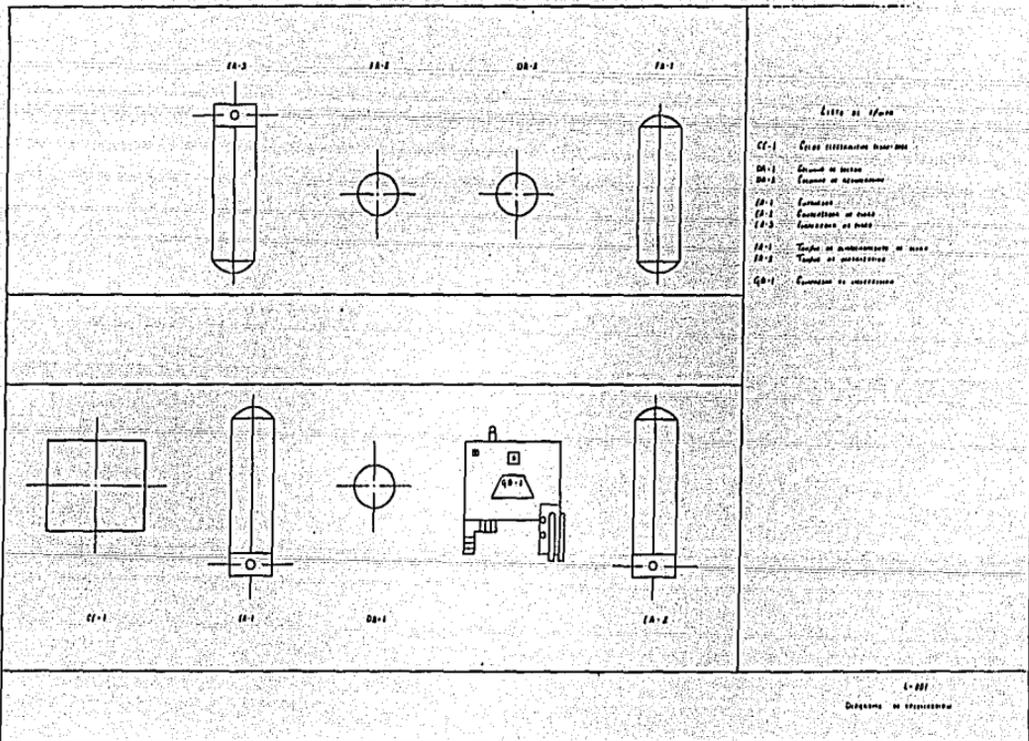


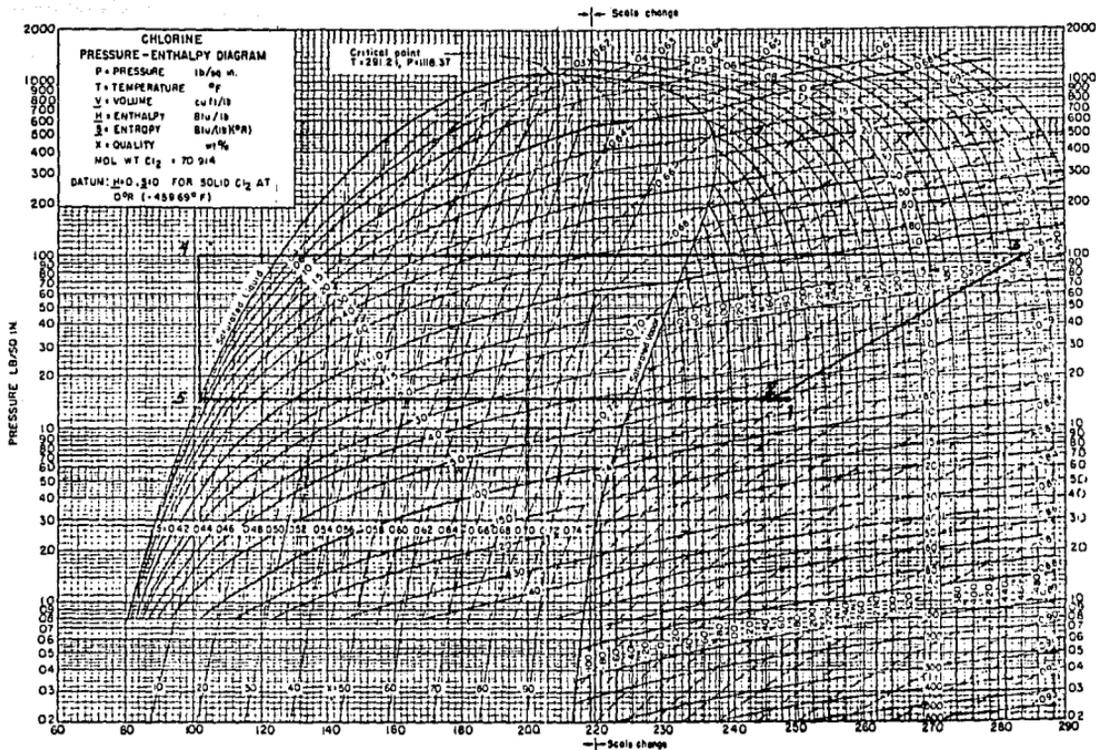


Stream	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Flow rate (kg/h)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Temperature (°C)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Pressure (bar)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Composition (mole %)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

DIAGRAMA DE PROCESSO







ENTHALPY BTU/LB
FIG. 1

BUFETE INDUSTRIAL
BIBLIOTECA

TRAYECTORIA TERMODINAMICA DEL PROCESO

Simbología:

FIC	Control Indicador de Flujo
FRS	Registrador Interruptor de Flujo
HC	Control Manual
HS	Interruptor Manual
LAH	Alarma por Alto Nivel
LAL	Alarma por Bajo Nivel
LG	Vidrio de Nivel
LIC	Control Indicador de Nivel
PI	Indicador de Presión
PIS	Control Indicador de Presión
PSC	Control Interruptor de Presión
PSV	Válvula Interruptora de Presión
S	Velocidad
SAH	Alarma por Alta Velocidad

SI	Indicador de Velocidad
SSH	Interruptor por Alta Velocidad
T	Trampa
TAH	Alarma por Alta Temperatura
TI	Indicador de Temperatura
TIC	Control Indicador de Temperatura
TM	Tomador de Muestra
TS	Interruptor de Temperatura
TSH	Interruptor por Alta Temperatura
	Válvula de Compuerta
	Válvula de Aguja
	Válvula de Globo
	Válvula de Angulo
	Disco de Ruptura
	Ventéo
	Dren
	

X

CONCLUSIONES

En México actualmente se producen 360,000.00 ⁽²⁾ toneladas al año de - toneladas al año de sosa a partir de cloruro de sodio por electrólisis, - lo que lleva a producir 319,500.00 toneladas al año de cloro, de las cuales sólo 304,000 toneladas se utilizan industrialmente cada año, teniendo se que importar 1,300 toneladas por año para cubrir la demanda nacional de este producto.

Lo anterior nos hace pensar en la necesidad de recuperar en su totalidad el cloro que se produce, para poder satisfacer la demanda, sin recurrir a importaciones. Por lo cual el proceso propuesto en este trabajo puede ayudar en cierta manera a reducir la importación de cloro.

El diseño se realizó con apoyo de estándares industriales, a los equipos que se consideraron claves (torre de secado, condensador y torre de - absorción) se les consideró un factor de seguridad de 10% para tratar de asegurar su eficiencia. Tanto el diseño hidráulico, de servicios auxiliares, así como el dimensionamiento de líneas se deja para posibles trabajos posteriores.

BIBLIOGRAFIA

1. Adams F.W., R.G. Edmonds: Absortion of chlorine by water in a packed tower, Industrial and Engineering Chemistry, Vo. 29, No. 4, April 1937.
2. Asociación Petroquímica Latinoamericana: Anuario petroquímico - latinoamericano, México 1984.
3. Calderon de Wachter R.: Diseño de una planta de refrigeración - para la licuefacción de cloro, Tesis, Escuela Nacional de Ciencias, U.N.A.M., México 1959.
4. Hallock D.: Quick method for centrifugal compresor estimates, - Elliott Co., Jeannette, Pa. 1974.
5. Hansen R.E.: Power calculations for non ideal gases, Elliott Co., Jeannette, Pa. 1973.
6. Ludwing E.E.: Applied process design for chemical and petrochemical plants, Vol. I y III, Gulf Publishing Company, Houston 1965.

7. Perry R.H., C.H. Chilton: Manual del ingeniero químico, 5° - Edición, McGraw-Hill, México 1973.
8. PPG's and Oronzio Denora's: Bipolar diaphragm electrolyser, New Glanor, Brochure 1973.
9. PPL Industries: Chlorine Handbook, 1969.
10. Sommers H.A.: The chlor, alkali industry, Chemical Engineering Progress, Vol. 61, No. 3, March 1985.
11. Treybal E.R.: Operaciones de transferencia de masa, 2° Edición, McGraw-Hill, México 1980.
12. Kapoor M.R., J.J. Martín: Thermodynamic properties of chlorine, Engineering Research Institute, University of Michigan, 1957.
13. Kern Q.D.: Procesos de transferencia de calor, 16° Edición, -- Continental S.A. de C.V., México 1982.