



Universidad Politécnica de Madrid

Tecnología Química Industrial

Tema 6. Álcalis y halógenos



*Escuela Técnica Superior de
Ingenieros Industriales de Madrid*

Prof. José Ignacio Zubizarreta Enríquez

Email: jizubi@etsii.upm.es.

Álcalis y cloro

- Los álcalis y el cloro constituyen un grupo de “commodities” que incluyen:
 - Na_2CO_3 o sosa Solvay (“soda ash”)
 - Cl_2 o cloro
 - NaOH o sosa cáustica
 - KOH o potasa cáustica
 - HCl o ácido muriático
- El cloro no puede almacenarse económicamente ni transportarse a largas distancias.
- El cloro y la sosa cáustica son coproductos de fabricación conjunta por electrólisis y la producción de sosa por esta vía se ve limitada por un consumo de cloro que es cada vez menor por razones medioambientales.

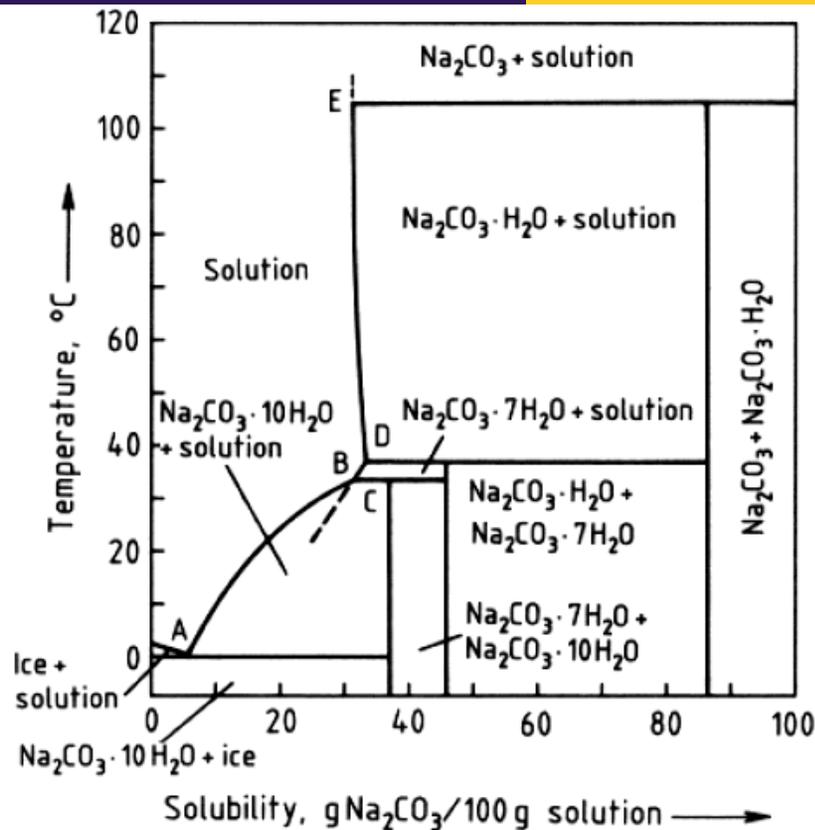
En el ranking de los 10 productos más comercializados del mundo.



Carbonato sódico o Sosa Solvay

- Undécimo producto más consumido en el mundo en el ranking de “commodities”
- Sólido blanco cristalino soluble en agua y muy alcalino
- Históricamente primero se fabricó industrialmente por el proceso Leblanc
- Especificaciones: NaCl: 1000-8000 ppm, Na₂SO₄: 200 ppm, Fe₂O₃: 20-80 ppm. Densidad aparente 0,59 kg/l
- Con cal (CaO) se hace reaccionar con una solución caliente (100 °C) de carbonato sódico produciendo sosa cáustica: $\text{CaO(s)} + \text{Na}_2\text{CO}_3(\text{ac}) \rightarrow \text{CaCO}_3(\text{s}) + \text{NaOH}(\text{ac})$ en una serie de tanques agitados con un rendimiento del 90% y con una calidad final del producto comparable al obtenido por vía electrolítica.
- Tiene un uso directo en la fabricación de vidrio y de lejías desinfectantes. Además a partir de Na₂CO₃ se puede obtener NaOH
- Actualmente el 75% se fabrica por el proceso Solvay y el resto se obtiene a partir de minerales naturales como el “trona”  (Na₂CO₃·NaHCO₃·2H₂O)



Solubilidad
del Na_2CO_3 

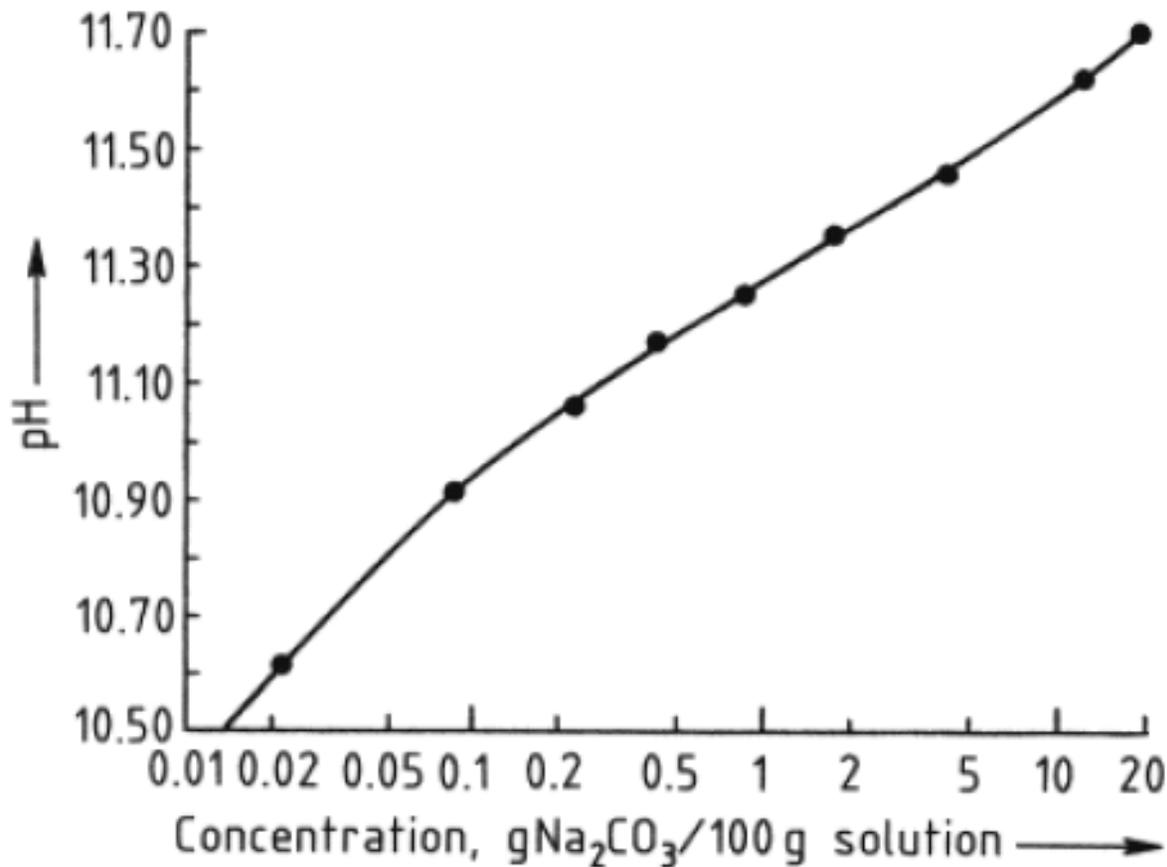
Solubilities in the system $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$ [1]

Temperatures and concentrations of the two-salt points and the cryohydric point

Two-salt point	$T, ^\circ\text{C}$	Solubility, g $\text{Na}_2\text{CO}_3/100$ g solution	Solid phases
A	-2.1	5.93	ice + $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
B	32.0	31.26	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
C	32.96	33.35	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (metastable)
D	35.37	33.21	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
E	105 ± 5	31.15	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{CO}_3$



pH de soluciones de Na_2CO_3 en agua



pH values of aqueous solutions of Na_2CO_3 at 25 °C [2]

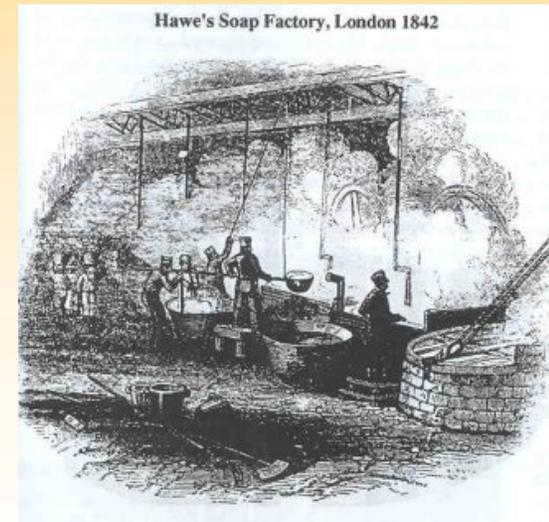


Fabricación de sosa

- En 1800 la única fuente natural de sosa era el kelp (alga marina). Se importaba álcali, de América en la forma de cenizas de madera (potasa) o de España a través de cenizas de la planta “barrilla” (una planta que contiene el 25% de álcali) o de mineral de sosa en Egipto, todo muy costoso debido a los altos costes de transporte.

Se necesitaba un proceso industrial de fabricación

- Basado en la obtención industrial de H_2SO_4
- **Proceso Leblanc (1810):- A partir de sal común con sulfúrico:**
- $2NaCl + H_2SO_4 \rightarrow Na_2SO_4 + 2HCl$
- $Na_2SO_4 + CaCO_3 + 2C \rightarrow Na_2CO_3 + CaS + 2CO_2$
- ***NaOH se obtuvo a partir del carbonato sódico:***
- $Na_2CO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow 2NaOH + CaCO_3$



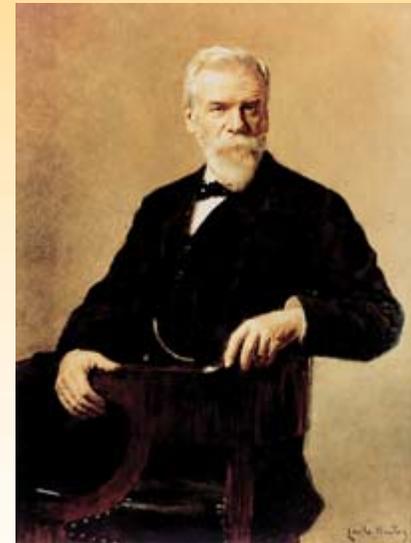
Contaminación

- El HCl era el problema principal.
- Pero también había un residuo maloliente ($\text{CaS} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{S} + \text{Ca}(\text{OH})_2$)
- Los humos eran tan densos que la visibilidad en el entorno de la planta era <90 m.
- **Se hizo una petición a la corona de Inglaterra contra el Proceso Le Blanc en 1839**
- *"the gas from these manufactories is of such a deleterious nature as to blight everything within its influence, and is alike baneful to health and property. The herbage of the fields in their vicinity is scorched, the gardens neither yield fruit nor vegetables; many flourishing trees have lately become rotten naked sticks. Cattle and poultry droop and pine away. It tarnishes the furniture in our houses, and when we are exposed to it, which is of frequent occurrence, we are afflicted with coughs and pains in the head...all of which we attribute to the Alkali works."*
- Esto condujo a la Ley del Alkali "*Alkali Act*" en 1863, primera legislación en el mundo destinada a limitar la contaminación atmosférica.



El proceso Solvay

- En 1863 Solvay presentó y patentó su elegante y técnico método de obtener Na_2CO_3 a partir de NaCl , CO_2 y NH_3 inaugurando una planta de la sociedad Solvay & Co fundada por él y sus familiares obteniendo 300 kg/día.
- En 1872 vendió su proceso en Inglaterra a la sociedad denominada Brunner-Mond (germen de la actual empresa Imperial Chemical Industries, ICI) introduciendo en la empresa el proceso Solvay que fue sustituyendo poco a poco a las antiguas plantas Leblanc.
- En 1880 fundó Solvay la primera fábrica en Alemania.
- En los años 1920 se pararon ya las últimas plantas del proceso Leblanc cambiándose todas al proceso Solvay



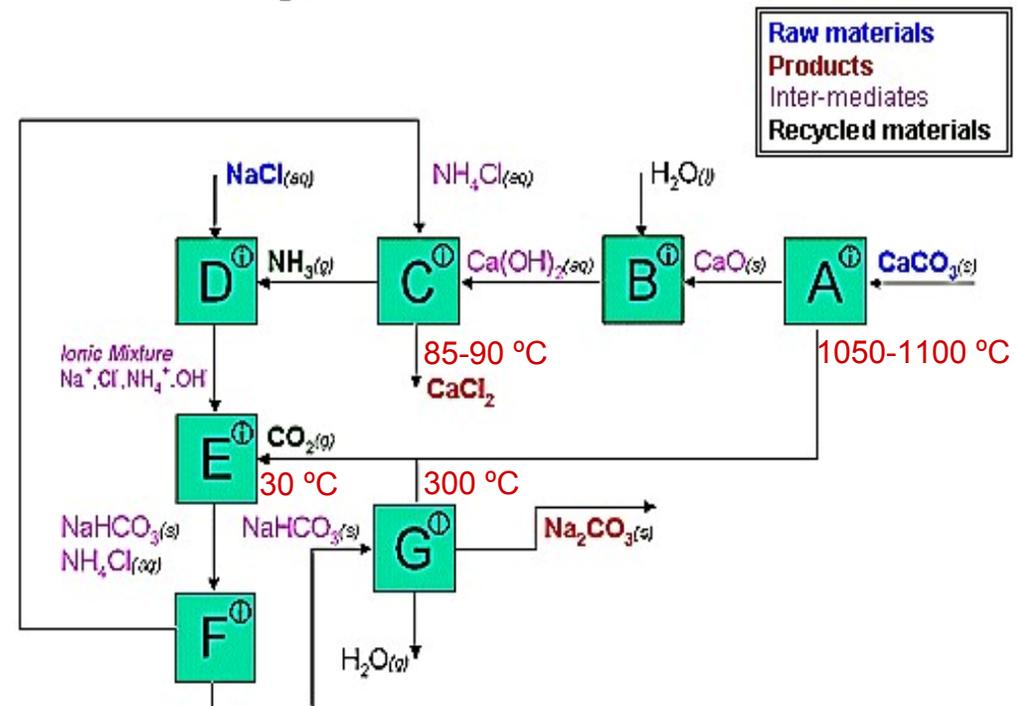
Ernest Solvay 1838-1922



Diagrama del proceso Solvay

- Ventajas del proceso Solvay:
 - No usaba ácidos,
 - Menos residuos (bajo volumen de CaCl_2 contra alto volumen de CaS/CaSO_4),
 - CO_2/NH_3 recuperados,
 - Costes un 70% menores.
- Desventajas del proceso Solvay
 - El coste de inversión de la planta era mayor
- En 1890 el proceso Solvay tenía el 90% del mercado mundial de la sosa.

The Solvay Process Process Flow Diagram

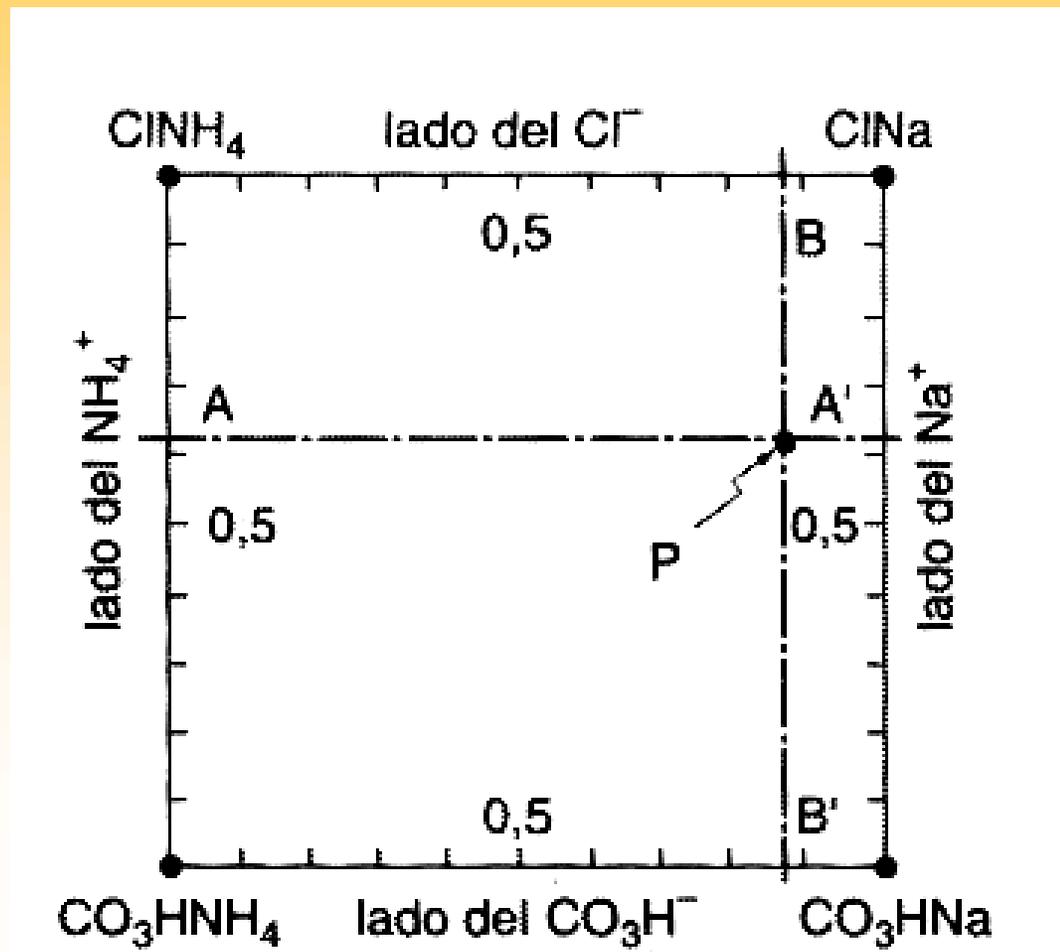


Química del proceso Solvay

- El proceso se basa en que el **bicarbonato sódico es insoluble en solución acuosa alcalina, usando, para obtener el pH básico, amoníaco.**
- $\text{CO}_2(g) + \text{H}_2\text{O}(l) + \text{NH}_3(g) + \text{Na}^+(ac) \rightarrow \text{NaHCO}_3(s) + \text{NH}_4^+(ac)$ a 30°C (1)
- $\text{NaHCO}_3(s) \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3(s) + \text{CO}_2(g) + \text{H}_2\text{O}(g)$ at 300°C (2)
- El CO_2 puede reciclarse y el NH_3 se recupera. Se requiere mantener un exceso de amoníaco para estar seguros que la mezcla de sales permanezca no-ácida (es decir que se evite la formación de HCl que convertiría todo el carbonato a CO_2)
- $\text{NH}_4\text{Cl}(ac) + \text{Ca}(\text{OH})_2(ac) \rightarrow \text{CaCl}_2(ac) + 2\text{NH}_3(g) + 2\text{H}_2\text{O}$ (3)
- Esta reacción se realiza a unos $85\text{-}90^\circ\text{C}$
- La reacción Solvay se lleva a cabo pasando la salmuera concentrada por dos torres. En la primera, borboteando el amoníaco a través de la solución en donde se absorbe. En la segunda, se borbotea CO_2 por la solución amoniacal y se precipita el bicarbonato sódico que es insoluble. El CO_2 para esta etapa se produce calentando a 900°C carbonato cálcico o caliza.



Diagrama de Jänecke para los pares $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ y $\text{Na}^+/\text{NH}_4^+$



Isoterma de 30 °C. Diagrama de Jänecke

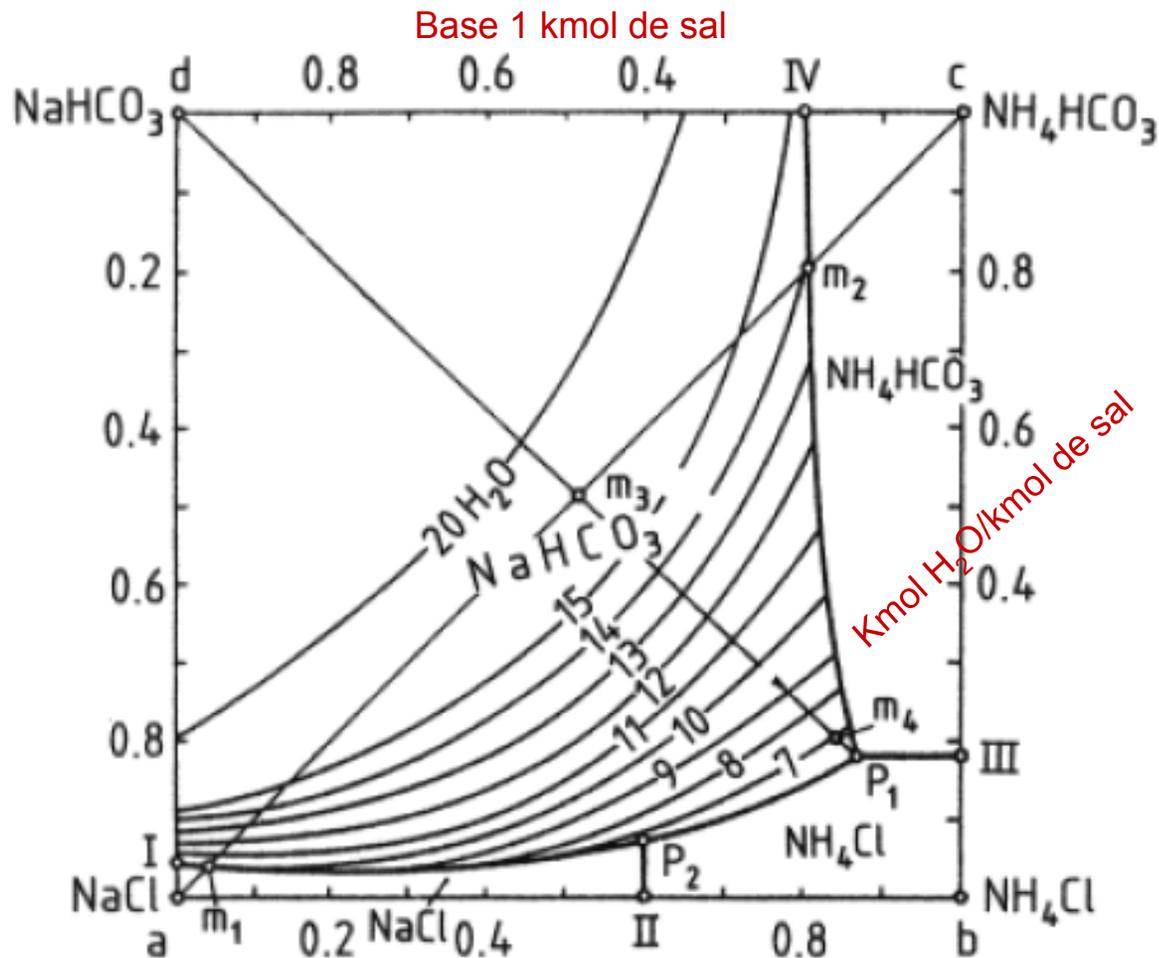
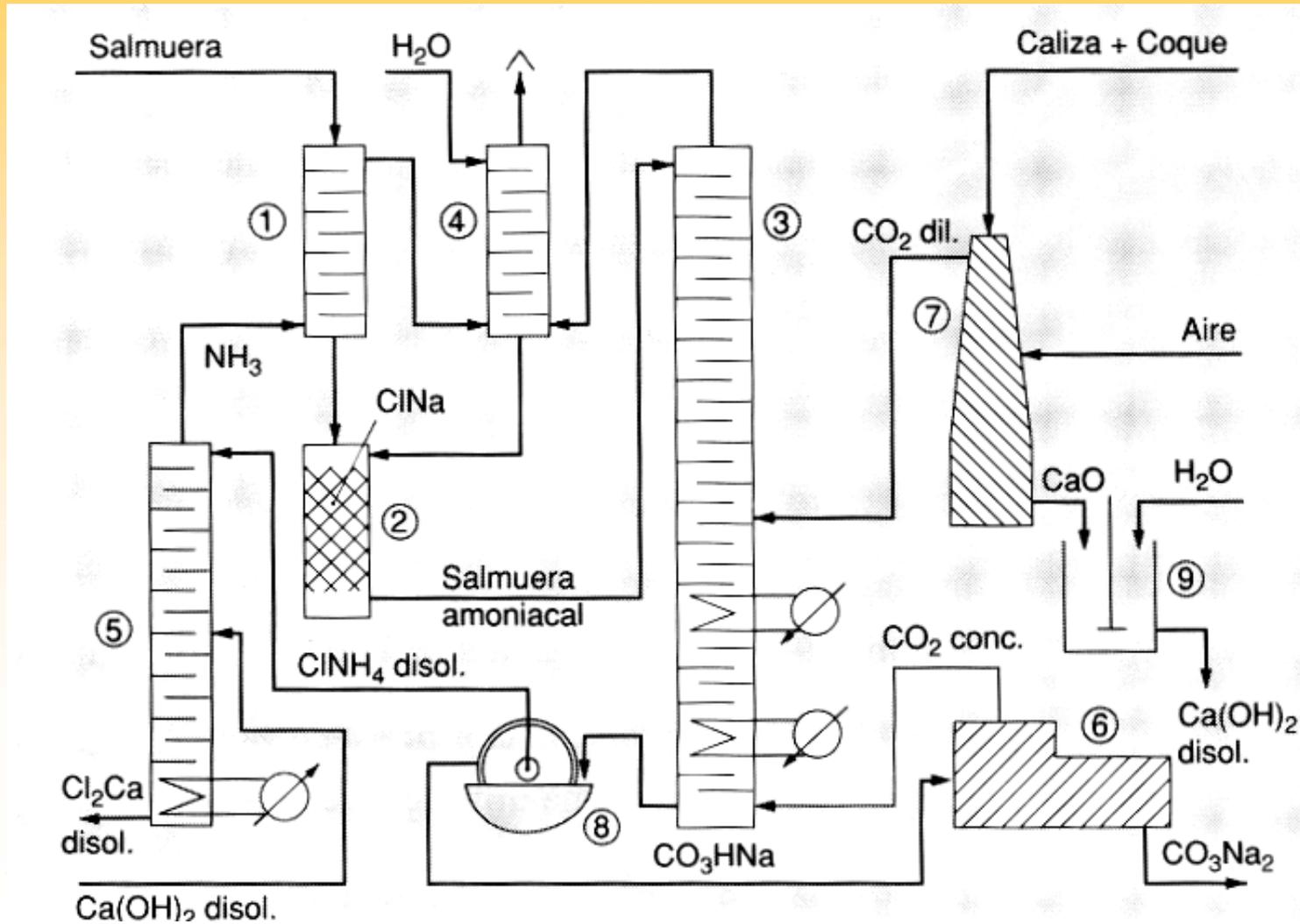
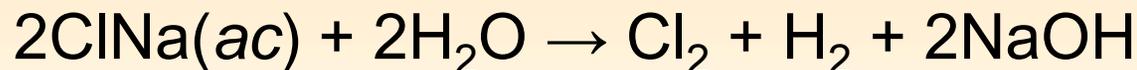


Diagrama esquemático del proceso de fabricación



Cloro y Sosa cáustica

- El cloro y la sosa son las commodities 8ª y 9ª de consumo mundial.
- Se producen por vía electroquímica, simultáneamente, a partir de una solución purificada de salmuera obteniéndose también hidrógeno.

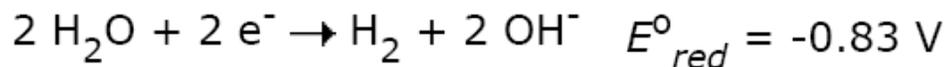


- Las necesidades mínimas de energía son muy elevadas: 1,681 MWh/(t Cl₂ + 1,128 t NaOH)
- Los rendimientos de corriente y de voltaje, junto a la resistencia del baño aumentan todavía más el consumo necesario de energía: 2,5 - 3 MWh/t Cl₂



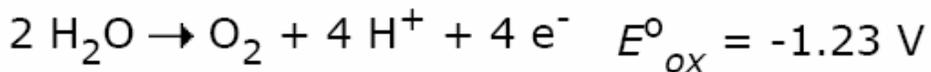
El proceso de electrolisis del NaCl disuelto en agua

- En el cátodo son posibles:



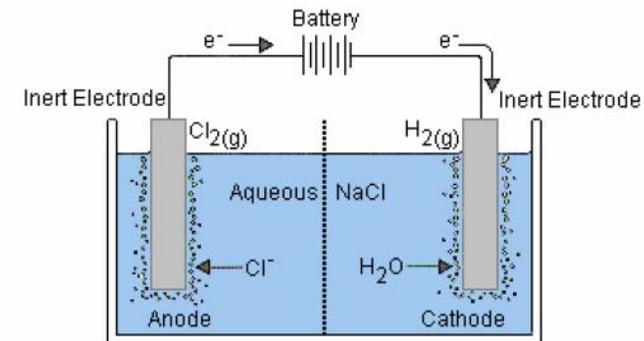
- Como es más fácil reducir el agua que los iones Na^+ **se produce hidrógeno**.

- En el ánodo son posibles:



Eligiendo el voltaje adecuadamente y el electrodo, se puede producir **únicamente cloro**

- Ambas son posibles pero existe un fenómeno que es el sobrevoltaje que para el caso del agua formando O_2 puede llegar a 1 V más.



Sosa cáustica o NaOH

El hidróxido del sodio (NaOH) es un sólido cristalino blanco, corrosivo, que absorbe fácilmente la humedad hasta que se licúa formando una solución alcalina. La sosa cáustica comúnmente llamada, lejía de sosa, es el hidróxido de sodio, el álcali industrial más extensamente utilizado, a veces combinado con cloro formando hipoclorito sódico. Es altamente corrosivo a los tejidos animal y vegetal. Las soluciones alcalinas cuando está disuelto en agua neutralizan los ácidos en varios procesos comerciales:

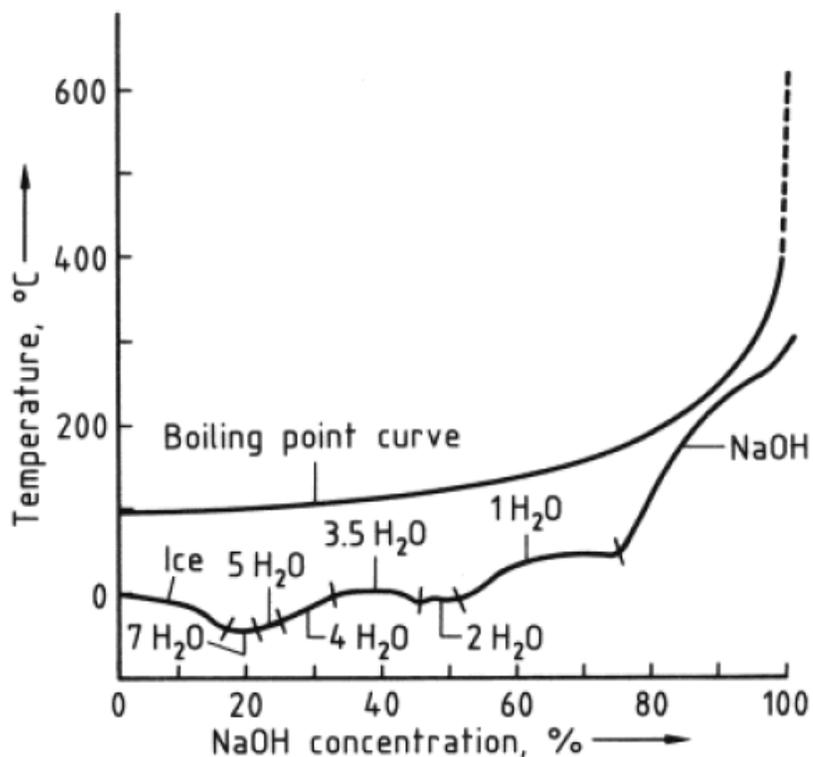


Usos del NaOH

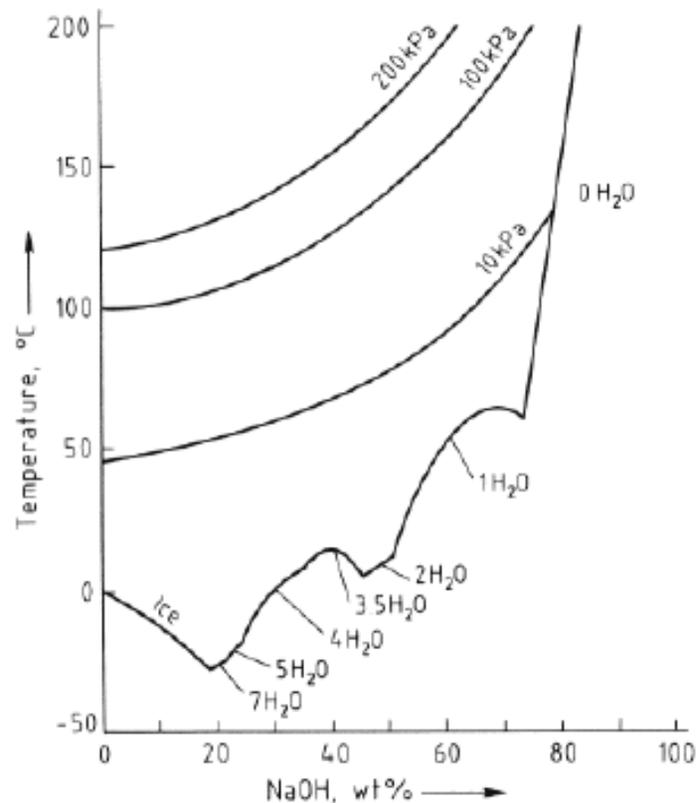
- En la refinación del petróleo, neutraliza los ácidos sulfúricos y orgánicos
- En la elaboración del jabón, reacciona con los ácidos grasos saponificándolos y produciendo como subproducto glicerina.
- Sus soluciones alcalinas se usan en el tratamiento de la celulosa en la industria pastero-papelera y en la fabricación de muchos productos químicos.
- Se comercializa sobre todo en solución acuosa del 50% en peso, que permite su uso y dosificación en muchos procesos sin necesidad de evaporar todo el agua.
- Los tanques de NaOH 50%, son de acero al carbono, generalmente aislados para evitar la cristalización del NaOH a temperaturas bajo cero.



Propiedades físicas del NaOH. Sistema NaOH-H₂O



The NaOH-H₂O system



Historia del cloro

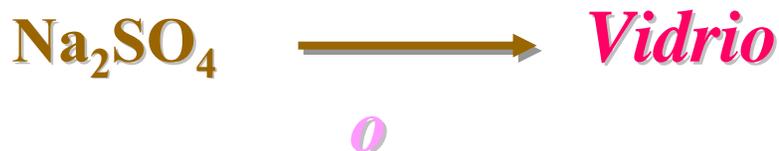
Descubrimiento del Cloro - C.W. Scheele - 1774



Scheele también descubrió las características de blanqueo del Cl_2 lo que condujo a una fuerte demanda del mercado textil para el $\text{Cl}_2 + \text{NaOH}$. Esto también significó un método económicamente viable para recuperar HCl a partir del efluente del proceso Leblanc en la fabricación de carbonato sódico.



Proceso Leblanc:



Procesos Electrolíticos :

Cruikshank (1800) – *Describió por primera vez la electrólisis de la salmuera.*

Faraday (1834) – *Enunció las Leyes de la Electrólisis.*

Primera planta de electrólisis de salmuera (1891) -
Era un proceso discontinuo o batch.

Primera planta de electrólisis con proceso continuo (1893)
Se añade sal (NaCl) en continuo y se extraen NaOH and Cl₂ también en continuo consumiéndose energía eléctrica.



Sal común - NaCl



Producción de cloro-sosa

- La sal común es la materia prima de partida.
- Es un recurso natural prácticamente ilimitado
 - De yacimientos mineros de sal
 - A partir del agua de mar (por evaporación) en salinas
- Resulta necesario la purificación del NaCl para eliminar las impurezas presentes de otros cationes y aniones.

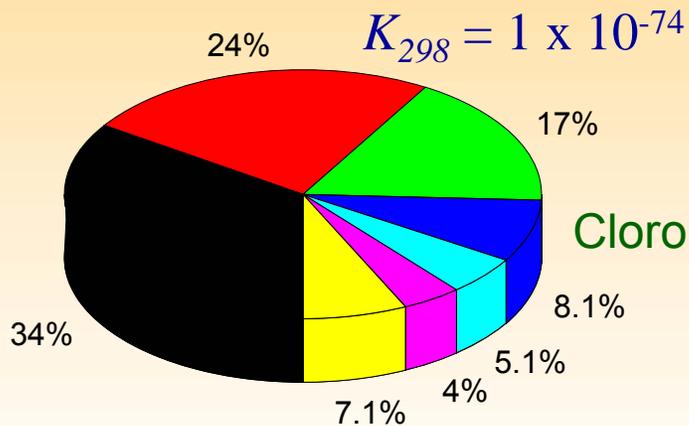


Preparación de la sal

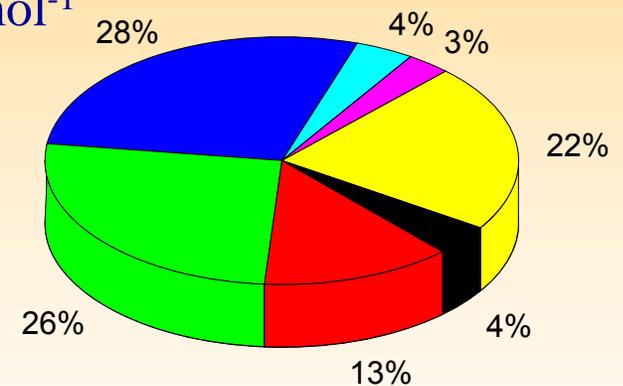
- El cloruro de sodio está disponible bajo la forma de sal sólida, obtenida por minería o evaporando el agua de mar. Está también disponible como líquido por solución de masas de sal. La sal tiene concentraciones variables de impurezas, que se deben quitar para operar las pilas electrolíticas con una intensidad de corriente eficiente. Las impurezas principales son calcio, magnesio, y sulfatos. Las otras impurezas de menor importancia, que son indeseables, dependiendo del tipo de proceso seleccionado. La salmuera o la sal sólida disuelta en un disolvedor de sal se trata en un reactor con carbonato de sodio y soda cáustica para precipitar el carbonato de calcio y el hidróxido de magnesio. Estos precipitados se separan en un sedimentador. El efluente de fondo que lleva sólidos, o se filtra o se agrega junto con el resto del efluente líquido de la planta para su tratamiento externo. Los precipitados de carbonato cálcico son pesados, y arrastran conjuntamente los hidróxidos de aluminio, de magnesio, de estroncio, etc. El sobrenadante del decantador, que lleva ~10-50 partes por millón de sólidos en suspensión, se filtra. Para las células de mercurio y de diafragma, esta salmuera filtrada es adecuada, y se puede alimentar a los electrolizadores.
- En todos los procesos, la salmuera filtrada se calienta y se pasa a través de un lecho de sal en un [saturador](#) para aumentar su concentración en sal antes de alimentarla a los electrolizadores. En algunas plantas, la alimentación de la salmuera [se acidifica](#) para mejorar la [eficacia de la corriente](#) en la célula. La acidificación reduce la [alcalinidad](#), que reaccionaría en otro caso con el cloro en el compartimiento del ánodo formando clorato.
- Las especificaciones de la salmuera en el proceso de células de membrana son más rigurosas que la de los procesos de mercurio y de diafragma, y las impurezas están en partes-por-mil millones. Esto se logra filtrando la salmuera en un tipo filtro secundario de pre-capas. A continuación [una resina de intercambio iónico](#) se utiliza para quitar el calcio, el magnesio, el bario, y las impurezas de hierro. También es posible quitar el aluminio por intercambio iónico. A menudo, el aluminio y la sílice se retiran agregando cloruro de magnesio a la salmuera que sale del disolvedor de sal.
- La salmuera agotada de los procesos de células de membrana y de mercurio llevan cloro disuelto. Esta salmuera [se acidifica](#) para reducir la solubilidad del cloro, y después se elimina el cloro en un desclorador de la salmuera al vacío. La salmuera sin cloro se devuelve a los pozos de salmuera de la explotación minera por solución o al disolvedor de sal.

Cloro y Sosa cáustica. Aplicaciones

El Cloro (Cl_2) y la Sosa se producen en el mismo proceso, por electrólisis de la sal común en solución acuosa.



Hidróxido sódico



- PVC
- Isocianatos/oxigenatos
- Productos químicos
- Clorometanos
- Epiclorohidrina
- Disolventes
- Otros

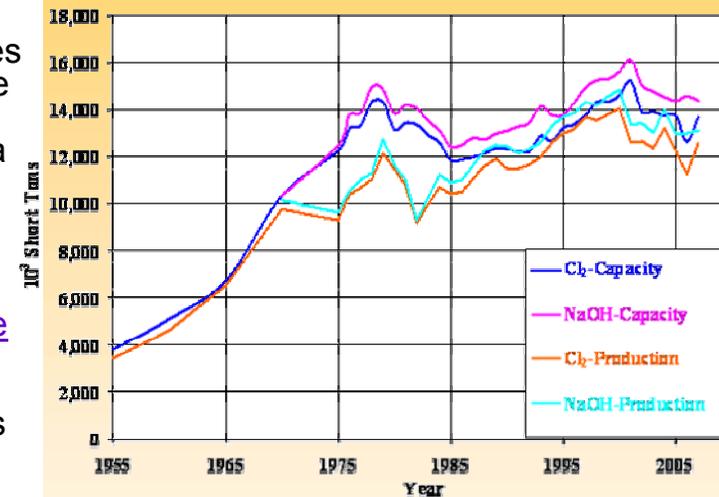
- Jabones y detergentes
- Industria de la pasta y papel
- Productos químicos inorgánicos
- Productos químicos orgánicos
- Tratamiento de aguas
- Fabricación de Aluminio
- Otros

Email: jizubi@etsii.upm.es



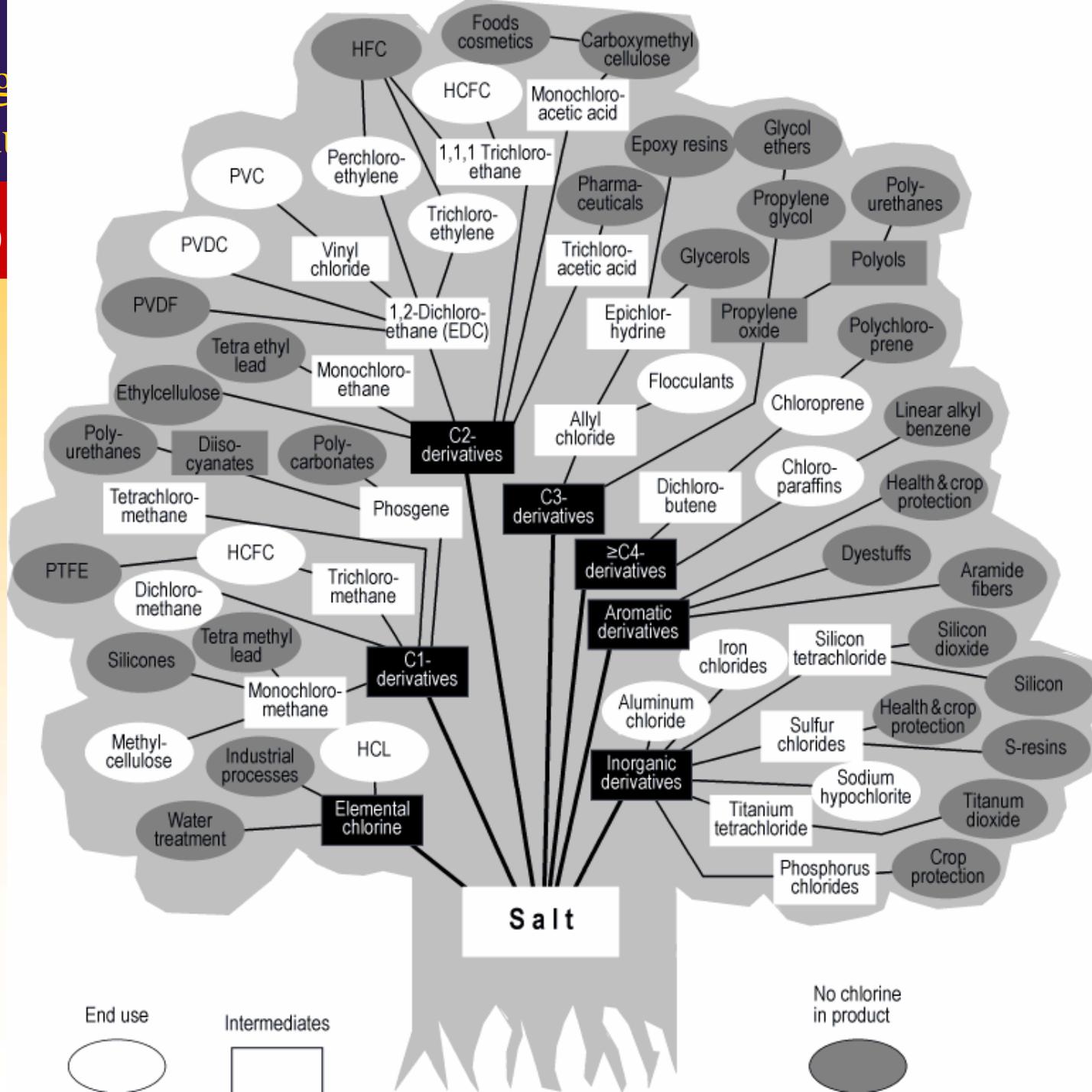
La industria de fabricación de Cl_2/NaOH

- La industria de cloro-sosa es una de las tecnologías electroquímicas más grandes del mundo. Es un proceso intensivo en energía y es el segundo consumidor más grande de electricidad (2400 miles de millones de **kWH**) entre las industrias electrolíticas. En 2006, el cerca del 84% de la capacidad total de cloro en el mundo de cerca de 59 millones de **toneladas** se produjeron electrolíticamente usando células de diafragma y de membrana, mientras que cerca del 13% fueron hechos usando células de mercurio
- El cloro se produce por **electrólisis de la** solución del cloruro de sodio (sal común), a menudo llamada "salmuera". Así, cuando el cloruro de sodio se disuelve en agua, se **disocia** en **cationes de sodio** y **aniones de cloruro**. Los iones de cloruro **se oxidan** en el **ánodo** para formar gas de cloro y las **moléculas de agua se reducen** en el **cátodo** a aniones de oxidrilo y al gas hidrógeno. Los iones de sodio en la solución y los iones del oxidrilo producidos en el cátodo constituyen los componentes del hidróxido del sodio que se forma durante la electrólisis del cloruro de sodio.
- Se produce cloro por electrólisis usando tres tipos de celdas electrolíticas. La diferencia principal en estas tecnologías reside en la manera por la cual el gas de cloro y el hidróxido del sodio se evita que se mezclen para asegurar la obtención de productos puros. Así, en células del diafragma, la salmuera del compartimiento del ánodo atraviesa el **separador pasando al** compartimiento del cátodo, el material del separador que es asbesto o compuesto de polímero-modificado depositado en asbesto. En células de la membrana, por otra parte, una **membrana de intercambio iónico** se utiliza como separador. La separación de Anolito-catolito se alcanza en las células del diafragma y de la membrana usando separadores y las membranas de intercambio iónico, respectivamente, mientras que las células del mercurio no contienen ningún diafragma o membrana y el mercurio por sí mismo actúa como separador. **El ánodo** en todas las tecnologías es de titanio metal recubierto con una capa **electro catalítica de** óxidos mezclados. Todas las células modernas (desde los años 70) utilizan estos "ánodos dimensionalmente estables" (DSA). Las células antiguas utilizaron ánodos basados en **carbón**. **El cátodo** es típicamente de acero en células del diafragma, níquel en células de membrana, y mercurio en células de mercurio.

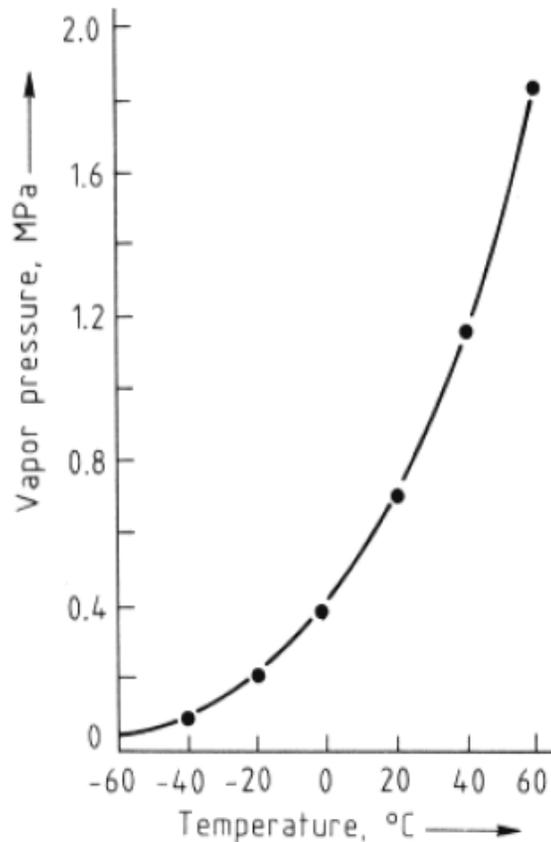


Tecnología Industrial

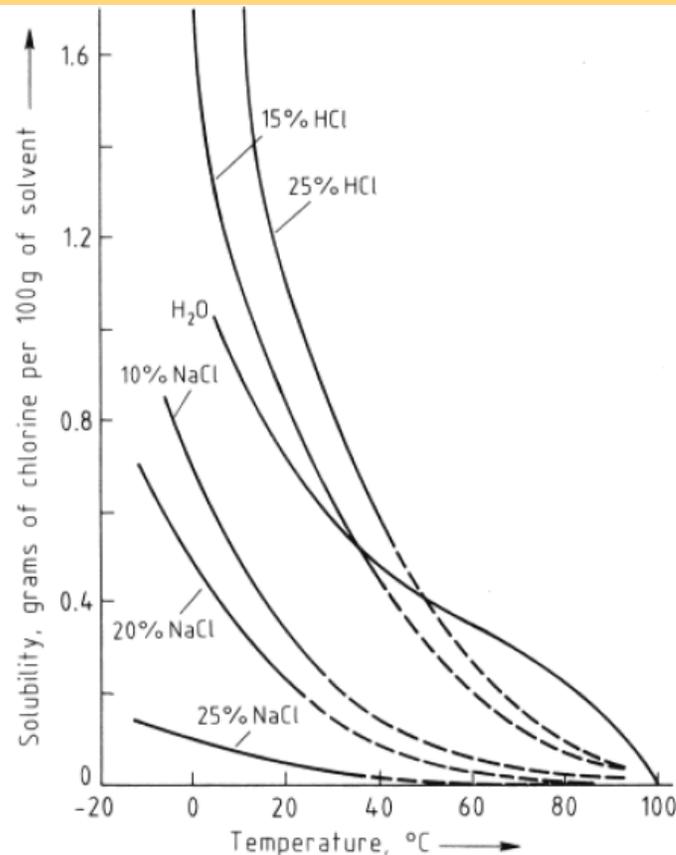
Usos del cloro



Propiedades físicas del cloro



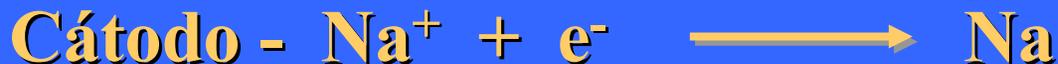
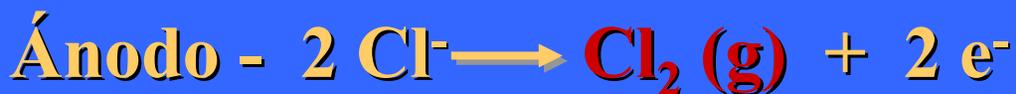
Vapor pressure of liquid chlorine



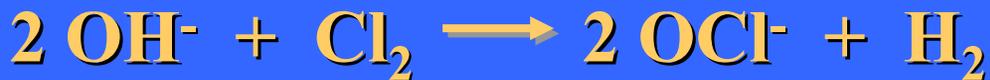
Solubility of chlorine in water, hydrochloric acid (two concentrations), and sodium chloride solutions (three concentrations)

All percentages are weight percents.

Reacciones de la Electrólisis :



Reacciones colaterales:

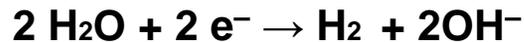


Proceso de electrólisis

- La conversión de la solución de NaCl a Cl₂ y a NaOH se realiza en tres tipos de celdas electrolíticas: la celda de diafragma, la celda de membrana, y la celda de mercurio.
- La característica que distingue a estas celdas es la manera por la que los productos de la electrólisis se evita que se mezclen unos con otros, asegurando así unos productos finales con la pureza requerida.
- Las reacciones electroquímicas son por un lado la descarga de los iones cloruro, Cl⁻, en el ánodo,



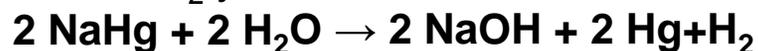
- y la generación de hidrógeno, H₂, y de iones hidróxilo, OH⁻, en el cátodo.



- El cloro se produce en el ánodo en cada uno de los tres tipos de celdas electrolíticas. La reacción catódica en células del diafragma y de membrana es la electrólisis del agua para generar H₂ según lo indicado, mientras que la reacción catódica en células del mercurio es la descarga del ión sodio, Na⁺, para formar la amalgama diluída de sodio en mercurio.



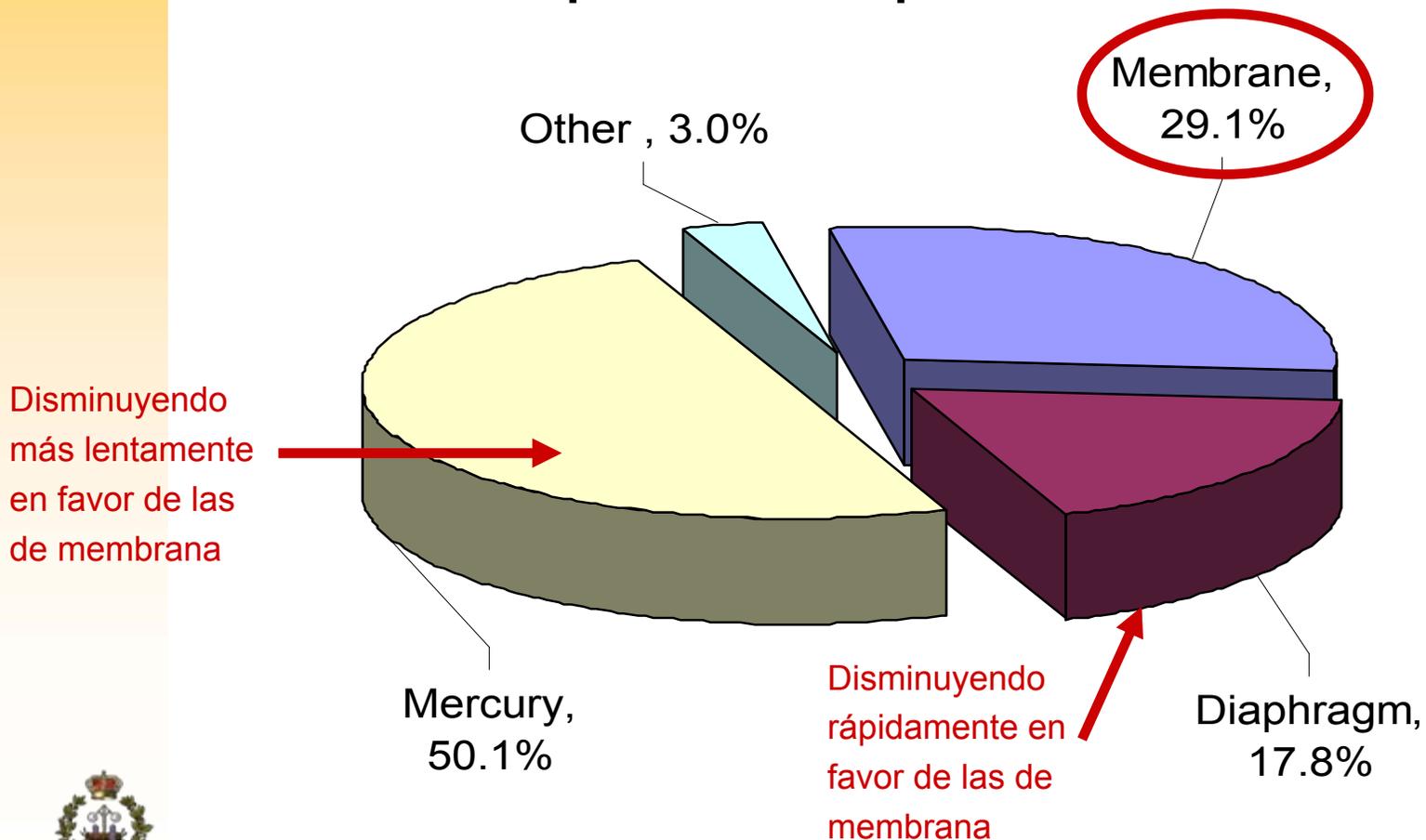
- Esta amalgama entonces reacciona por separado con H₂O en un reactor descomponedor formando los productos H₂ y NaOH.



- La separación de los productos del ánodo y del cátodo en células del diafragma se produce usando asbesto como diafragma separador

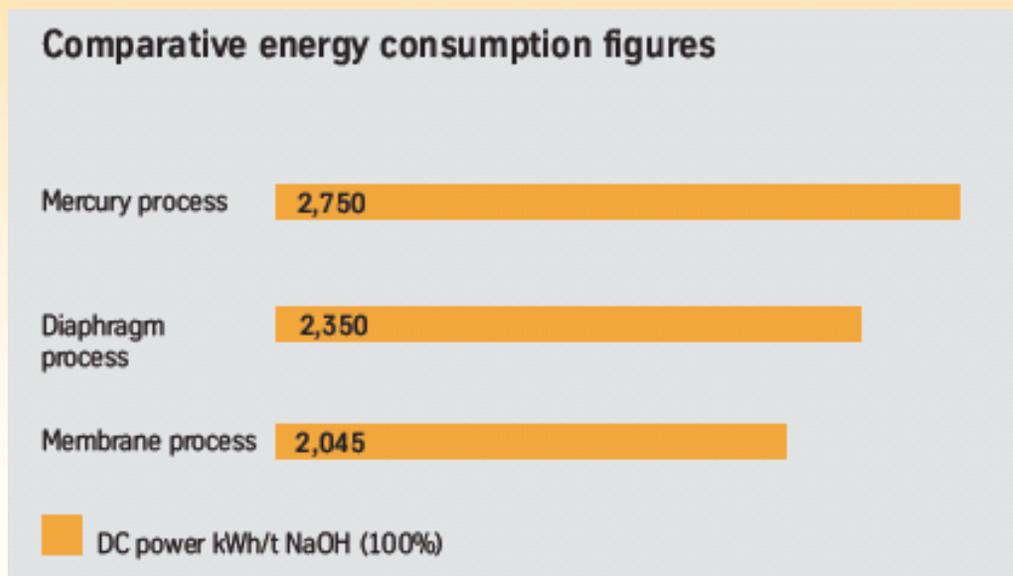
Tres rutas para la producción de Cloro-Sosa - 2004

Repartition of capacities 2004



Energía necesaria para producir Cloro-Sosa

- La energía necesaria es un 50% de los costes totales de fabricación



Tecnologías para la producción de cloro/sosa

- Proceso con Membranas:
<http://www.eurochlor.org/animations/membrane-cell.asp>
- Proceso con Diafragmas:
<http://www.eurochlor.org/animations/diaphragm-cell.asp>
- Proceso con Mercurio:
<http://www.eurochlor.org/animations/mercury-cell.asp>

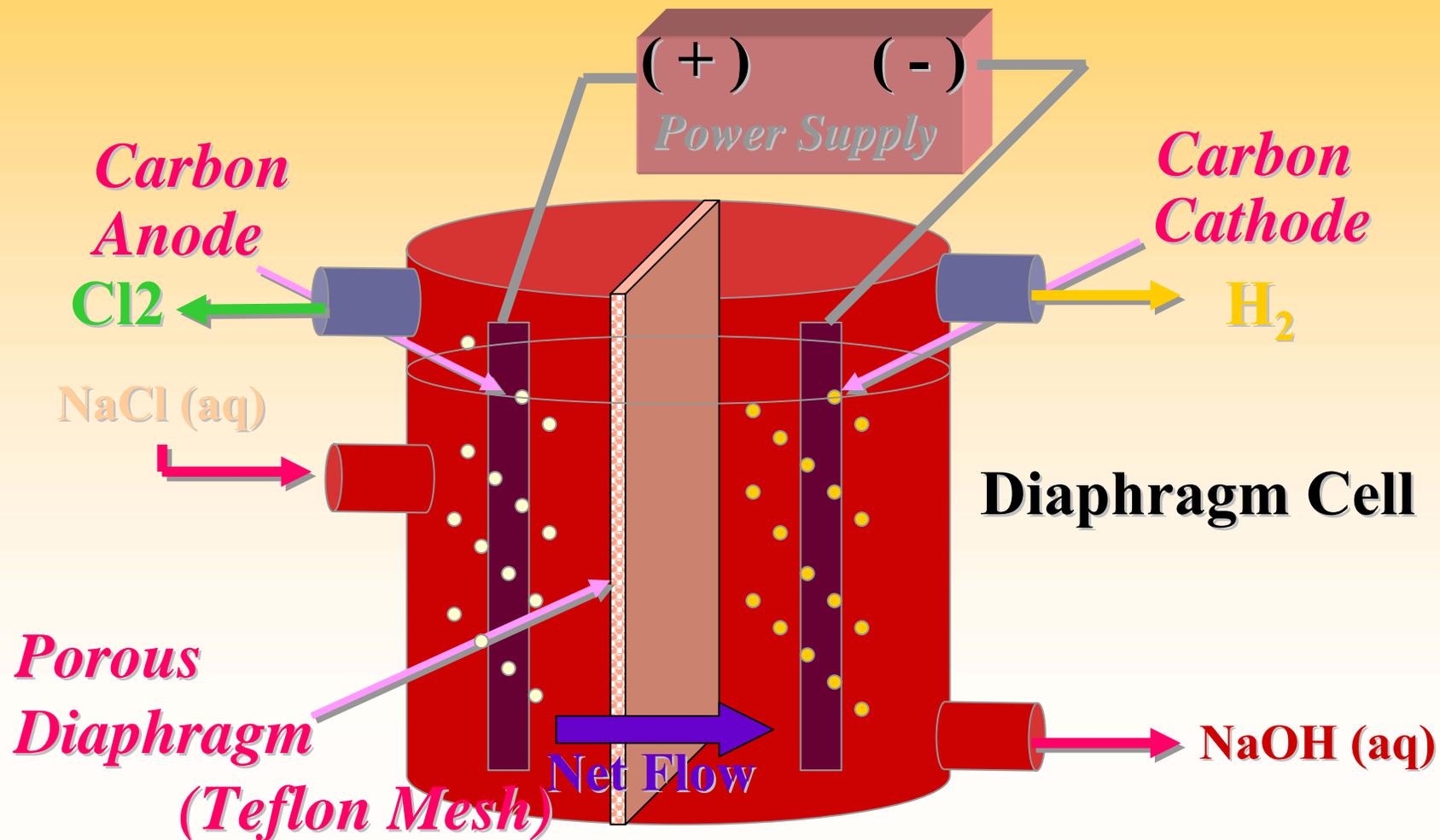


Procesos electrolíticos. Proceso con diafragmas

- En el proceso de células de diafragma el área del ánodo está separada del área del cátodo por un diafragma permeable.
- La salmuera se introduce en el compartimiento del ánodo y atraviesa el diafragma hacia el compartimiento del cátodo.
- Una salmuera cáustica diluida sale de la célula.
- La sosa cáustica se debe concentrar generalmente hasta el 50% y la sal se precipita y retira.
- Se hace esto usando un proceso evaporativo con cerca de tres toneladas de vapor por tonelada de soda cáustica.
- La sal separada de la salmuera cáustica se puede utilizar para resaturar la salmuera diluida.
- El cloro contiene el oxígeno y se debe purificar por licuefacción y evaporación.



Producción Industrial

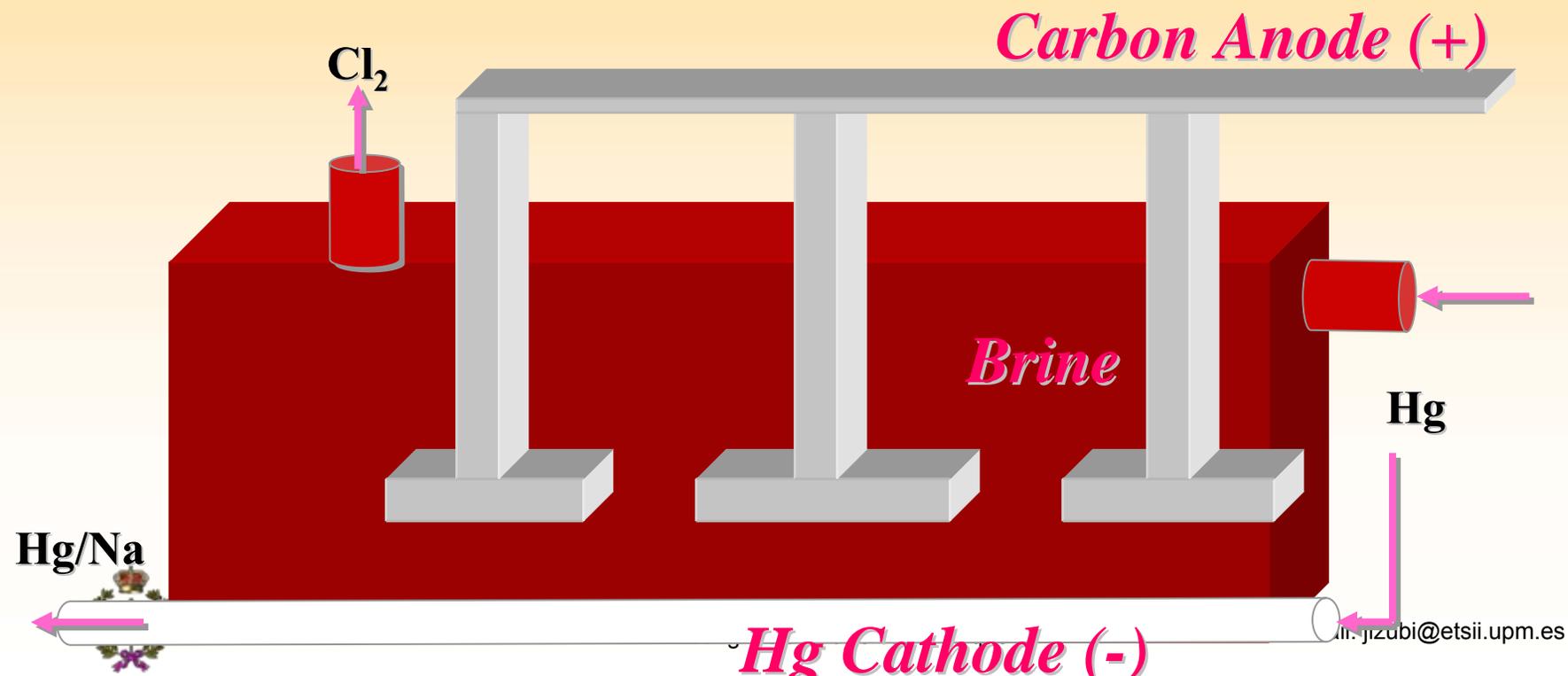
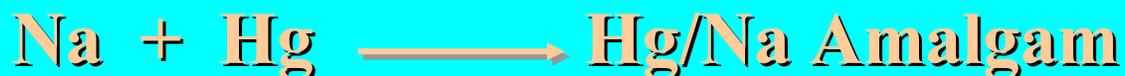


Células de Diafragma



Pureza aceptable para la mayoría de usos industriales. El producto no se purifica más, ni se concentra debido al costo de la energía requerida para continuar la evaporación. Es más barato transportar la solución.

Células de cátodo de Mercurio



Procesos electrolíticos. Proceso con cátodo de mercurio

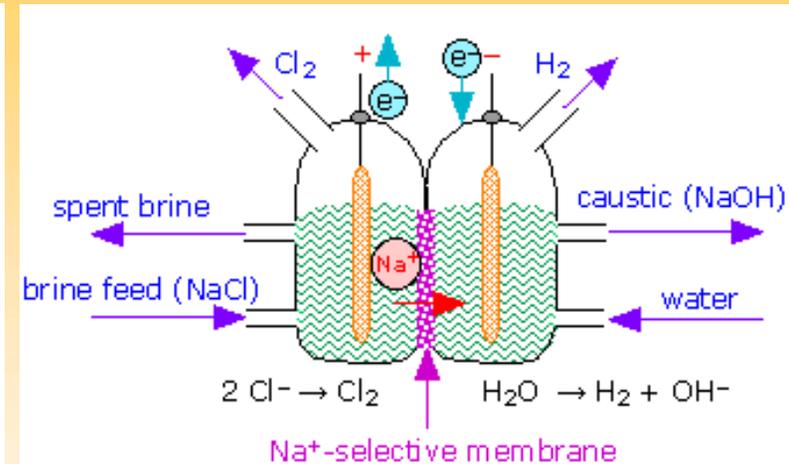
- En el proceso de células de mercurio, el sodio forma una amalgama con el mercurio en el cátodo. La amalgama reacciona con el agua en un reactor separado llamado el descomponedor donde se produce hidrógeno gaseoso y la solución de sosa cáustica del 50%.
- Mientras que la salmuera se recircula, se añade en continuo sal sólida para mantener la saturación de la salmuera. La salmuera primero se elimina el cloro y a continuación se purifica mediante un proceso de precipitación-filtración.
- Los productos finales son extremadamente puros. El cloro, junto con un poco de oxígeno, se puede utilizar generalmente sin mayor purificación adicional.
- De los tres procesos, el proceso del mercurio es el que utiliza un mayor consumo de electricidad, pero no se requiere vapor para concentrar la solución cáustica. El uso del mercurio exige medidas para prevenir la contaminación del medio ambiente. También, el mercurio se debe separar de la solución, del gas de hidrógeno, y de la soda cáustica.
- En 2004, las emisiones para todas las células del mercurio de Europa occidental alcanzaron un punto bajo absoluto de 1.01 gramos por tonelada de capacidad de cloro.
- Las plantas de mercurio tendrán que cerrar o ser convertidas voluntariamente a otras tecnologías sin mercurio (p.ej. Membranas) antes de 2020 con un coste de 3.000 millones de EUROS. Estas plantas son casi el 50% (6.000.000 toneladas) de la capacidad anual de la unión europea en cloro.

Mercury cell room



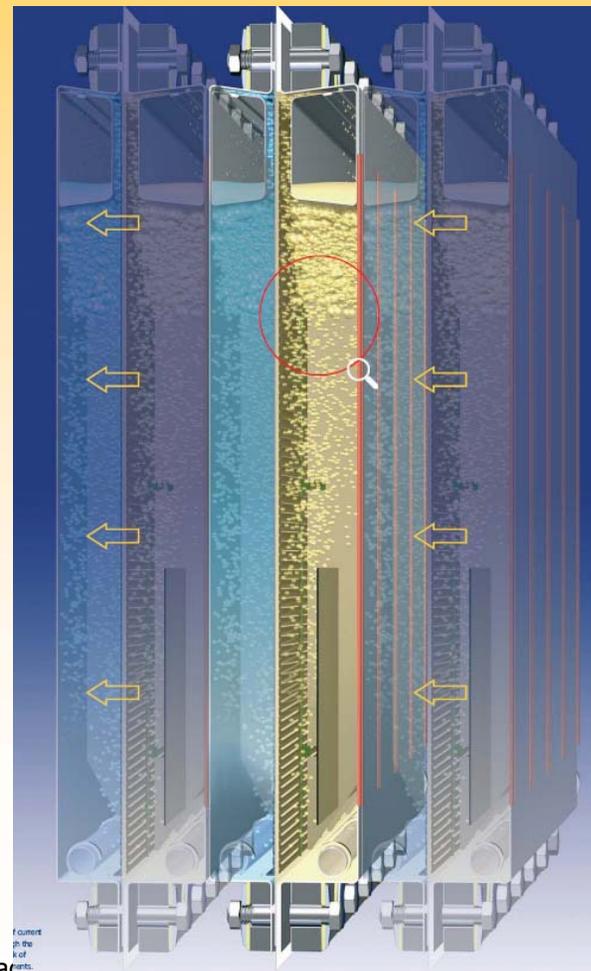
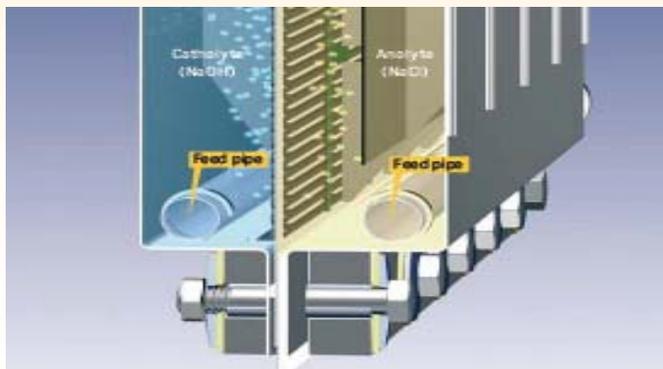
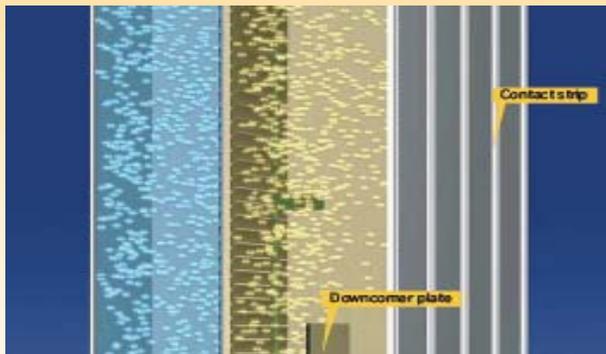
Procesos electrolíticos. Proceso con membranas

- El ánodo y el cátodo están separados por una membrana de intercambio iónico. Solamente los iones del sodio y un poca agua pasan a través de la membrana.
- Se desprende y elimina el cloro y se recircula la salmuera. Se añade en continuo sal sólida necesaria para re-saturar la salmuera. Después de una purificación por precipitación-filtración, la salmuera se purifica más a fondo con el paso a través de resinas de intercambio iónico.
- La solución cáustica deja la célula con una concentración de cerca del 30% y, ulteriormente en el proceso, se concentra generalmente hasta el 50%. El cloro gaseoso obtenido contiene un poco de oxígeno y se debe purificar a menudo por licuefacción y evaporación.
- El consumo de energía eléctrica es la más baja de los tres procesos y la cantidad de vapor necesaria para la concentración de la sosa cáustica es relativamente pequeña (menos de una tonelada por tonelada de sosa cáustica).



- Los productores de cloro en Europa se están moviendo progresivamente hacia este método de producción pues el proceso de células de membrana es la forma medioambientalmente más respetuosa de fabricar cloro-sosa.

Elementos de membranas



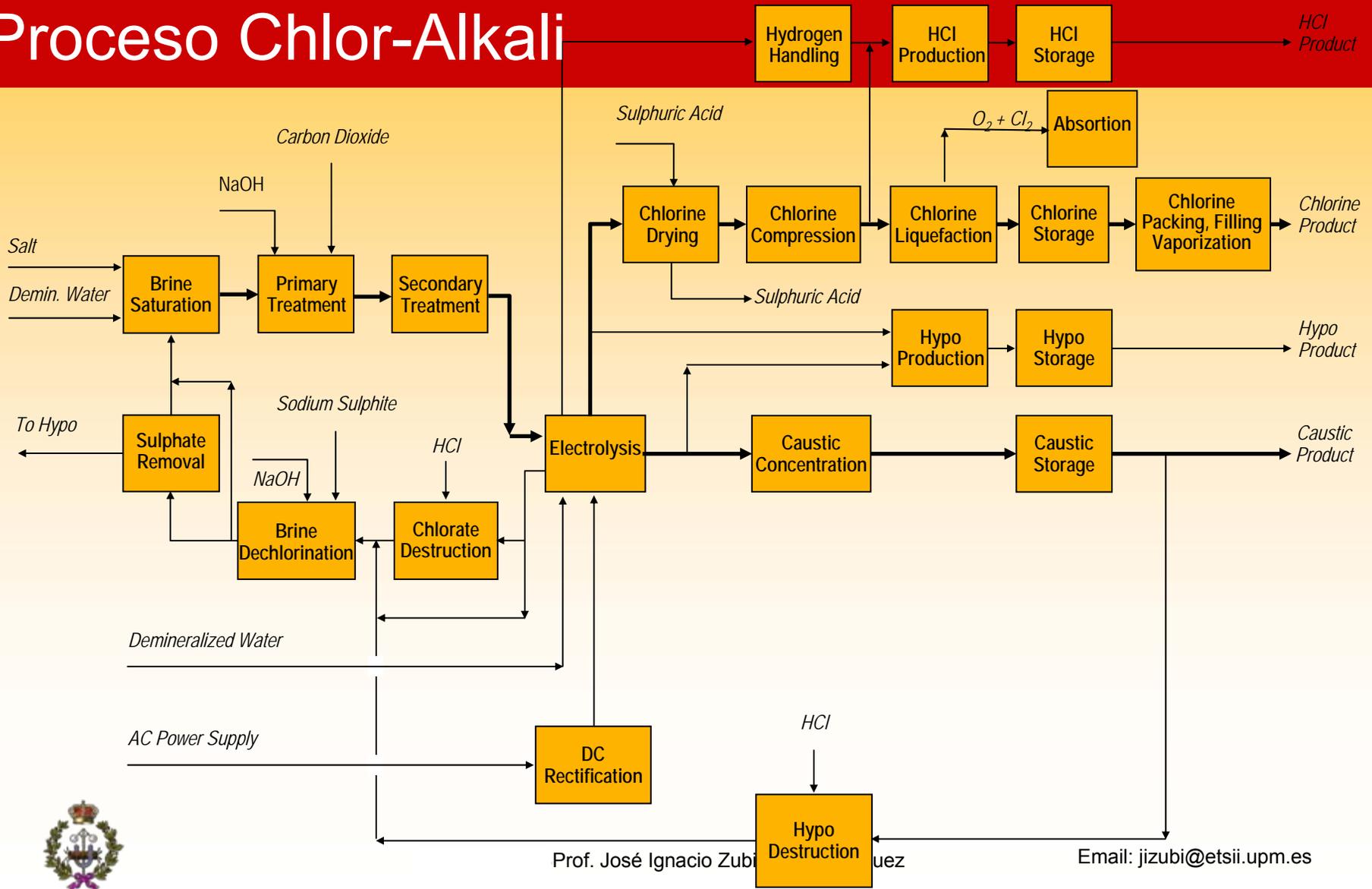
Disposición en planta del proceso de membranas



Sala de membranas



Proceso Chlor-Alkali

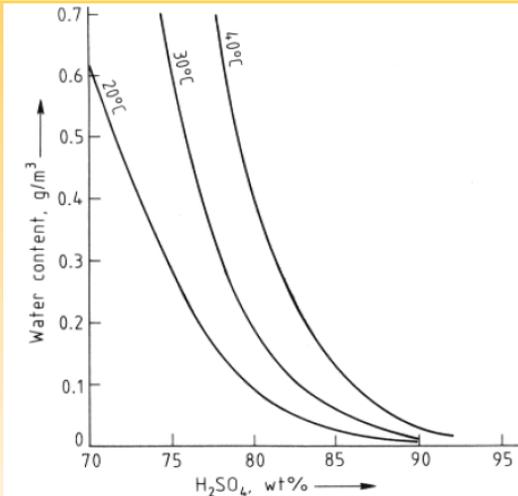
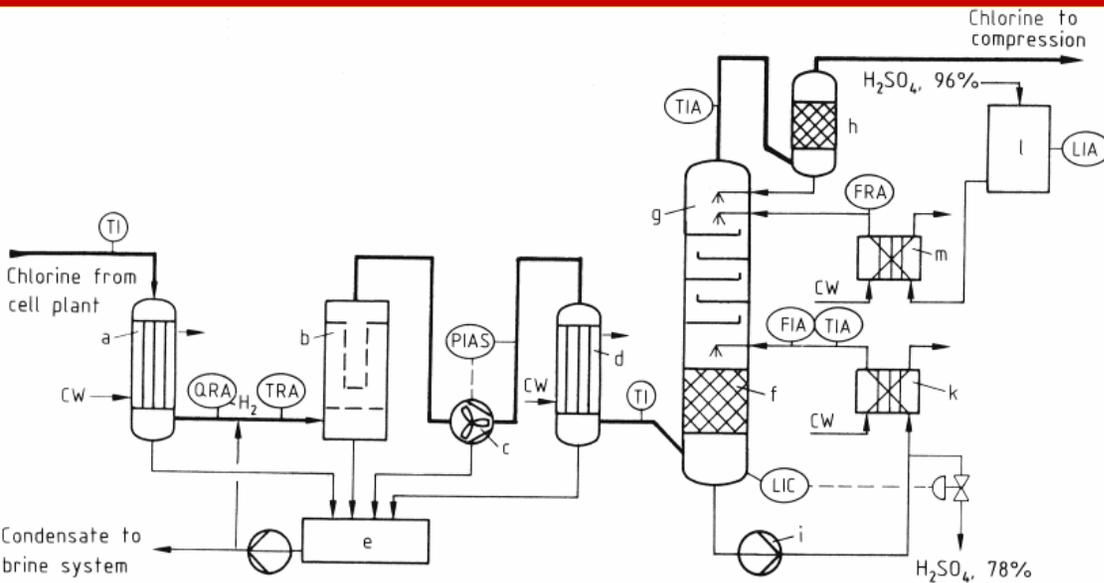


Post-procesado del cloro

- El cloro gas del compartimiento del ánodo contiene humedad, oxígeno subproducto, y algo de hidrógeno emigrado del cátodo. Además, si la salmuera es alcalina, contendrá anhídrido carbónico y un poco de oxígeno y nitrógeno de fugas de aire en el proceso o las tuberías. El cloro primero se refrigera a 16°C) y se pasa a través de demisters para quitar las gotitas del agua y los partículas de sal y sulfato de sodio. El gas refrigerado va a las torres de secado en las que se circula ácido sulfúrico, y que funcionan en serie. Generalmente, tres torres se utilizan para eliminar la humedad.
- El cloro seco entonces pasa a través de otros demisters antes de comprimirse y licuarse a bajas temperaturas. El gas no-condensado, llamado 'snift gas', se utiliza para producir el hipoclorito o el ácido clorhídrico. Si no hay mercado para el ácido clorhídrico, el 'snift gas' se neutraliza con sosa cáustica o cal (hidróxido de calcio) para formar el hipoclorito. El hipoclorito se vende como blanqueante o se descompone para formar sal y oxígeno.



Secado del cloro con ácido sulfúrico concentrado



Drying chlorine with sulfuric acid
Attainable moisture content as a function of concentration and temperature of the acid

Esquema simplificado de una planta de post-proceso de cloro

- a) Refrigerador del gas de cloro (primario); b) Demister de Cloro; c) Ventilador; d) Intercambiador de cloro gas (secundario); e) Tanque de recogida de condensados; f) Secador, de primera etapa; g) Secador, segunda etapa; h) Separador de nieblas de ácido sulfúrico; i) Bomba de circulación de ácido de sulfúrico; k) Enfriador para circular el ácido sulfúrico; l) Tanque de alimentación del ácido sulfúrico; m) Enfriador para la alimentación del ácido sulfúrico



Post-Procesado del hidrógeno

- El gas hidrógeno de las células de cloro-sosa se utiliza para la producción de ácido clorhídrico o se utiliza alternativamente como un combustible para producir vapor o bien se comprime y envasa en bombonas y se vende.
- El hidrógeno de las células de mercurio primero se refrigera para quitar el mercurio, que entonces se devuelve a las celdas. Ocasionalmente, un tratamiento secundario se utiliza para quitar los últimos niveles de mercurio en el hidrógeno haciéndolo pasar por columnas de tamices moleculares.
- El gas de hidrógeno se comprime después normalmente. Si las necesidades de los clientes exigen un hidrógeno casi puro conteniendo cantidades muy bajas de oxígeno, algunas plantas calientan el hidrógeno sobre un [catalizador del platino](#) (DEOXO), en donde las trazas de oxígeno reaccionan con el hidrógeno formando agua.
- Posteriormente, se enfría y comprime el hidrógeno antes de entregarlo al cliente. El calor del gas hidrógeno obtenido en las células se puede recuperar en un intercambiador de calor en el que se produce la calefacción de la alimentación de salmuera a las células.

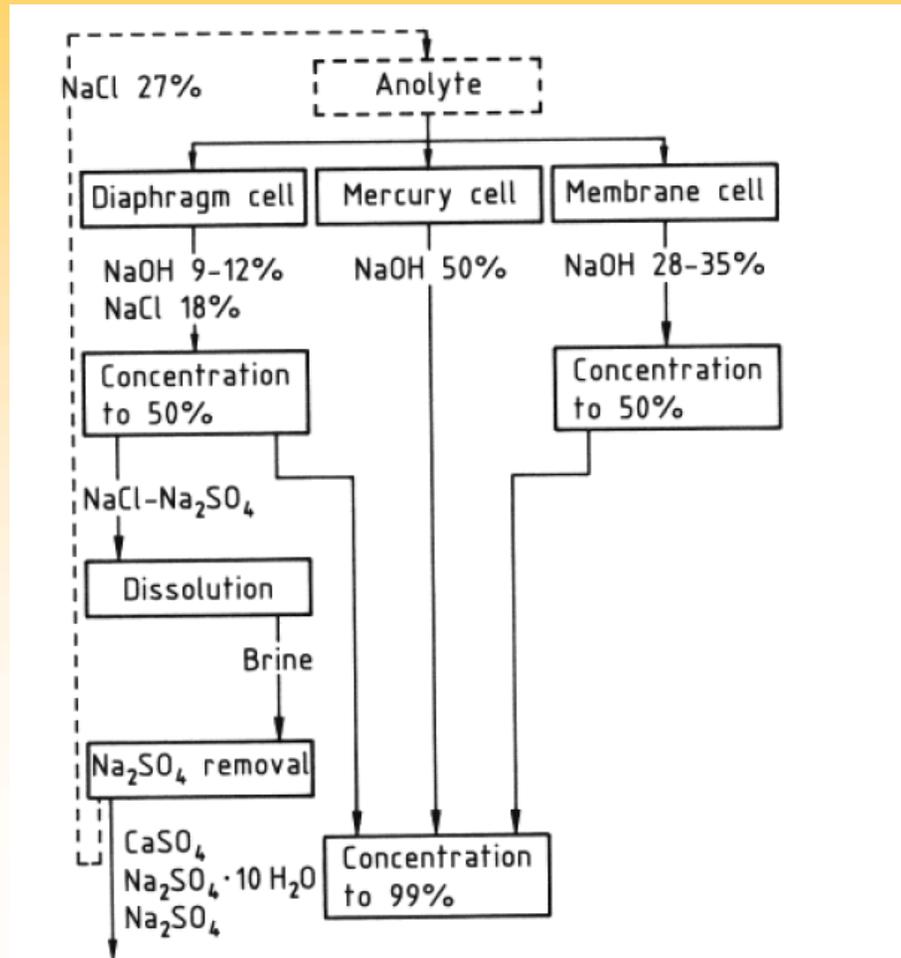


Post-Procesado de la sosa cáustica

- La soda cáustica se vende como 50%, 73%, o anhidra en granos o escamas (secas). La célula del mercurio puede producir las concentraciones del 50% y del 73% directamente. La lejía cáustica del decomponedor se refrigera y se pasa una vez o dos veces a través de un filtro de carbón activado para reducir los niveles de mercurio. Después de la filtración, la concentración del mercurio se baja a partes por millón (PPM). Incluso estos niveles bajos del mercurio pueden ser inaceptables para algunos clientes, que entonces tienen que cambiar al uso de sosa cáustica de células de membrana. La sosa cáustica de la célula de mercurio tiene unas pocas ppm de sal y <5-ppm de clorato de sodio. La sosa de la célula del mercurio es el cáustico de la pureza más elevada que puede fabricarse electrolíticamente si las concentraciones residuales de mercurio son tolerables en el uso final del producto. La sosa cáustica de la célula de membrana se concentra en un evaporador de efectos múltiples de película, que aumenta la concentración hasta el 50% con una alta economía del vapor. La sosa cáustica de las células de la membrana tiene generalmente 30 PPM del cloruro de sodio y 5-10 PPM de clorato sódico.
- El catolito de las células de diafragma contiene hidróxido de sodio del ~12%, cloruro de sodio del ~14%, 0.25%-0.3% de sulfatos de sodio, y 100-500 PPM de clorato del sodio. El catolito se evapora en un evaporador de efectos múltiples. La mayor parte de la sal del catolito precipitará durante la concentración de la sosa cáustica hasta el 50% de hidróxido de sodio. El producto final de sosa cáustica del 50% contendrá cerca del 1% de cloruro de sodio. La sosa del 50% también tiene una alta concentración de clorato (el ~0.1%) comparada con la sosa de las células de membrana o de mercurio (~10 PPM). La sal, separada de la sosa cáustica durante la evaporación, se utiliza para resaturar la salmuera alimentada a las células.
- Un evaporador adicional de un solo efecto es necesario para producir sosa cáustica del 73%.
- La sosa cáustica (seca) anhidra se produce en un evaporador de película, funcionando a 385°C y a vacío de 50-100 mm de columna de agua.



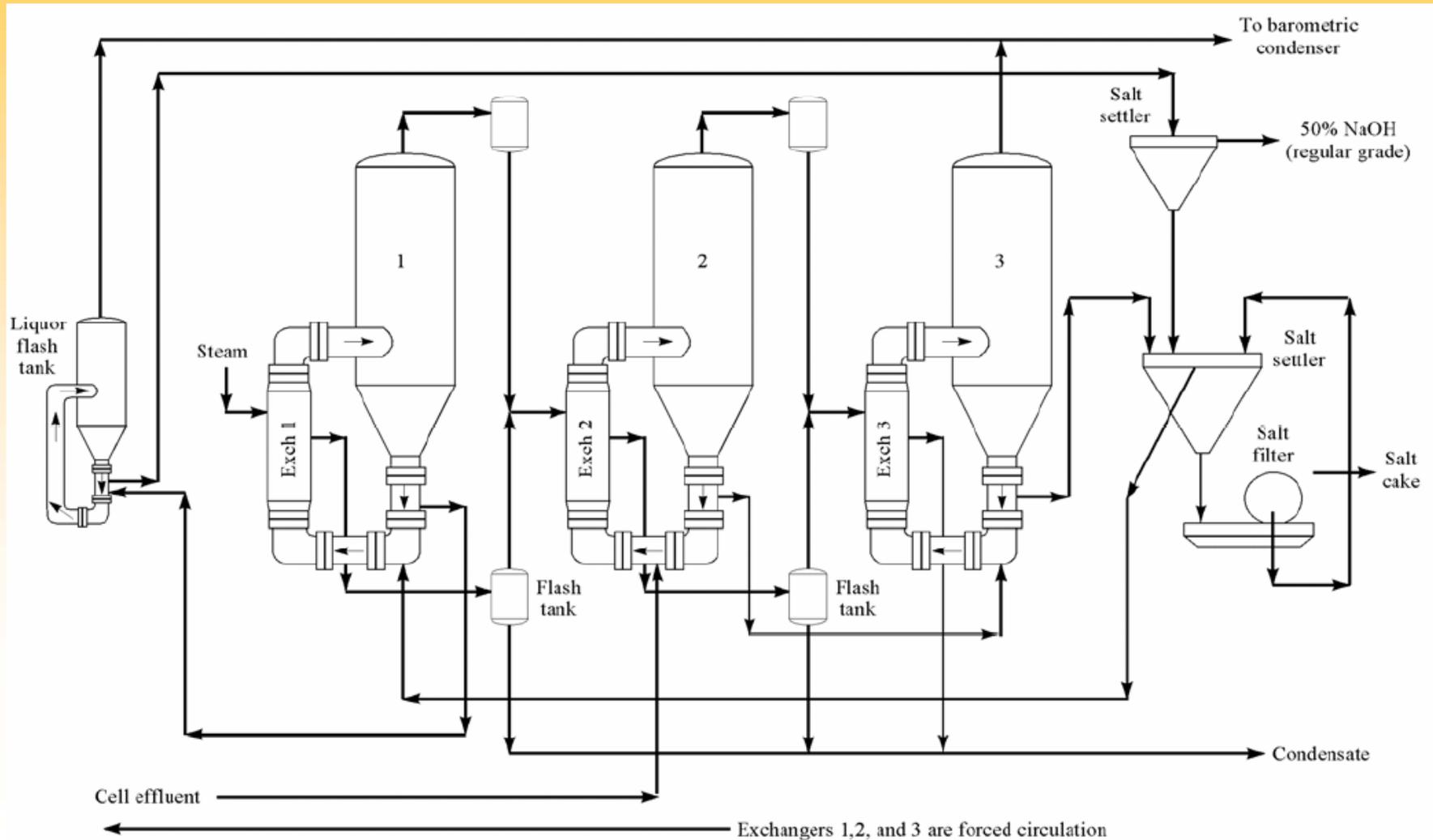
Efluente de la solución de sosa del proceso electrolítico



Treatment of the sodium hydroxide solution from electrolysis cells [5]



Evaporación de triple efecto para NaOH 50%



Chlorine production plants

January 2005

