



**Escuela Superior
de Ingeniería y Tecnología**
Universidad de La Laguna

Grado en Ingeniería Química Industrial

TRABAJO FIN DE GRADO

**IDENTIFICACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN
DE INDICADORES PARA
OPTIMIZACIÓN DE UNA PLANTA DE
HIPOCLORITO SÓDICO**

Autor: Gustavo Ramos Borges

Tutores: José Juan Macías Hernández

Lara Delgado Quintero

San Cristóbal de La Laguna, junio de 2022

Agradecimientos

A mi familia por todo su apoyo durante esta etapa de mi vida y en especial a mi madre por siempre estar en los momentos más difíciles y por todo su amor, a pesar de la distancia.

Me gustaría dar las gracias a mis tutores José Juan Macías Hernández y Lara Delgado Quintero por guiarme en todo momento. Al equipo de trabajo de Biomca Química S.L por su ayuda incondicional, en especial a Francisco Armas por siempre estar pendiente de mí y resolver todas las dudas que me iban surgiendo del proceso de producción.

A mis profesores, tanto a los de la UCLV como a los de la ULL, por contribuir en mi formación profesional y personal.

Índice

1. Resumen/Abstract.....	1
2. Objetivos	3
3. Introducción.....	4
4. Estado del arte.....	5
4.1 El cloro y sus principales usos.	5
4.2. Tecnologías para la producción de cloro.....	8
4.3. Indicadores clave de rendimiento.	11
4.4. Cuadro de mando.....	12
5. Desarrollo.....	14
5.1 Descripción de la instalación.....	14
5.2. Identificación de los KPI.....	28
5.2.1.Conocer el proceso de producción, su operación y gestión.	29
5.2.2.Disponibilidad de la información.	29
5.2.3.KPI identificados.	32
5.3. Propuesta del cuadro de mando.	36
6. Conclusiones/Conclusions	44
7. Bibliografía.....	45

1. *Resumen*

El presente trabajo está dirigido a la organización de la información de los sistemas de control y gestión de una planta de producción de hipoclorito de sodio para la consecución de cuadros de mando con indicadores que permitan la optimización del proceso industrial.

En la primera parte se realizó el estado del arte de la industria cloro-sosa, teniendo en cuenta los principales usos del cloro y las tecnologías para su producción, siendo la electrólisis en celdas de membranas la que menos contamina al medio ambiente. Se hizo referencia a las características de los indicadores claves de rendimiento y a los cuadros de mando.

A continuación, se realizó una descripción de la instalación y se estableció una estrategia para la identificación de los indicadores claves de rendimiento del proceso productivo, recopilando la información disponible desde diversas fuentes y adaptándolas a una hoja de cálculo de Excel para calcular los indicadores y establecer los cuadros de mando necesarios.

Finalmente, se utilizó el Power BI para la realización de la propuesta del cuadro de mando donde se observa que los indicadores establecidos se encuentran dentro del rango de referencia, lo que demuestra el buen funcionamiento de la industria.

Abstract

The present work is directed to the organization of the information of the control and management systems of a sodium hypochlorite production plant for the achievement of control panels with indicators that allow the optimization of the industrial process.

In the first part, the state of the art of the chlorine-soda industry was carried out, taking into account the main uses of chlorine and the technologies for its production, with electrolysis in membrane cells being the least polluting to the environment. Reference was made to the characteristics of key performance indicators and scorecards.

Next, a description of the installation was made and a strategy was established for the identification of the key performance indicators of the production process, compiling the information available from various sources and adapting it to an Excel spreadsheet to calculate the indicators and establish the necessary dashboards.

Finally, Power BI was used to carry out the scorecard proposal where it is observed that the established indicators are within the reference range, which demonstrates the good functioning of the industry.

2. *Objetivos*

1. Organizar la información disponible en los sistemas de control y gestión de una planta de producción de hipoclorito sódico.
2. Identificar los indicadores claves de rendimiento del proceso de producción del hipoclorito de sodio.
3. Establecer cuadros de mando con indicadores que permitan la posterior optimización de la planta.

3. Introducción

El cloro fue descubierto en su forma pura en el siglo XVIII por el químico sueco Carl Wilhelm Scheele, exactamente en el año 1774, aunque pensaba que se trataba de un compuesto que contenía oxígeno. No fue hasta el año 1810 cuando el químico inglés Humphry Davy demostró que se era un elemento y le dio el nombre de cloro debido a su coloración.

La industria encargada de su producción se denomina cloro-álcali. El proceso consiste en la electrólisis de una solución salina (generalmente cloruro de sodio, aunque puede ser cloruro de potasio) obteniéndose cloro gas, hidróxido de sodio o de potasio (en función de la sal empleada) e hidrógeno.

Las primeras plantas de cloro-sosa surgen a finales del siglo XIX y empleaban la tecnología de celdas de mercurio, consumiendo grandes cantidades de mercurio metálico y provocando enormes daños al medio ambiente. Con el paso de los años se fueron investigando otras tecnologías con el objetivo de reducir los costes del proceso productivo, el impacto ambiental que este genera y la obtención de productos de mayor calidad. La siguiente tecnología implementada fue la de celdas de diafragma, a pesar de ser mejor en muchos aspectos que su predecesora, posee dos problemas fundamentales: el uso de asbestos en la fabricación de los diafragmas (afectaciones a la salud humana y al medio ambiente) y la no selectividad de éstos (disminución del rendimiento de producción y baja calidad del producto final). Por último, surge la tecnología de celdas de membrana, con la cual se mejora en gran medida el rendimiento del proceso y la pureza de los productos.

En la actualidad la industria química produce más de diez mil productos que están relacionados directa o indirectamente con el cloro, de ahí su importancia y lo que hace que la industria cloro-álcali esté considerada una de las mayores industrias electroquímicas a nivel global.

4. *Estado del arte*

4.1 *El cloro y sus principales usos.*

El cloro es el elemento número 17 de la tabla periódica y se encuentra en el grupo de los halógenos. En estado puro y en condiciones normales es un gas amarillo verdoso, en líquido es amarillo y en sólido es de color ámbar. Es más pesado que el aire, soluble en agua, irritante y tiene riesgo de explosión pues facilita la combustión de otros compuestos.

A pesar de que es un elemento abundante en la naturaleza no se encuentra en su estado puro pues reacciona con rapidez con otros compuestos para formar sales y ácidos. Se obtiene fundamentalmente a partir de la electrólisis del cloruro de sodio, generándose además sosa cáustica e hidrógeno.

En la actualidad el cloro es utilizado en una gran gama de productos, desde la medicina hasta en la industria militar (Figura 1). A continuación, se describen algunos usos del cloro y sus derivados:

- **Cloración del agua:**

Ayuda a mantener el agua libre de patógenos que pueden provocar enfermedades al ser humano. Este procedimiento se lleva a cabo tanto para el agua potable como para el agua de las piscinas o spa.

- **Desinfectantes para el hogar:**

La lejía es de los principales productos que se utiliza en la desinfección del hogar, aunque existen numerosos productos en el mercado que utilizan cloro para este fin. Con ellos se pueden blanquear y desinfectar la ropa, además de limpiar las superficies de la cocina y el baño.

- **Industria militar:**

Es utilizado para fabricar paracaídas, cubiertas para las cabinas de pilotos, chalecos antibalas, gafas de visión nocturna y en las tecnologías para la dirección de misiles.

- **Agricultura:**

El anión cloruro ayuda al metabolismo de las plantas, manteniéndolas saludables. Se utiliza en la elaboración de productos para el control de plagas en los cultivos.

- **Medicina:**

Se utiliza para producción de medicamentos, aproximadamente un 80 % requiere del uso de cloro. También se emplea para la fabricación de dispositivos médicos, lentes de contacto, puntos de sutura quirúrgicos e inhaladores respiratorios.

- **Tecnología:**

Está presente en los procesadores para ordenadores, tabletas y móviles. Se utiliza en la fabricación de aires acondicionados y baterías de coches híbridos.

- **Construcción:**

Se utiliza para la síntesis del policloruro de vinilo (PVC). También está presente en la espuma aislante y en las pinturas.

- **Transporte y metalurgia:**

Es utilizado para la elaboración de elementos de los aviones, barcos, trenes y coches. Interviene en el proceso de obtención de titanio. También es empleado en la fabricación de líquidos de freno, cojines y parachoques.



Legend

- Construction
- Energy
- Food
- Health
- Home Care
- Innovation
- Pharmaceuticals
- Sport
- Staying Safe
- Technology
- Transportation
- Miscellaneous Uses

Products of Chlorine

Water Salt Electricity

📱 🌐 📺 @eurochlor

www.eurochlor.org

euro chlor 17.

A sector group of Cefic
European Chemical Industry Council - Cefic assl

Figura 1: Árbol del cloro (Eurochlor).

4.2. *Tecnologías para la producción de cloro.*

El cloro se produce por la electrólisis de una solución salina, siendo el cloruro de sodio (NaCl) la más empleada como materia prima o, en menor medida, el cloruro de potasio (KCl). Las principales tecnologías empleadas para su producción son:

- Electrólisis en celdas de mercurio
- Electrólisis en celdas de diafragma
- Electrólisis en celdas de membranas

La diferencia entre estas tecnologías reside básicamente en la forma en que se mantienen separados los productos de la electrólisis, por ejemplo, en las celdas de mercurio no existe separación física entre el cloro y la sosa cáustica producida, mientras que en las celdas de diafragma y membranas si existe.

Actualmente el proceso de cátodo despolarizado de oxígeno constituye una de las tecnologías emergentes más importantes de la industria del cloro, reduciendo aproximadamente un 30 % del consumo de energía eléctrica. Después de años de investigación queda demostrado que es una opción técnicamente viable para su implementación a gran escala, aunque su principal inconveniente es su viabilidad económica, sin embargo, se prevé que en los próximos años esto no constituya un problema.

- **Electrólisis en celdas de mercurio:**

Este proceso fue la primera tecnología utilizada para la producción de cloro a escala industrial. La celda consiste en un ánodo metálico, generalmente de titanio recubierto de platino u óxidos metálicos conductores, sumergido en una solución de cloruro de sodio que fluye sobre el cátodo de mercurio depositado en el fondo de esta, ambos se encuentran a poca distancia y con la diferencia de potencial adecuado se produce la electrólisis (Figura 2). El cloro se libera en el ánodo, mientras que el sodio reacciona con el cátodo de mercurio formando una amalgama, la cual fluye hacia un reactor donde se pone en contacto con agua, recuperándose el mercurio y se forma hidróxido de sodio e hidrógeno.

En Europa a partir de enero de 2018 con la entrada en vigor del Reglamento (UE) 2017/852 sobre el mercurio y por el que se deroga el Reglamento (CE) N° 1102/2008, queda prohibido el uso de esta tecnología por motivos medioambientales.

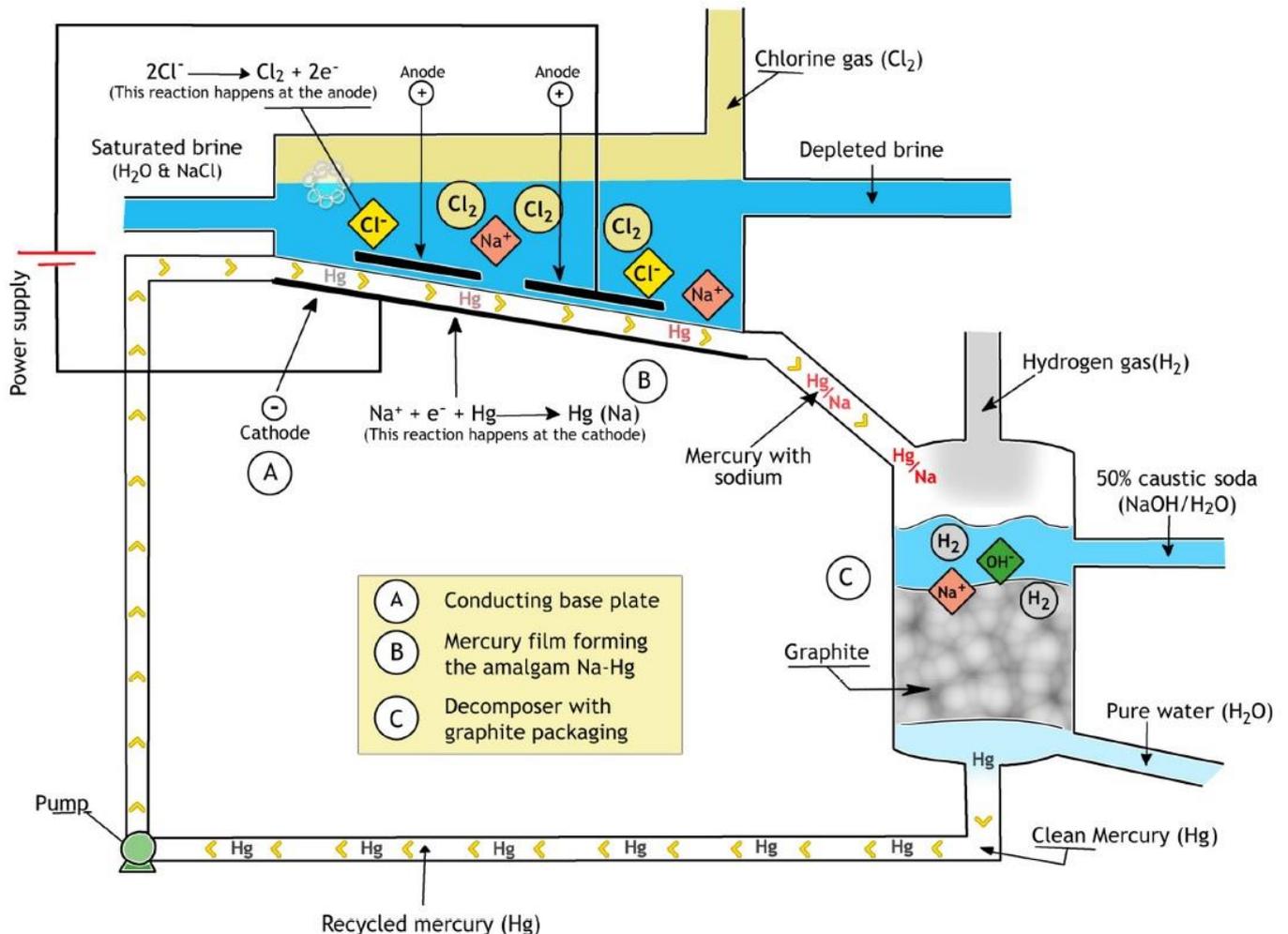


Figura 2: Electrólisis en celdas de mercurio (Eurochlor).

- Electrólisis en celdas de diafragma:

La salmuera es alimentada continuamente a la celda pasando del ánodo al cátodo, los cuales se encuentran separados por un diafragma permeable que permite el paso de parte de la salmuera (Figura 3). En el ánodo se produce el cloro, mientras que en el cátodo se obtiene hidrógeno y sosa cáustica diluida (12%) y contaminada con cloruro de sodio, lo cual la hace inutilizable para muchas aplicaciones, siendo una de sus principales limitaciones.

Al obtenerse una sosa cáustica muy diluida obliga a evaporar el agua que contiene hasta alcanzar una concentración del 50 % para su comercialización, esto incrementa de forma considerable el consumo de energía eléctrica.

Por lo general, el diafragma está compuesto de amianto y otros polímeros para mejorar su eficacia y vida útil. El amianto es un material cancerígeno por lo que es recomendable pasar a la tecnología de celdas de membranas o emplear diafragmas sin este material, siempre que se cumpla el criterio

de consumo energético. Por otra parte, el diafragma ofrece alta resistencia eléctrica por lo que es necesario trabajar a elevadas densidades de corriente.

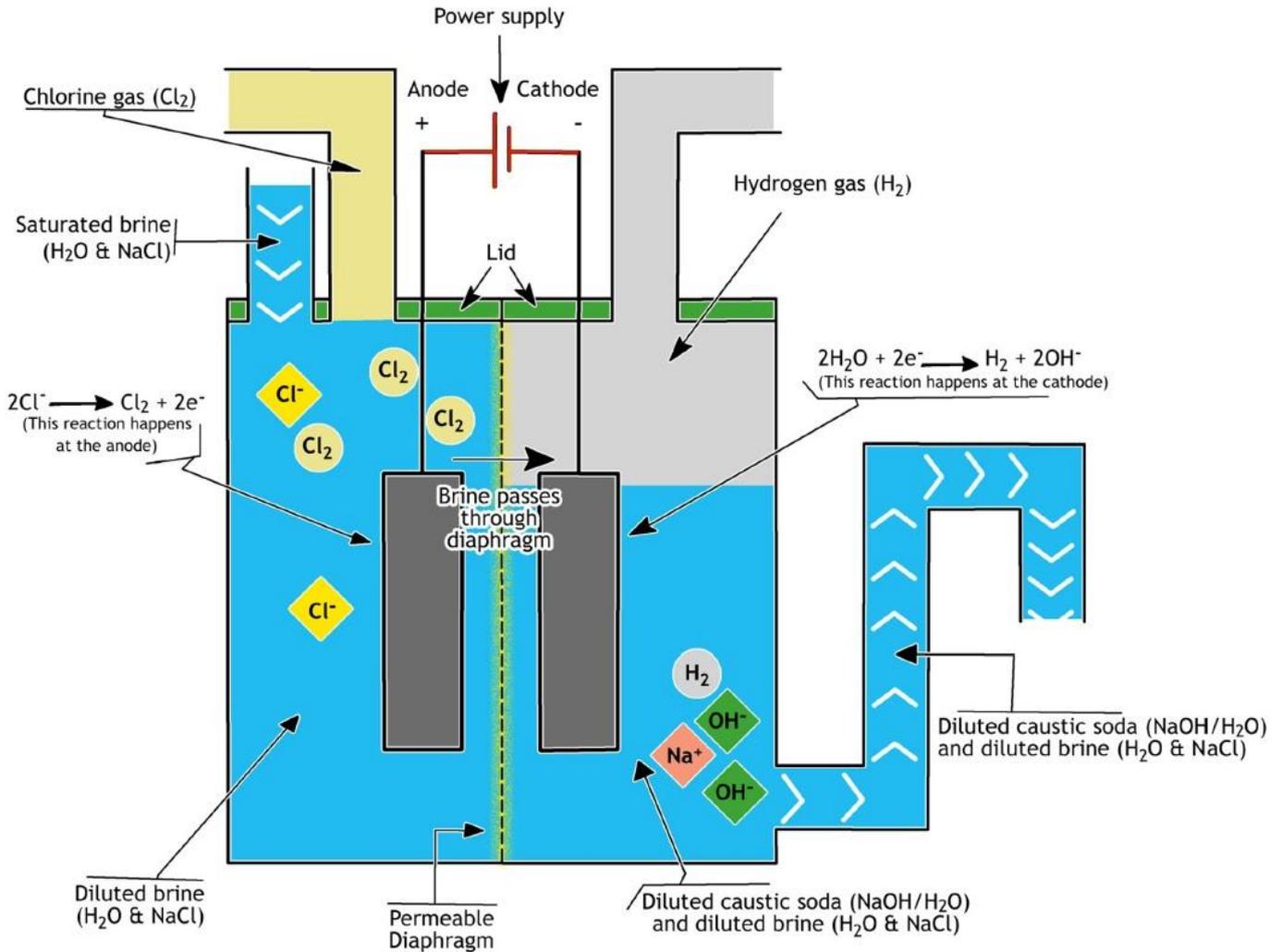


Figura 3: Electrólisis en celdas de diafragma (Eurochlor).

- Electrólisis en celdas de membranas:

En este proceso el ánodo y el cátodo se encuentran separados por una membrana de intercambio catiónico selectiva a iones sodio. Por el ánodo fluye la salmuera, mientras que por el cátodo pasa una solución de sosa cáustica. Los iones cloruro se oxidan en el compartimento anódico y se forma el cloro gas. Los iones sodio pasan la membrana hacia el compartimento catiónico y se unen a los iones hidroxilo para formar sosa cáustica, además se libera hidrógeno (Figura 4).

La membrana impide el paso de los iones cloruro hacia el cátodo, aunque no impide totalmente el paso de los iones hidroxilo hacia el ánodo lo que provoca la formación de oxígeno, clorato e

hipoclorito en este compartimento, estos deben ser vigilados de cerca pues suponen parámetros críticos de operación.

Constituye la mejor tecnología disponible para la industria cloro-álcali pues no emplea mercurio ni amianto y el consumo energético es menor. La principal desventaja de este proceso es que requiere una salmuera de alta pureza para proteger las membranas, por lo que es necesario precipitar los metales alcalinotérreos en forma de hidróxido y pasar la salmuera por resinas de intercambio iónico.

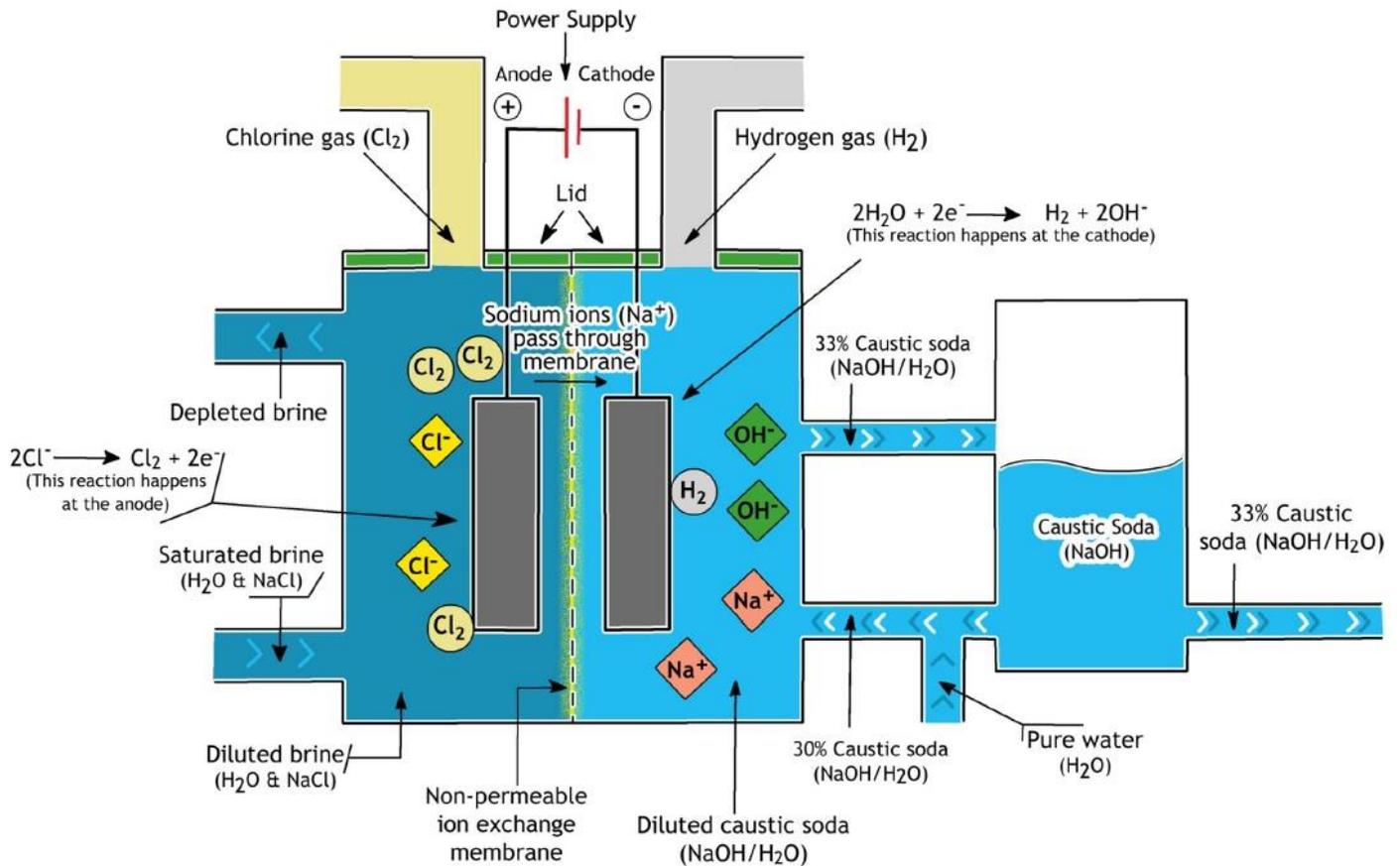


Figura 4: Electrólisis en celdas de membrana (Eurochlor).

4.3. Indicadores clave de rendimiento.

Los indicadores clave de rendimiento o key performance indicator (KPI) son una medida de cómo va la realización de una determinada actividad o estrategia que es fundamental para el éxito de una organización o un individuo.

Su origen es desconocido, sin embargo, en el siglo III los emperadores de la dinastía Wei calificaban el rendimiento de los miembros oficiales de la familia. Los KPI han evolucionado con el tiempo, dejando de ser las mediciones simples que eran. En la actualidad están implementados

extensamente en las empresas con el objetivo de tomar decisiones acertadas ante un entorno dinámico y competitivo.

Para seleccionar un buen KPI debe cumplir determinadas características, generalmente los autores utilizan la regla SMART para poder identificarlos:

- **Specific (específico):** Los KPI deben ser precisos y enfocados en los propósitos comerciales u objetivos de rendimiento de la actividad que se desarrolla.
- **Measurable (medible):** Deben ser medibles, es decir, se pueden expresar cuantitativamente.
- **Attainable (alcanzable):** Los objetivos que se persiguen serán razonables y alcanzables, no vale de nada trazarse metas imposibles de alcanzar y tener datos que no aportan ningún valor.
- **Relevant (relevante):** Los KPI estarán centrados en factores relevantes y serán pertenecientes directamente al trabajo hecho en el proyecto.
- **Time based (basado en el tiempo):** Los KPI se deben poder medir en el tiempo para poder establecer comparativas.

En ocasiones resulta difícil enmarcar un KPI dentro de una categoría debido a su propia naturaleza y a la gran variedad que existen. Por lo general se clasifican según lo que pretendan indicar:

- **Cuantitativos:** representan valores numéricos.
- **Prácticos:** interactúan con los procesos desarrollados en la empresa.
- **Direccionales:** expresan el éxito o el fracaso de la empresa.
- **Procesables:** marcan un cambio de efecto.
- **Financieros:** miden el rendimiento.

Otra forma de clasificarlos sería en anticipados (miden los controladores del rendimiento futuro), rezagados (miden el rendimiento pasado) y de diagnóstico (miden el rendimiento actual).

4.4. Cuadro de mando.

Un cuadro de mando es una herramienta de gestión empresarial que consiste en una interfaz visual donde se muestran una serie de indicadores numéricos y gráficos en tiempo real, lo que ofrece una visión general y objetiva de la empresa, ayudando así a la toma de decisiones para introducir cambios que optimicen su funcionamiento y hacerla más competitiva en el mercado actual.

En sus inicios sólo ofrecían información financiera y eran actualizados con el paso de los meses, reflejando datos del pasado y limitando la toma de decisiones. Actualmente ofrecen información de

todo tipo, según las necesidades de la empresa, y lo más importante es que los datos son en tiempo real.

La característica fundamental que debe tener es que refleje de forma integral la situación actual de la empresa y su evolución en los objetivos planteados. Además, tiene que ser flexible y personalizable para poder reflejar la realidad debido a que las empresas actuales son muy dinámicas.

Disponer de un cuadro de mando trae consigo innumerables ventajas, entre ellas se encuentran:

- Mejor visión integral de la situación de la empresa basada en datos en tiempo real, lo que ofrece información veraz en cada momento para la toma de decisiones.
- Posibilita el diseño y la planificación de estrategias a corto, mediano y largo plazo, teniendo en cuenta diversas variables que puedan influir en el buen funcionamiento interno y externo durante su implementación.
- Disminuye los posibles riesgos que genera el mercado al ofrecer información inteligente con la cual se puede realizar un análisis de las tendencias y de esta forma anticiparse a los sucesos.
- Involucra a la organización con las estrategias planteadas, mejorando la comunicación interna entre departamentos y empleados, pues no servirían de nada los datos si son implementados incorrectamente.
- Se puede determinar si la estrategia establecida es un éxito o un fracaso, con lo cual se realiza un diagnóstico de la situación real de la empresa.

Entre las desventajas de su utilización se encuentra el factor económico pues es necesario la utilización de un software profesional para su gestión. Además, es recomendable el asesoramiento o contratación de personal cualificado para evitar una mala elección o interpretación de los indicadores presentes en el cuadro de mando y de esta forma no tomar decisiones erróneas que afecten a la empresa.

5. Desarrollo

5.1 Descripción de la instalación.

La empresa Biomca Química S.L fue constituida en 2014 en Santa Cruz de Tenerife. Sus instalaciones fueron inauguradas el 11 de mayo de 2016, siendo la primera fábrica de hipoclorito sódico (NaClO) de Canarias. Tiene una capacidad de producción de más de 27000 t/año de NaClO y dispone de una instalación solar fotovoltaica en régimen de autoconsumo con una potencia nominal de 100 kW sobre la cubierta de sus edificaciones. El cloro (Cl_2) para la producción de NaClO se obtiene mediante la electrólisis con celdas de membrana.

Para una mejor comprensión del proceso se ha dividido en tres partes fundamentales: el sistema de salmuera, los electrolizadores, el sistema de NaClO y la decoloración.

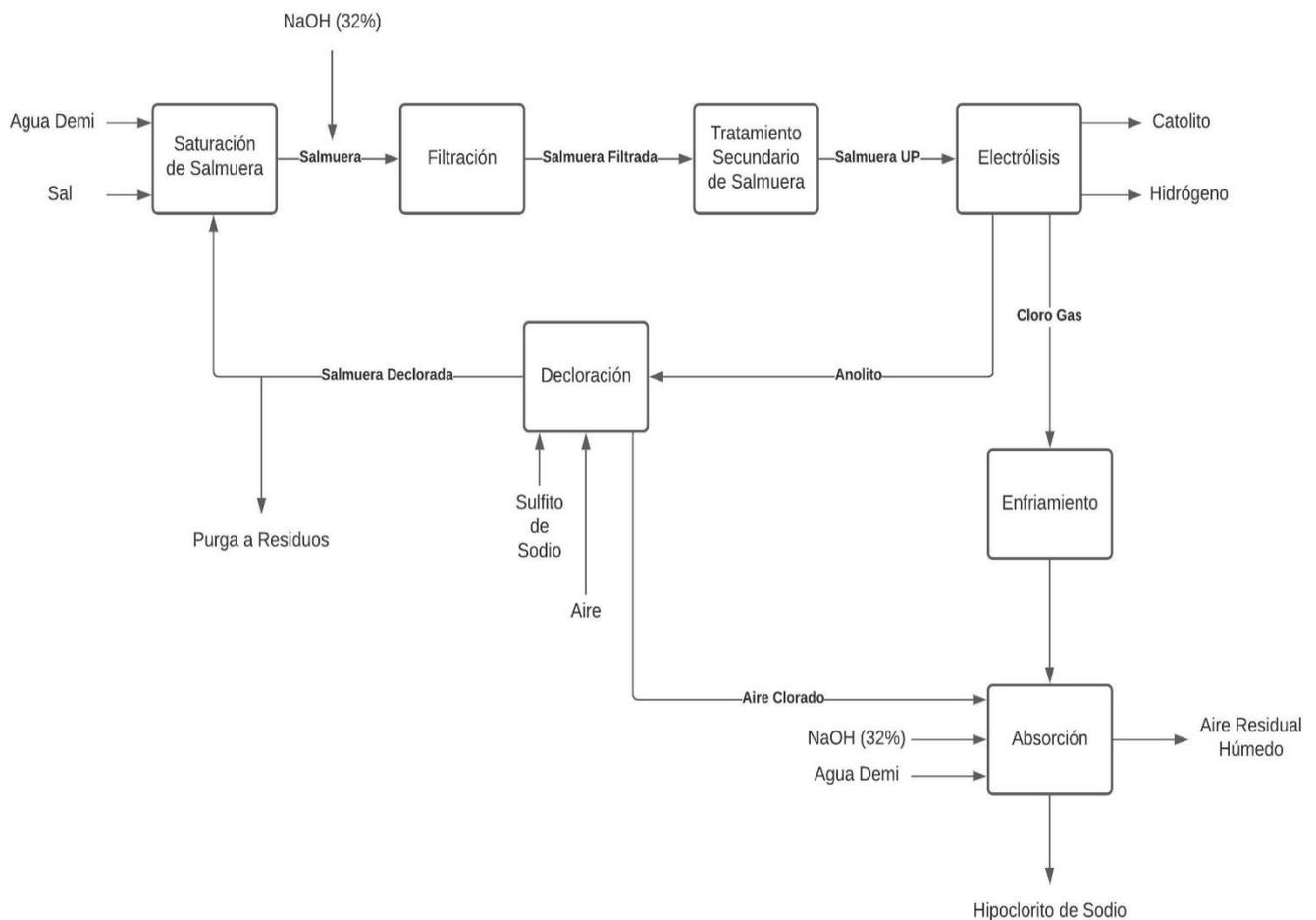


Figura 5: Diagrama de bloques del proceso.

- **Sistema de salmuera:**

El agua consumida en el proceso de cloro-sosa es obtenida por un tratamiento de desmineralización.

Las unidades de desmineralización están compuestas de un lecho de resinas catiónicas seguido de un lecho de resinas aniónicas, dicha combinación genera un agua de baja salinidad, presentando conductividad eléctrica baja, generalmente menor a 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La planta cuenta con dos sistemas o "trenes de desmineralización" (Tren A y Tren B), que trabajan alternadamente (uno en funcionamiento y el otro en regeneración, fuera de servicio o en reserva).

El agua bruta debe pasar por dos filtros de carbón activado (F-7150 y F-7152) antes de entrar en la columna catiónica. Estos filtros trabajan en paralelo y su objetivo es remover el cloro disuelto en el agua para así aumentar la vida útil de las resinas.

El agua desmineralizada que se obtiene a la salida de la columna aniónica va al tanque de agua desmineralizada T-7102, el cual se debe mantener entre el 60 – 90 % de su nivel para tener una reserva de agua tratada disponible en caso de problemas operacionales. La bomba P-7104 proporciona agua desmineralizada para todos los consumos de la planta incluido el tanque elevado T-7110, que debe estar completamente lleno y desbordando hacia el tanque T-7102.

Una vez agotadas las resinas debe procederse a su regeneración. La regeneración del lecho catiónico se realiza con una solución de ácido clorhídrico (HCl) diluido, mientras que la regeneración del lecho aniónico se hace con una solución de sosa cáustica (NaOH) diluida.

La sal a granel se carga en bolsas de 1000 kg aproximadamente y debe ser depositada al saturador T-1101 mediante el uso de un aparejo eléctrico (Q-1103) que permite subir las bolsas hasta el nivel de la tolva G-1102. Una vez ubicada sobre la tolva se descarga el contenido de la bolsa dentro de la misma pasando la sal inmediatamente al saturador T-1101, en donde se almacena y se pone en contacto continuo con una corriente de salmuera diluida (200 a 230 g/L) proveniente del sistema de cloración, la cual es alimentada a través de dos aspersores ubicados en el tope del saturador. De esta forma, la salmuera diluida distribuida sobre el lecho de sal a granel irá percolando a través de este. A partir de ese contacto la sal a granel se irá diluyendo para formar salmuera saturada. La cantidad de agua desmineralizada a agregar al saturador dependerá, fundamentalmente, del consumo de salmuera en la electrólisis, la cual a su vez es directamente proporcional a la cantidad de corriente eléctrica alimentada a los electrolizadores.

La salmuera bruta que sale del saturador es ligeramente alcalinizada mediante el agregado de sosa cáustica (NaOH) al 32% de concentración. El objetivo es ajustar el pH de la salmuera al valor más adecuado (pH 9,5 a 10) para la posterior etapa de tratamiento con resina. Debido a este ajuste de pH se puede producir una precipitación parcial del magnesio como hidróxido de magnesio.

El agregado de sosa cáustica se realiza en la succión de la bomba P-1110, en forma automática, mediante lazo de control AIC-1109. Este lazo, mide el valor de pH a la descarga de la bomba P-1110 e inyecta sosa cáustica a través de la bomba dosificadora P-1109.

Para mantener el contenido de sulfatos dentro del nivel adecuado se realiza la purga de salmuera fuera del circuito (hacia los tanques T-9102 y T-9112 de efluentes no recuperables). El caudal de purga se ajusta manualmente mediante el rotámetro FI-1103 en base a los análisis de laboratorio.

La salmuera captada en el fondo del saturador T-1101, con una concentración de 300 a 310 g/L, es bombeada por la bomba P-1110 y enviada a los filtros de salmuera. Este caudal es ajustado manualmente mediante el rotámetro FI-1105 y dependerá fundamentalmente del consumo de los electrolizadores y de los niveles de los tanques T-1501 y T-1702.

El sistema de filtración de salmuera está compuesto por 3 filtros de tipo bolsa (F-1501 A/B/C) que operan en paralelo como filtros primarios. La salmuera filtrada que sale de los filtros primarios se colecta en un distribuidor general y posteriormente pasa a través de 4 baterías de filtros secundarios (A, B, C y D) que trabajan en paralelo y están compuestos por un filtro cartucho de polipropileno de 20 micrones (F-1504), un filtro cartucho de polipropileno de 5 micrones (F-1505) y un filtro de carbón (F-1506). La salmuera que sale de estos filtros es enviada al tanque T-1501 del cual se bombea al sistema de intercambio iónico mediante la bomba P-1502, este caudal es regulado manualmente mediante el rotámetro FI-1505.

La salmuera filtrada que proviene de la bomba P-1502 es precalentada en el intercambiador E-1601 antes de ser alimentada a las columnas de intercambio iónico, siendo el rango óptimo de operación de 65 °C a 75 °C. Es muy importante operar el sistema de intercambio iónico en condiciones estables de caudal y temperatura (lo más constantes posible) para que la capacidad de la resina sea la más adecuada.

El sistema de tratamiento secundario está compuesto por dos columnas con resina de intercambio iónico que operan en serie (C-1650 A y C-1650 B) y en forma alternada. Sólo se opera con una columna cuando la otra está en proceso de regeneración. Estas resinas también sufren un

agotamiento siendo necesario su regeneración con soluciones diluidas de ácido clorhídrico (7%) y sosa cáustica (4%).

El ácido clorhídrico (al 32% de concentración) necesario para la regeneración se tomará directamente del tanque stock T-8201 al ser succionado y diluido por el eyector J-1612 mediante la alimentación de agua desmineralizada.

La sosa cáustica (al 32% de concentración) para la regeneración se recibirá a 40°C desde la bomba P-5106 y se mezclará manualmente con agua desmineralizada en el mezclador en línea (mezclador estático) J-1620. Al igual que con el ácido, el ajuste de los flujos requeridos será controlado manualmente utilizando los rotámetros correspondientes.

La salmuera purificada que se genera en las columnas de intercambio iónico se almacena en el tanque de salmuera ultrapura T-1702. Este tanque debe mantenerse siempre con buen nivel por si se produce algún inconveniente en el proceso de filtración o tratamiento secundario.

La bomba de salmuera ultrapura P-1704 se debe mantener siempre en operación bombeando salmuera purificada hacia los electrolizadores y parcialmente hacia el tanque elevado T-1706. El caudalímetro FI-1704 permite regular un caudal de salmuera ligeramente superior al requerido para alimentar las celdas, de esta forma se mantiene siempre el tanque elevado T-1706 lleno y rebosando hacia el tanque T-1702. Si disminuye el nivel de salmuera del tanque elevado T-1706, el interruptor LSL-1706 generará la detención simultánea de todos los electrolizadores.

La salmuera es calentada a la salida de la bomba P-1704 mediante el intercambiador de calor E-1708 de modo que la temperatura de alimentación de las celdas se encuentre de 70 a 85 °C, esta es monitoreada en forma continua mediante el TIT-1709.

También existe una cañería que permite derivar salmuera purificada hacia el sistema de decloración de salmuera, evitando pasar por los electrolizadores.

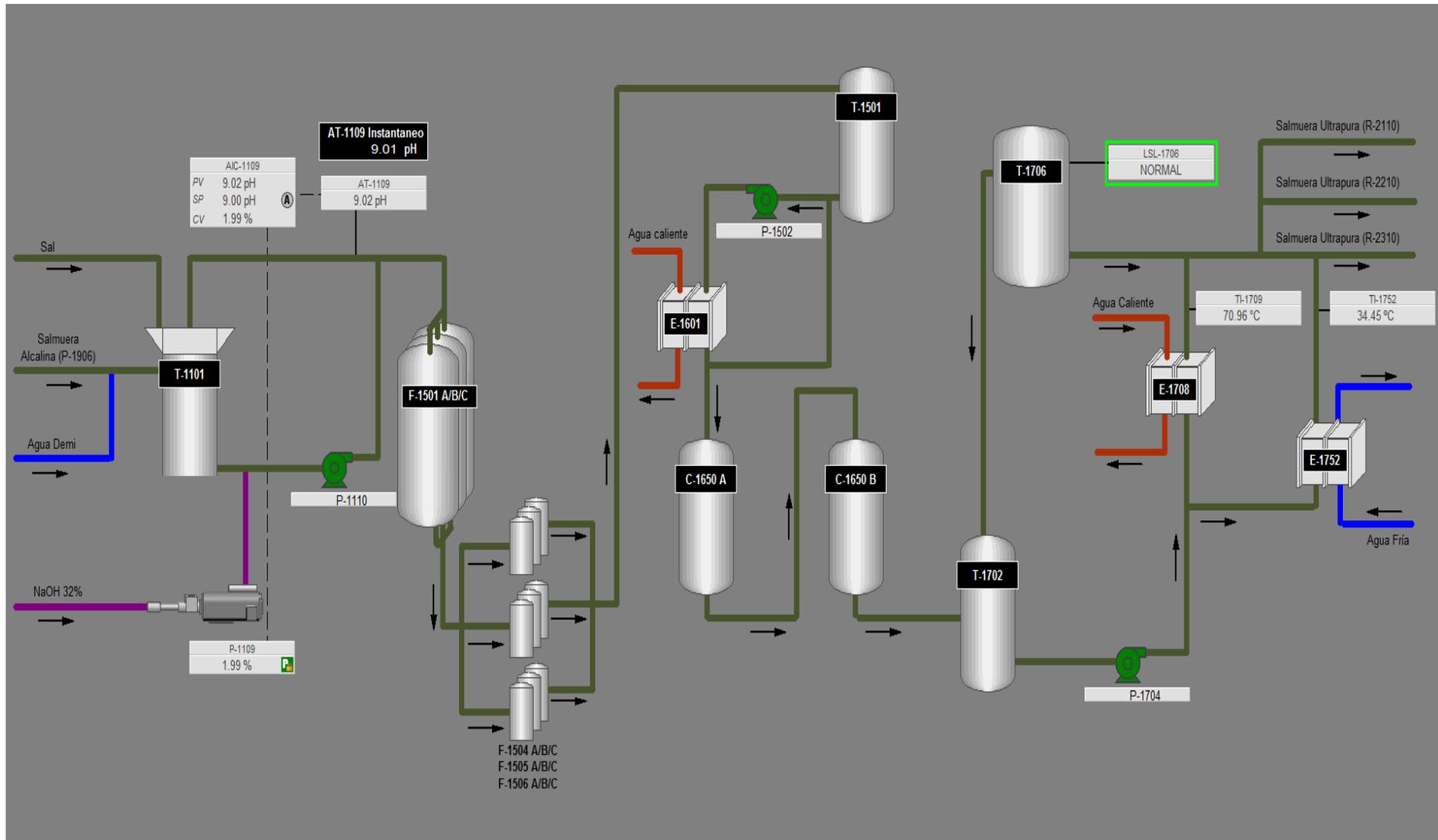


Figura 6: Diagrama de flujo del sistema de salmuera. (SCADA)

- **Electrolizadores:**

La temperatura de alimentación de sosa cáustica a celdas debe encontrarse entre 75 y 80 °C. Los tanques de catolito (T-2111, T-2211, T-2311) son llenados antes del arranque de los electrolizadores (R-2110, R-2210, R-2310) a partir del depósito T-5104 que contiene sosa cáustica al 32 %, esta es diluida con agua desmineralizada hasta una concentración entre 28 y 30,5 %, posteriormente es calentada en los intercambiadores de calor correspondientes a cada electrolizador (E-2117, E-2217, E-2317) antes de su entrada a celdas.

El cloro gas húmedo producido en la electrólisis y que proviene de los respectivos sellos de cloro H-2112, H-2212 y H-2312, es enviado a un colector general único y conducido hacia el enfriador E-4102, donde se produce el enfriamiento de la totalidad de la corriente gaseosa hasta una temperatura entre los 35 °C y los 40 °C aproximadamente. El caudal de agua de enfriamiento (verificable a través del FI-4102) debe ajustarse para mantener la temperatura dentro del rango anteriormente indicado, siendo este de unos 4200 l/h.

Al producirse el enfriamiento, parte de la humedad contenida en la corriente gaseosa se condensa (pasa a fase líquida). Ese condensado clorado se deriva hacia el sistema de dechloración de salmuera, siendo separado de la corriente de cloro gas.

La presión del colector general de cloro gas aguas abajo del intercambiador E-4102 es controlada automáticamente por medio del lazo de control de presión PIC-4103, el cual opera sobre la velocidad de giro del ventilador K-6116. De este modo, todo el cloro gas generado por los electrolizadores es alimentado al reactor de hipoclorito R-6108 donde reacciona con sosa cáustica para la producción de hipoclorito de sodio.

Cualquier condensado clorado que se pudiera generar dentro de las tuberías de conducción de cloro gaseoso son derivadas hacia el sistema de dechloración de salmuera.

La sosa cáustica (32%) producida por los diferentes electrolizadores (R-2110, R-2210, R-2310) fluye por gravedad a un colector general único desde donde es conducida hacia el enfriador E-5102 para enfriarla hasta una temperatura menor o igual a 40°C antes de ingresar al tanque de sosa cáustica 32 % T-5104, cuya capacidad útil es 2800 litros aproximadamente. El caudal de agua de enfriamiento (verificable a través del FI-5102) debe ajustarse para mantener la temperatura dentro del rango anteriormente indicado, siendo este de unos 5700 l/h.

La bomba P-5106 bombea la sosa producida hacia los diferentes puntos de utilización, siendo el principal consumo el sistema de dilución sosa para el sistema de absorción de cloro.

Las bombas dosificadoras P-1109, P-1902 y P-1903 satisfacen la demanda de los pequeños consumos asociados con ajustes de pH.

El nivel del tanque T-5104 es controlado automáticamente mediante el lazo de control LIC-5104, que toma acción sobre la bomba dosificadora P-5104, que alimenta sosa al 50% desde los tanques de almacenaje.

El hidrógeno que se obtiene de cada electrolizador pasa por sus respectivos sellos de hidrógeno (H-2113, H-2213, H-2313) y es liberado a la atmósfera a través de chimeneas.

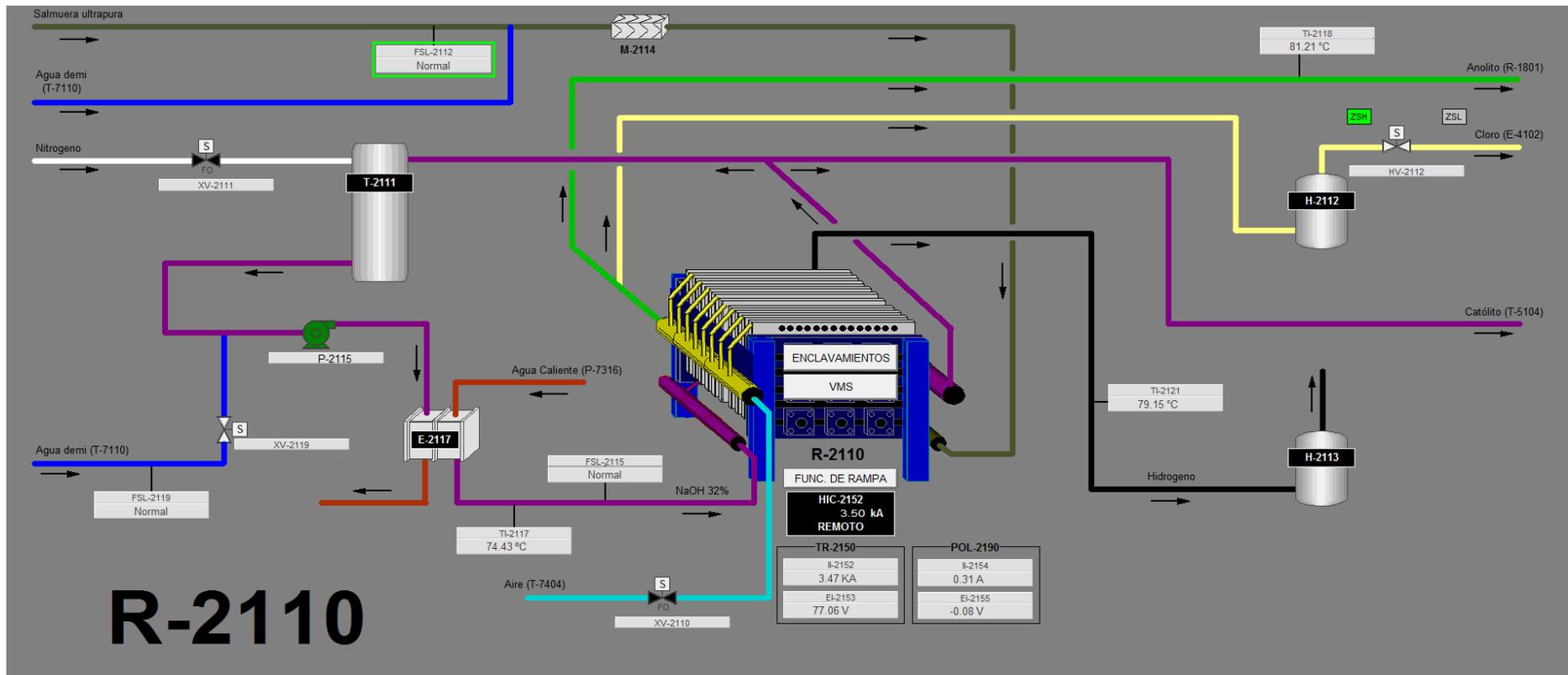


Figura 7: Diagrama de flujo del electrolizador R-2110. (SCADA)

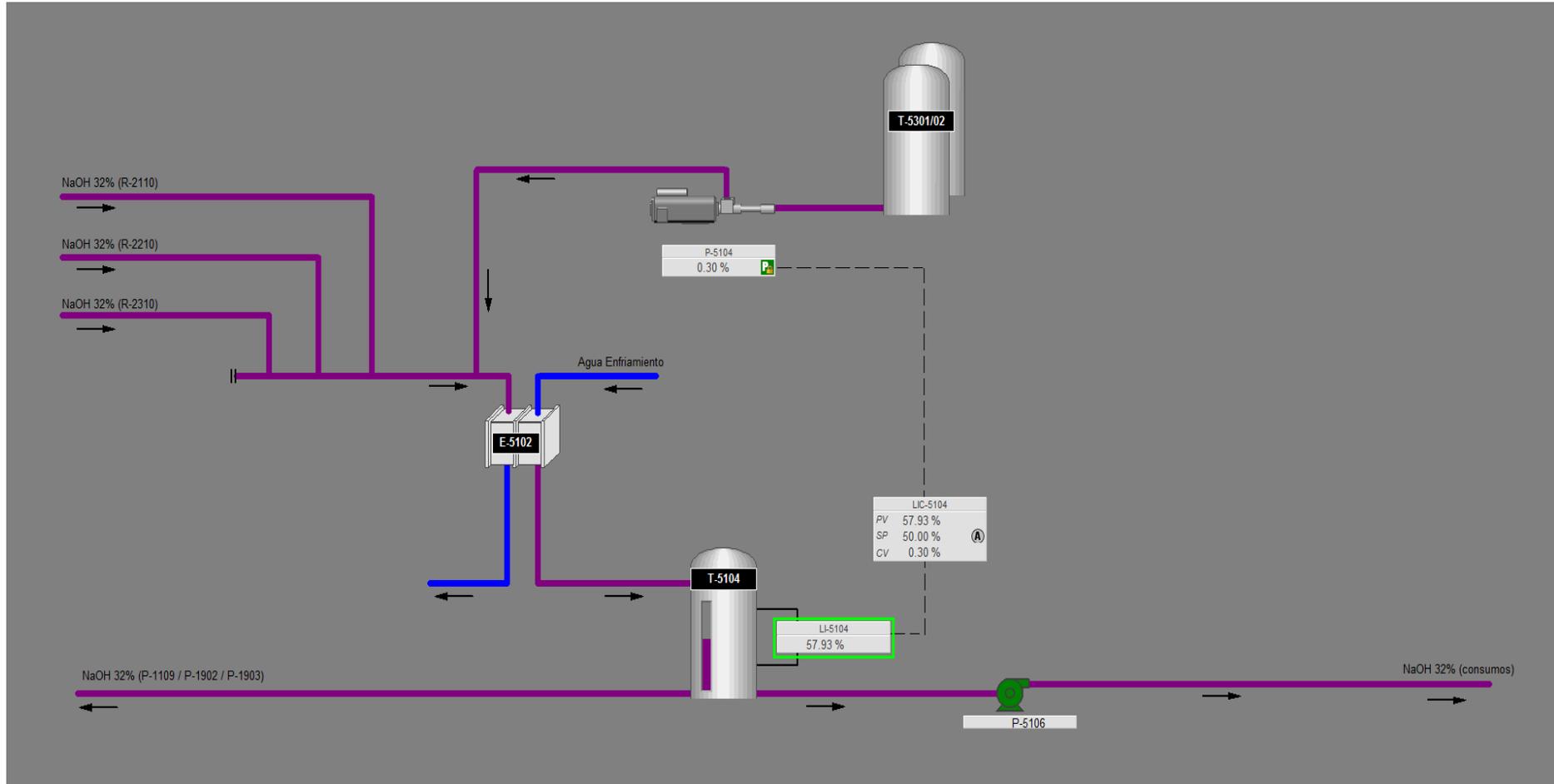


Figura 8: Diagrama de flujo del circuito de sosa cáustica. (SCADA)

- **Sistema de NaClO:**

La torre de hipoclorito funciona en forma continua y automática. Consiste en un reactor (columna empacada) R-6108 donde la corriente gaseosa de cloro húmedo se pone en contacto, en contracorriente, con una mezcla compuesta por sosa cáustica diluida en hipoclorito de sodio.

La corriente gaseosa de cloro, que es alimentada al reactor a través de un distribuidor interno instalado en la sección lateral inferior del reactor, asciende a través del empaque y reacciona con la sosa cáustica que fluye en contracorriente. De esta forma, la corriente de hipoclorito de sodio generado en el reactor R-6108 fluye por gravedad hacia el tanque de recepción T-6110. Una fracción de ese hipoclorito de sodio es derivada al mismo tanque, pero a través de un sensor de ORP (potencial de óxido-reducción o redox) el cual da una indicación del exceso de sosa cáustica existente en el hipoclorito producido.

El hipoclorito de sodio del tanque de recepción T-6110 es tomado por la bomba P-6112 y bombeado a través del enfriador E-6114 para remover el calor liberado por la reacción a los efectos de mantener una temperatura adecuada del hipoclorito producido para garantizar una mayor estabilidad del producto. La mayor parte del hipoclorito enfriado (aproximadamente un 90%) que sale del intercambiador es recirculado al reactor ingresando a través de un distribuidor instalado en la sección lateral superior, mientras que el resto de la corriente de hipoclorito (que representa la producción de hipoclorito) es evacuada automáticamente del sistema por el lazo de control LIC-6110 y enviada a los tanques de almacenaje de hipoclorito de sodio, este lazo de control mantiene controlado el nivel del tanque T-6110. El caudal recirculado al reactor se regula manualmente a un valor comprendido entre 30 y 36 m³/h a través del rotámetro FI-6118.

Los gases efluentes (compuestos principalmente por aire y otros gases inertes) que abandonan el reactor R-6108, ingresan directamente al lavador final de gases (scrubber) C-6106 por la parte inferior del mismo y su finalidad es neutralizar con sosa cáustica cualquier residual de cloro gas que aún puede permanecer en la corriente de gases efluentes que sale del reactor principal.

El scrubber C-6106 es una columna empacada donde los gases residuales son puestos en contacto, en contracorriente, con la sosa cáustica diluida fresca que ingresa por la parte superior del mismo, alimentada continuamente desde el sistema de dilución de sosa.

La sosa cáustica diluida que abandona el scrubber por su parte inferior se mezcla con el hipoclorito recirculado en la parte superior del reactor principal, en tanto los gases residuales lavados son succionados por el ventilador K-6116 cuya finalidad es mantener todo el sistema de absorción de

cloro bajo una leve presión negativa respecto de la presión atmosférica. El aire residual que abandona la unidad es continuamente monitoreado para asegurar que el contenido de cloro residual se mantiene dentro de valores aceptables (menor a 1 ppm en operación normal).

El tanque elevado de sosa diluida T-6104 se mantiene siempre lleno y rebosando continuamente hacia el scrubber. Este es alimentado desde el sistema de dilución de sosa que se describe a continuación y que opera en forma totalmente automática:

- La sosa cáustica al 32% es continuamente alimentada al sistema de dilución desde la bomba P-5106. La cantidad alimentada dependerá de la demanda del proceso de absorción de cloro y es controlada por el lazo de control AIC-6117, el cual controla y mantiene siempre el exceso de sosa cáustica requerido para mantener la estabilidad del hipoclorito producido. Un sensor de ORP mide continuamente el potencial redox del hipoclorito producido y actúa sobre la válvula de control AV-6117.
- La sosa cáustica al 32% se diluye mediante el agregado de agua desmineralizada. La concentración de la sosa diluida dependerá de la concentración del hipoclorito de sodio que se desea obtener. Si se pretende lograr un hipoclorito de menor concentración, debe alimentarse sosa más diluida. Al contrario, si se pretende aumentar la concentración del hipoclorito producido, debe alimentarse una solución más concentrada sosa cáustica. El lazo de control AIC-6102 controla la densidad (que es una medida indirecta de la concentración) de la sosa cáustica diluida que es enviada al scrubber C-6106 actuando sobre la válvula de control AV-6102. Para la medición de la densidad se utiliza el caudalímetro másico AE/T 6102.

El hipoclorito de sodio producido es almacenado en tanques de 50 m³, fabricados en PRFV y denominados T-6201, T-6202, T-6203, T-6204.

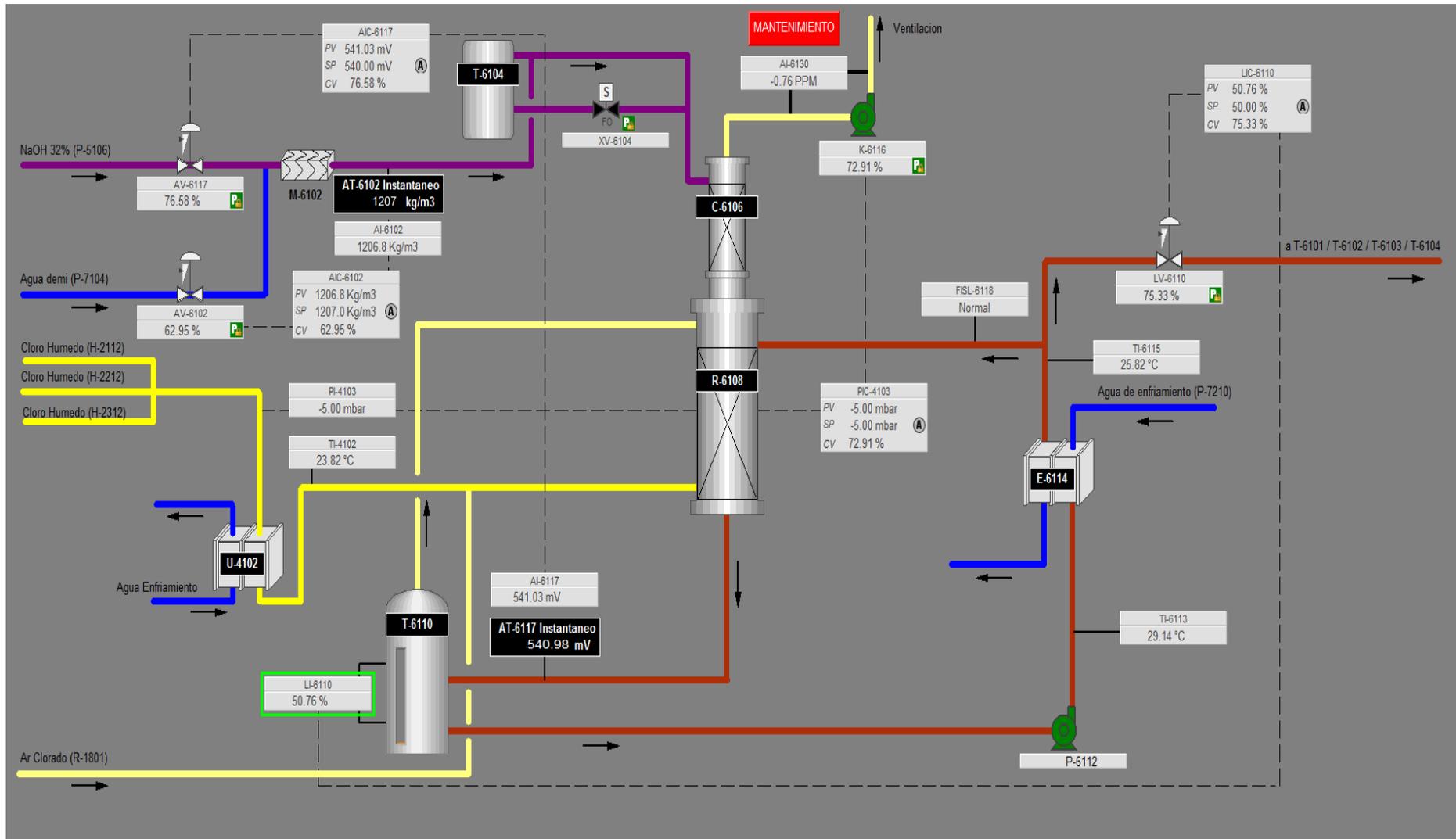


Figura 9: Diagrama de flujo del sistema de hipoclorito de sodio. (SCADA)

- **Declaración:**

La unidad de declaración física de salmuera tiene como objetivo eliminar la mayor cantidad posible del cloro que se encuentra disuelto en la salmuera agotada para no contaminar la salmuera que se prepara en el saturador ya que las membranas son muy sensibles al cloro y puede causar su ruptura.

La corriente de anolito fluye por gravedad desde los compartimientos anódicos de las celdas electrolíticas hacia la parte superior del reactor R-1801. También fluye por gravedad a este punto los condensados clorados provenientes del enfriador de cloro E-4102. Antes de ingresar al reactor, esta mezcla de anolito y condensados es acidificada mediante el agregado de ácido clorhídrico, con el objetivo de mantener un valor de pH cercano a 2 (rango típico 2 a 2,2). El agregado de ácido clorhídrico se efectúa de forma automática mediante lazo de control de pH AIC-1804. Este lazo de control mide el valor de pH del anolito que sale del reactor R-1801 y toma acción sobre la bomba dosificadora P-1804, la cual toma ácido desde el tanque T-1610.

El reactor R-1801 consiste en una columna empacada de CPVC con relleno de PVDF donde el anolito acidificado que ingresa a un distribuidor superior desciende por gravedad y se pone en contacto en contracorriente con aire que asciende desde el reactor inferior (R-1802), el cual se encuentra ubicado exactamente debajo de la primera columna empacada.

El anolito parcialmente declorado que abandona la columna empacada (reactor R-1801) fluye por gravedad e ingresa en el reactor inferior (R-1802) través de una tubería externa que conecta ambos reactores.

En el reactor inferior el aire para la declaración se inyecta a través de dos distribuidores inferiores para poner en contacto el aire con el anolito que proviene del reactor R-1801, así se produce una segunda etapa de contacto aire/anolito. El rotámetro FI-1801 permite medir el caudal de aire inyectado, el cual debe ser 55 Nm³/h.

El aire efluente que abandona el reactor R-1801 contiene cloro y por lo tanto no puede ser venteadado a la atmósfera, por lo que es conducido hacia el sistema de absorción de cloro con sosa cáustica.

El anolito (salmuera agotada) físicamente declorado que abandona el reactor inferior R-1802 aún tiene un contenido de cloro disuelto del orden de las 20 ppm y un valor de pH muy bajo, aproximadamente 2. En estas condiciones, la salmuera agotada no puede ser alimentada directamente al saturador y por lo que se requiere de una segunda etapa de declaración de tipo

química, la cual consiste en la adición de un agente reductor (sulfito de sodio al 5%) que reacciona con el cloro residual.

Este anolito físicamente declorado sale por la parte inferior del reactor R-1802 y fluye por gravedad hacia el mezclador M-1902. Antes de ingresar al mezclador se produce una adición automatizada de sosa cáustica (NaOH) 32%, mediante el lazo de control de pH AIC-1902, el cual actúa sobre la bomba dosificadora P-1902. El objetivo de esta adición es elevar el pH del anolito hasta un valor comprendido dentro del rango 4 - 6. La inyección de aire al mezclador debe ser de 5 Nm³/h y se ajustará mediante rotámetro FI-1901.

La medición del pH de la mezcla se efectúa a la salida del mezclador y antes de ingresar al tanque reactor R-1904. Este tanque también se mantiene bajo agitación mediante la inyección de aire, cuyo caudal es ajustado mediante rotámetro FI-1905, aproximadamente 10 Nm³/h.

El aire efluente que abandona el mezclador M-1902 y el tanque reactor R-1904 contiene cloro y por lo tanto no puede ser venteado a la atmósfera. Ese aire efluente es conducido hacia el sistema de absorción de cloro con sosa cáustica junto con el aire efluente que abandona el reactor R-1801.

El nivel de este tanque reactor R-1904 se mantiene controlado automáticamente mediante el lazo de control de nivel LIC-1904 que toma acción sobre la válvula de control LV-1904, enviando la salmuera agotada declorada hacia el saturador. Es la bomba centrífuga P-1906 la que toma la salmuera agotada del tanque reactor R-1904 y la bombea hacia el saturador. En la línea de succión de esta bomba se producen la adición de sosa cáustica y de sulfito de sodio con el objetivo de elevar el pH y de eliminar las últimas trazas de cloro libre presentes en la salmuera. La adición de estos químicos se efectúa en forma automática mediante lazos de control de pH AIC-1903, que actúa sobre la bomba dosificadora de sosa cáustica P-1903, y de ORP AIC-1904, que actúa sobre la bomba dosificadora de bisulfito de sodio P-1904.

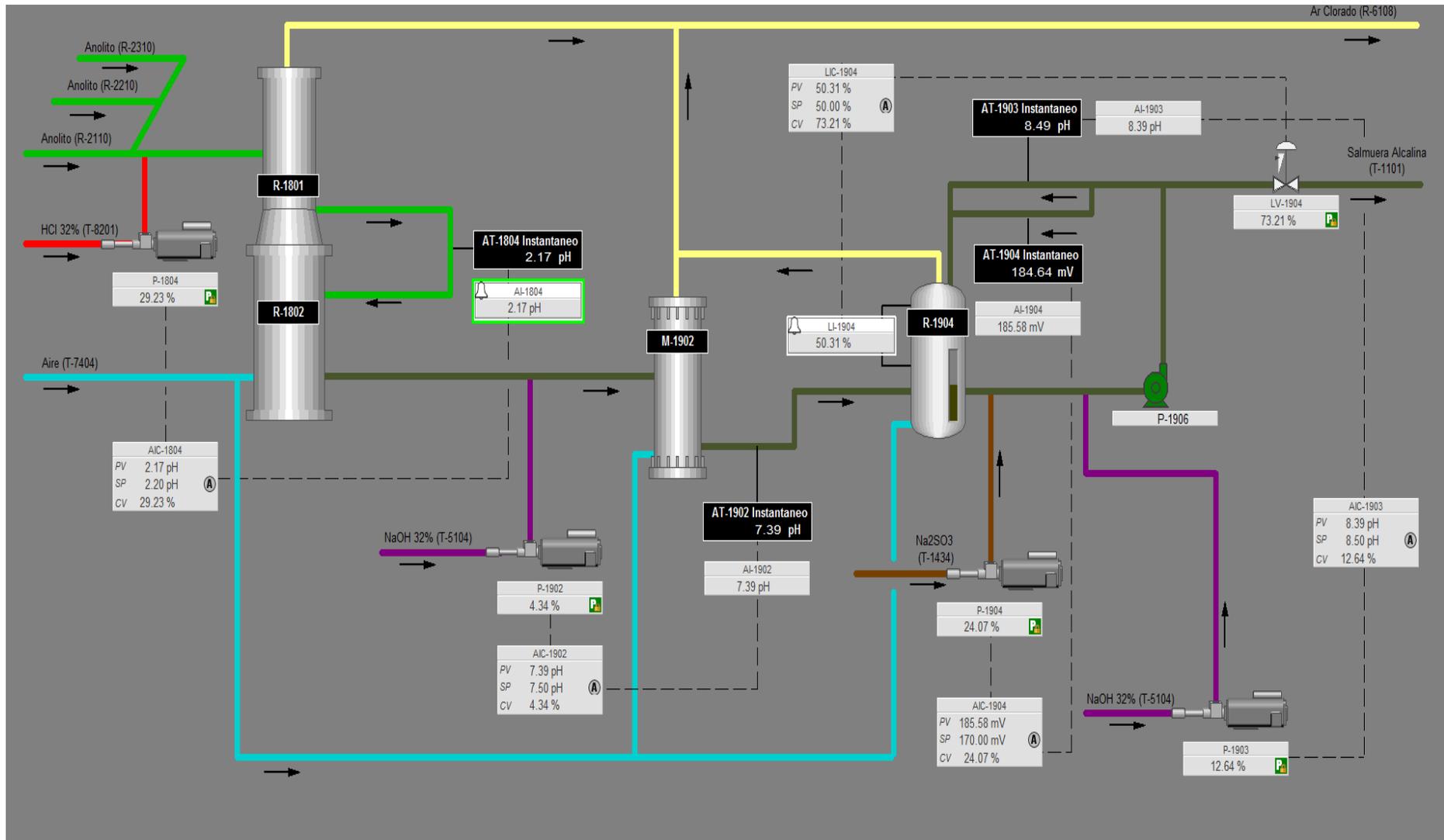


Figura 10: Diagrama de flujo de la unidad de dechloración. (SCADA)

5.2. Identificación de los KPI

La identificación de un KPI está muy ligado a los objetivos planteados por la empresa y hacia donde se quiere ir, de ahí que resulta de vital importancia establecer una estrategia como punto de partida (Figura 11).

Para generar un KPI resulta necesario conocer bien el proceso de producción, así como su operación y gestión. Al mismo tiempo se debe ir analizando la disponibilidad de la información, es decir, la instrumentación que existe en el proceso, el histórico disponible y el formato en el que se encuentra.

Una vez realizado este procedimiento se establecen los KPIs necesarios y se determina la forma de calcularlos. Algunos pueden ser calculados sin mayor dificultad e incluso coinciden con algunas métricas, sin embargo, otros no se pueden calcular por falta de información, generalmente vinculada a la falta de automatización de medida en el proceso, por lo que se hace necesario realizar una lista de inversión a corto o mediano plazo para la instalación de instrumentación.

Definidos los KPIs y cómo calcularlos se procede a la implementación del cuadro de mando, con el cual se podrá analizar si los resultados obtenidos van acorde al plan trazado o es necesario realizar algunas modificaciones para conseguirlo.

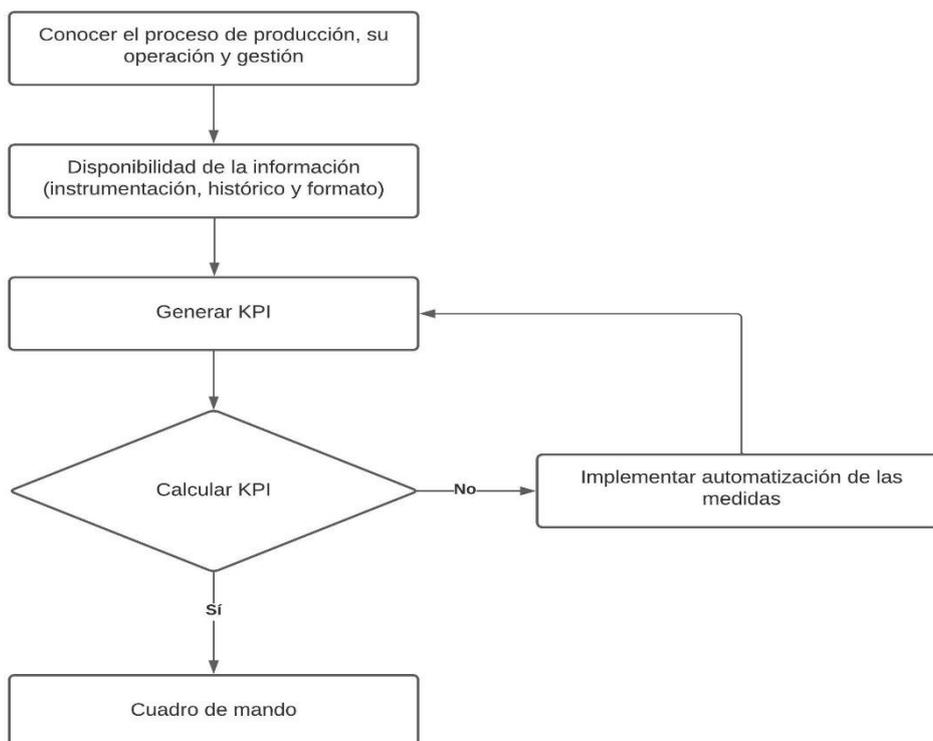


Figura 11: Estrategia de implementación de KPI.

5.2.1. Conocer el proceso de producción, su operación y gestión.

La planta de producción de hipoclorito de sodio se encuentra en funcionamiento las 24 horas del día, los 365 días del año, excepto durante las paradas de mantenimiento programadas en los meses de mayo y noviembre o en alguna parada no programada por problemas muy puntuales.

Al realizar un estudio del proceso se ha detectado que existen parámetros críticos en la operación, entre los que se encuentran:

- Caudal de alimentación de salmuera.
- Pureza de la salmuera de alimentación.
- Concentración de la salmuera de alimentación.
- Concentración de anolito.
- pH del anolito.
- Concentración de sulfatos y cloratos en el anolito.
- Temperatura de la salmuera de alimentación y del anolito.
- Caudal y concentración de alimentación de catolito.

Además, es de gran importancia la relación entre el consumo de las materias primas y el producto final, pudiendo determinar la eficiencia del proceso y si es necesario actuar sobre el para maximizar su rendimiento.

Otro aspecto para tener en cuenta es la preservación de las membranas de las celdas donde ocurre la electrólisis, siendo un elemento clave en el proceso. De hecho, todo el tratamiento que se le realiza a la salmuera es con el objetivo de proteger a las membranas ya que son muy sensibles a impurezas como Ca, Mg, Sr, Ba, SO₄, I, Al, Si, Fe, Ni, Mn, etc., acortando su vida útil y llegando a ocasionar agujeros en las mismas.

5.2.2. Disponibilidad de la información.

La empresa dispone de una gran variedad de datos, disponibles desde hojas de cálculo Excel hasta bases de datos Access. La toma de datos se distribuye de la siguiente forma:

- Sistema de control (SCADA): se registran los valores obtenidos de la instrumentación instalada en planta.
- Access Registro de Datos: los operarios disponen de una base de datos donde registran las variables de operación, algunos análisis de laboratorio, el tratamiento de efluentes y los servicios auxiliares del proceso.

- Access Celdas: se registra todo lo relacionado con las celdas de los electrolizadores, es decir, fecha de alta y baja de una membrana, un cátodo o un ánodo, etc.
- Access Pedidos: se registran las toneladas de hipoclorito de sodio vendidas, así como número de cisternas y clientes.
- Laboratorio: se registran todas las analíticas realizadas.
- Balance de materia: se toman los datos para realizar el balance, entre ellos, las materias primas consumidas, el producto obtenido, se realiza una comparación entre lo esperado y la producción real, entre otros.
- Regeneraciones: se registran las regeneraciones realizadas al tren de agua desmineralizada y a las columnas de intercambio iónico.
- Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO): aquí se encuentra todo lo vinculado al mantenimiento de la planta (incidencias, mantenimiento preventivo y correctivo, etc).

La gran mayoría de los datos poseen un histórico desde que comenzó a funcionar la planta, sin embargo, del SCADA sólo se dispone de los últimos seis meses.

Con el objetivo de organizar los datos que se registran en la empresa se realizó una tabla en Excel (Figura 12), separándolos según su procedencia.

Una vez organizados, se detectó que había una serie de datos que se encontraban en la base de datos Access como en el SCADA o en el Balance de materia. Además, en el Access Registro de Datos existía un mismo dato que se registraba varias veces debido a que variaba su nombre. De ahí la importancia de organizar la información y ver los datos que se repiten para su posterior eliminación.

DESCRIPCIÓN	CÓDIGO	TAG	TIPO	FRECUENCIA	ALMACENAMIENTO	ANTIGÜEDAD	OBSERVACIONES
Nivel T-7102	01111	LG-7102	VISUAL	Cada 3 horas, comenzando a las 8:00	Access Registro de Datos	02/10/2019	
Conductividad TM-7101	01112	TM-7101	LABORATORIO	Cada 3 horas, comenzando a las 8:00	Access Registro de Datos	02/10/2019	
Condición de Operación TREN A	01121		VISUAL	Depende del funcionamiento	Access Registro de Datos	02/10/2019	
Volumen mostrado en contador TREN A	01122		VISUAL	Depende del funcionamiento	Access Registro de Datos	02/10/2019	
Caudal agua bruta TREN A	01123	FI-7150 A	VISUAL	Depende del funcionamiento	Access Registro de Datos	02/10/2019	
Condición de Operación TREN B	01131		VISUAL	Depende del funcionamiento	Access Registro de Datos	02/10/2019	
Volumen mostrado en contador TREN B	01132		VISUAL	Depende del funcionamiento	Access Registro de Datos	02/10/2019	
Caudal agua bruta TREN B	01133	FI-7150 B	VISUAL	Depende del funcionamiento	Access Registro de Datos	02/10/2019	
pH Agua Desmineralizada	01141		VISUAL	Cada 1 hora, depende del tren en funcionamiento	Access Registro de Datos	02/10/2019	Próxima programación en Scada
Conductividad Agua Desmineralizada	01142		VISUAL	Cada 1 hora, depende del tren en funcionamiento	Access Registro de Datos	02/10/2019	Próxima programación en Scada
Presión de Suministro Agua enfriamiento	01211	PI-7210	VISUAL	No se registra			NO SE MIDE
Conductividad Agua enfriamiento	01212		LABORATORIO	Cada 6 horas, comenzando a las 8:00	Access Registro de Datos	02/10/2019	
Temperatura Suministro Agua enfriamiento	01213	TI-7202	VISUAL	Cada 6 horas, comenzando a las 8:00	Access Registro de Datos	02/10/2019	
Temperatura Retorno Agua enfriamiento	01214	TI-7204	VISUAL	Cada 6 horas, comenzando a las 8:00	Access Registro de Datos	02/10/2019	
Salto Térmico Agua enfriamiento	01215		VISUAL	Cada 6 horas, comenzando a las 8:00	Access Registro de Datos	02/10/2019	
NaClO Agua enfriamiento	01216		LABORATORIO	Cada 6 horas, comenzando a las 8:00	Access Registro de Datos	02/10/2019	
ph Agua enfriamiento	01217		LABORATORIO	Cada 6 horas, comenzando a las 8:00	Access Registro de Datos	02/10/2019	
Nivel T-9102	01311	LG-9102	VISUAL	Depende del funcionamiento	Access Registro de Datos	02/10/2019	Tanque de efluentes
Condición de Operación T-9102	01312		VISUAL	Depende del funcionamiento	Access Registro de Datos	02/10/2019	
pH T-9102	01313	AI-9103	SCADA	Depende del funcionamiento	Access Registro de Datos	02/10/2019	Se observa sólo para el vertido
Nivel T-9112	01321	LG-9112	VISUAL	Depende del funcionamiento	Access Registro de Datos	02/10/2019	Tanque de efluentes
Condición de Operación T-9112	01322		VISUAL	Depende del funcionamiento	Access Registro de Datos	02/10/2019	
pH T-9112	01323	AI-9113	SCADA	Depende del funcionamiento	Access Registro de Datos	02/10/2019	Se observa sólo para el vertido
Caudal efluente a disposición FI-9120	01331	FI-9120		No se registra			NO SE MIDE
Temperatua entrada U-7301	01411	TI-7301	VISUAL	Cada 6 horas, comenzando a las 8:00	Access Registro de Datos	02/10/2019	Calentador eléctrico

Figura 12: Ejemplo de tabla para la organización de la información.

5.2.3. *KPI identificados.*

Después de analizar el proceso y organizada la información de la que se dispone, se procede a la identificación de los KPI, los cuales se corresponden con indicadores de producción, ya que son fundamentales para la parametrización del proceso. No se abordan los indicadores de tipo económico pues no son objetivo de este trabajo. Los KPI se han organizado en diferentes categorías en función de su naturaleza, quedando de la siguiente forma:

❖ **Vida útil de las membranas:**

• **Tiempo de instalación:**

Tiempo que transcurre desde que se instala la membrana hasta que se le da de baja. Se calcula dividiendo los días de instalación de la membrana entre los 365 días del año, siendo la referencia inferior de 2,5 años y la superior de 5 años.

• **Tiempo de funcionamiento:**

Tiempo que está en operación la membrana. El cálculo se realiza de la siguiente forma:

$$\text{Tiempo de Funcionamiento} = \frac{(\text{Días de instalación} - \text{Días de parada})}{365} \text{ [años]}$$

La referencia inferior para este indicador es de 2 años, mientras que la superior es de 4 años.

Entre las causas de desviación de ambos indicadores se encuentran:

- Desviación inferior: mal montaje de la celda y muchas paradas o arranques del electrolizador.
- Desviación superior: mejor operación del electrolizador.

❖ **Vida útil del ánodo/cátodo:**

• **Cloratos:**

Los cloratos indican el deterioro del coating del ánodo o el cátodo de las celdas. Su determinación se realiza en el laboratorio mediante la valoración óxido reducción por retorno y deben encontrarse entre 0 y 10 ppm. Por experiencia en otras industrias similares el coating de las celdas dura 8 años aproximadamente, una vez detectado que está deteriorado tendrán que ser enviadas para que les realicen el recouting.

- **Número de incidencias ánodo / cátodo:**

Incidencias totales registradas en el ánodo o cátodo de la celda que conllevan a darle de baja. Pueden estar provocadas por una detección tardía del deterioro de una membrana o por el desapriete de la tornillería de las celdas. Esto provoca que la celda sea retirada para su reparación o sustitución por una nueva.

- ❖ **Vida útil de las resinas de intercambio iónico:**

- **Frecuencia de regeneración de las resinas de intercambio iónico:**

Frecuencia con la que se regeneran las resinas de intercambio iónico. En dependencia del número de electrolizadores que estén en funcionamiento y de la carga a la que se esté trabajando la frecuencia de regeneración varía. Según el fabricante y la experiencia en otras industrias con similar capacidad de producción las resinas de intercambio iónico tienen una vida útil de 5 años.

La referencia para este indicador se muestra a continuación:

Tabla 1: Referencia para la frecuencia de regeneración de las columnas de intercambio iónico.

Cantidad de electrolizadores en funcionamiento	Carga media (kA)			
	3,2	3,5	4	4,2
	Frecuencia de regeneración (días)			
1	30	26	23	20
2	18	16	14	7
3	10	8	6	5

Sería necesario realizar un estudio económico para determinar hasta qué punto es rentable realizar la regeneración o sustituir directamente la resina agotada por una nueva.

La causa de desviación de este indicador es la colmatación de la resina de intercambio iónico.

- ❖ **Reacción de hipoclorito de sodio (NaClO):**

- **Rendimiento de la reacción de NaClO:**

Rendimiento de la reacción de NaClO a partir del volumen real de este respecto a las toneladas de cloro gas (Cl₂) producidas. El cálculo a realizar será:

$$\text{Rendimiento Reacción NaClO} = \frac{\text{Toneladas de NaClO producidas}}{\text{Toneladas de Cl}_2 \text{ teóricas}} \cdot 100 [\%]$$

El rendimiento de esta reacción se debe encontrar entre el 95 y 100%. Las causas de desviación de este indicador pueden ser una mala recirculación en la torre de hipoclorito o que no exista buen

contacto entre la lluvia de NaOH y el cloro gas debido a un mal funcionamiento de los aspersores de la torre.

❖ **Ratio de electricidad:**

- **Consumo eléctrico del Transformador-Rectificador (TR) por toneladas de Cl₂ gas producidas:**

Relación entre el consumo eléctrico de los TR y las toneladas de cloro gas producidas. Se determina de siguiente forma:

$$\text{Ratio TR} - \text{Cloro} = \frac{\text{Consumo eléctrico de los TR}}{\text{Toneladas de Cl}_2 \text{ producidas}} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{t de Cl}_2} \right]$$

El indicador debe encontrarse en el rango de 3100-3600 kWh/ton y la posible causa de desviación el desgaste del coating de la celda.

- **Energía eléctrica renovable por energía consumida:**

Energía aportada por las celdas fotovoltaicas con respecto a la energía consumida. El cálculo de este indicador es:

$$\text{Ratio E. Renovable} - \text{E. Consumo} = \frac{\text{Energía renovable}}{\text{Energía consumida}} \left[\frac{\text{kWh E. Renovable}}{\text{kWh E. Consumo}} \right]$$

La referencia para este indicador se encuentra entre 0,01 y 0,05.

❖ **Ratio de agua:**

- **Consumo de agua desmineralizada en regeneraciones por toneladas de NaClO producidas:**

Cantidad de agua desmineralizada destinada a las regeneraciones de las columnas de intercambio iónico y tren de agua desmineralizada por las toneladas de cloro gas producidas. Se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Ratio H}_2\text{O regenerac.} - \text{Cl}_2 = \frac{\text{Consumo H}_2\text{O desm. regenerac.}}{\text{Toneladas de Cl}_2 \text{ producidas}} \left[\frac{\text{m}^3 \text{ H}_2\text{O desm.}}{\text{t de Cl}_2} \right]$$

El indicador se debe encontrar en el rango de 0,05-0,20 m³/ton. Las causas de su desviación pueden ser el aumento o la disminución de la frecuencia de la regeneración de las resinas y que la sosa cáustica (NaOH) esté muy concentrada.

- **Consumo de agua desmineralizada por toneladas de NaClO producidas:**

Cantidad de agua desmineralizada destinada a la producción de NaClO. Para determinarlo se debe realizar el siguiente cálculo:

$$\text{Ratio } H_2O \text{ demi} - NaClO = \frac{\text{Consumo de } H_2O \text{ desmineralizada}}{\text{Toneladas de NaClO producidas}} \left[\frac{m^3 H_2O \text{ desm.}}{t \text{ de NaClO}} \right]$$

La referencia para este indicador se encuentra en el rango de 0,5-1,2 m³/ton y la causa principal de su desviación es que la NaOH se encuentre muy concentrada.

- ❖ **Ratio de sal:**

- **Consumo de NaCl en el saturador por toneladas Cl₂ producidas:**

Cantidad de sal depositada en el saturador por tonelada de cloro gas producida. Su forma de calcularlo será:

$$\text{Ratio sal saturador} - \text{cloro} = \frac{\text{Consumo de NaCl a Saturador}}{\text{Toneladas de Cl}_2 \text{ producidas}} \left[\frac{t \text{ de NaCl}}{t \text{ de Cl}_2} \right]$$

La referencia se encuentra en el rango de 1-2 y la causa de su desviación se encuentra en el aumento o la disminución de la purga del saturador.

- ❖ **Ratio sosa cáustica (base seca):**

- **Exceso de NaOH en el hipoclorito de sodio:**

Exceso de sosa presente en el hipoclorito de sodio. Se determina en el laboratorio mediante una valoración ácido base. La referencia para este indicador es que debe ser menor a 13 g/L para una concentración de hipoclorito de sodio de 170 g/L. Las causas de desviación de este indicador son que el sensor de ORP se descalibre y por lo tanto emita una señal errónea o que se congele la señal y el regulador se quede en un valor fijo.

- **Consumo de NaOH en regeneraciones por toneladas de Cl₂ producidas:**

Relación entre la NaOH consumida en las regeneraciones, tanto del tren de agua desmineralizada como en las columnas de intercambio iónico, y las toneladas de cloro gas producidas. Su forma de calcularla es la siguiente:

$$\text{Ratio NaOH regeneración} - Cl_2 = \frac{\text{Consumo NaOH regeneraciones}}{\text{Ton. de Cl}_2 \text{ producidas}} \left[\frac{m^3 NaOH}{t \text{ de Cl}_2} \right]$$

El rango para este indicador se encuentra entre 0,01-0,03 m³/ton. La principal causa de desviación es la realización de muchas regeneraciones debido a que la salmuera tiene una elevada dureza o el agua abastecimiento es de mala calidad.

5.3. Propuesta del cuadro de mando.

La siguiente propuesta de cuadro de mando se ha realizado con ayuda del software Power BI y se han utilizado datos reales de la empresa para tener una mejor representación de la situación actual. Se han incluido todos los indicadores identificados hasta el momento y en algunos casos se han añadido algunos cálculos que resultan interesantes a la hora del análisis y la toma de decisiones.

❖ Vida útil de las membranas:

Desde la puesta en funcionamiento de la planta se han cambiado 60 membranas. El tiempo medio de instalación se encuentra en los 3,47 años, mientras que el tiempo medio de funcionamiento está en los 2,65 años, estando ambos entre los límites de referencia. Las membranas se encuentran en funcionamiento un 75,65% como media desde su instalación (Figura 13). Para mejorar la vida útil de las membranas sería necesario que los electrolizadores no se arranquen y se detengan con mucha frecuencia, aunque esto depende en gran medida de la demanda de producto que se tenga y por otro lado que la salmuera ultrapura llegue en las mejores condiciones posibles a la membrana.

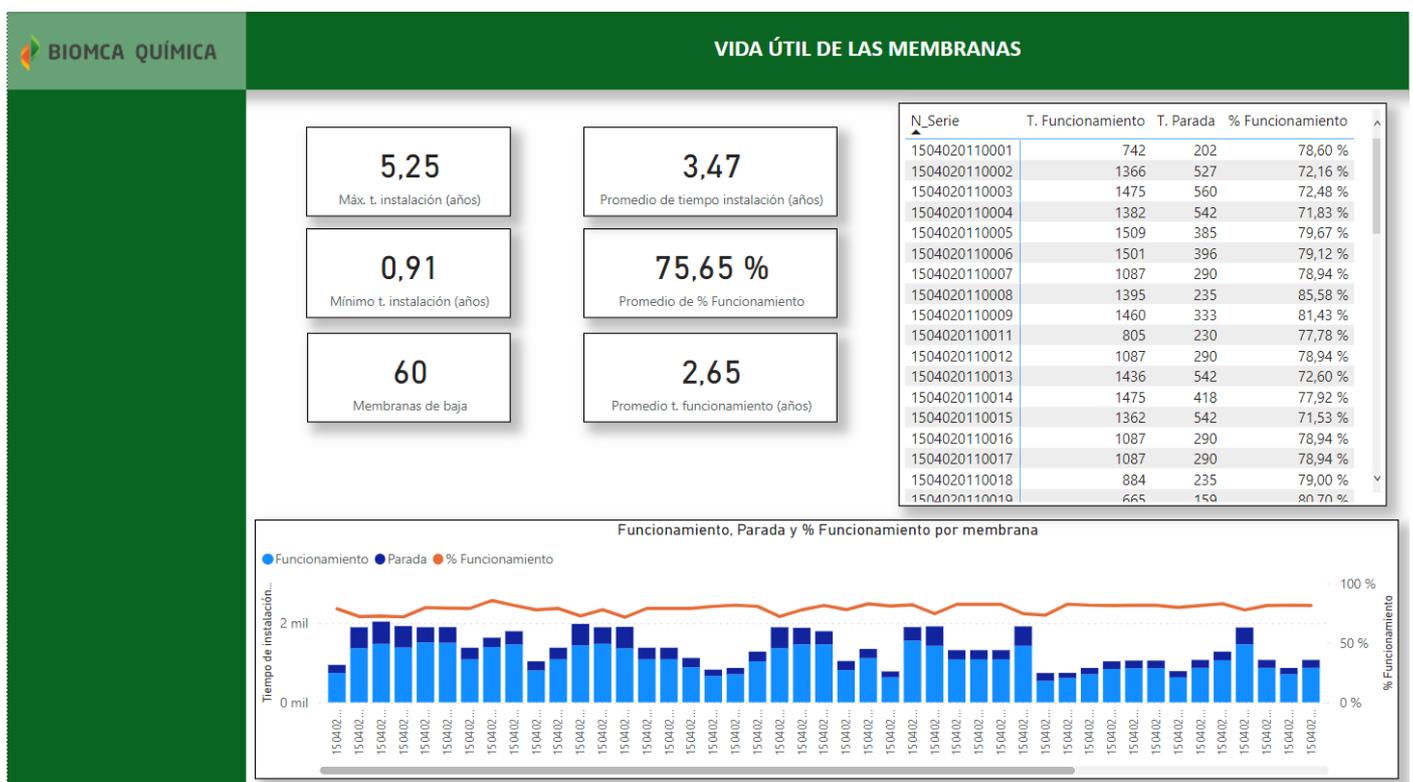


Figura 13: Cuadro de mando. Vida útil de las membranas.

❖ **Vida útil del ánodo/cátodo:**

Los cloratos en la salmuera agotada a la salida de los electrolizadores se encuentran dentro del rango de referencia (0-10 ppm), siendo el electrolizador R-2210 el que más variación presenta y el electrolizador R-2310 el más estable, resultado esperado al ser el último en instalarse (Figura 14). Este indicador refleja el deterioro del coating del ánodo/cátodo junto con el consumo eléctrico del electrolizador.

En total se han registrado 21 incidencias entre los ánodos y cátodos, provocadas fundamentalmente por la rotura de las membranas y el desapriete de la tornillería de las celdas.

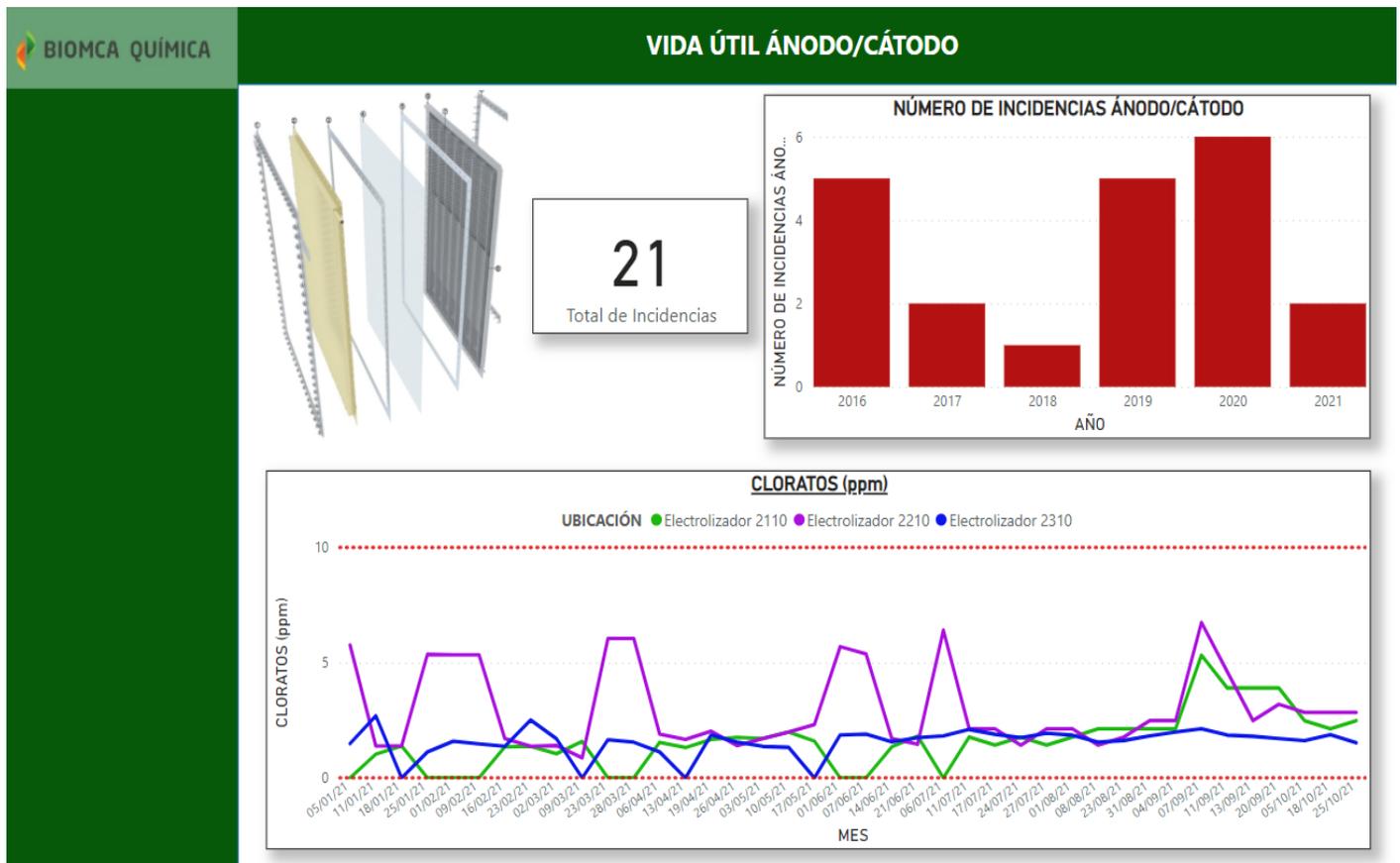


Figura 14: Cuadro de mando. Vida útil del ánodo/cátodo.

❖ **Vida útil de las resinas de intercambio iónico:**

La frecuencia de regeneración varía en función del número de electrolizadores y de la carga con la que se esté trabajando. Por cada regeneración se necesitan como media 10,05 m³ de agua desmineralizada, 0,38 m³ de HCl al 7% y 0,13 m³ de NaOH al 32%. Si tenemos en cuenta el consumo por tonelada de hipoclorito de sodio producido serían necesarios 28,17 L de agua desmineralizada, 1,06 L de HCl al 7% y 0,35 L de NaOH al 32%, encontrándose dentro de los

límites establecidos (Figura 15). Estos resultados sirven para realizar un balance económico y analizar en qué momento sería conveniente realizar el cambio de la resina ya que el gasto en su regeneración sería superior al coste de una resina nueva.

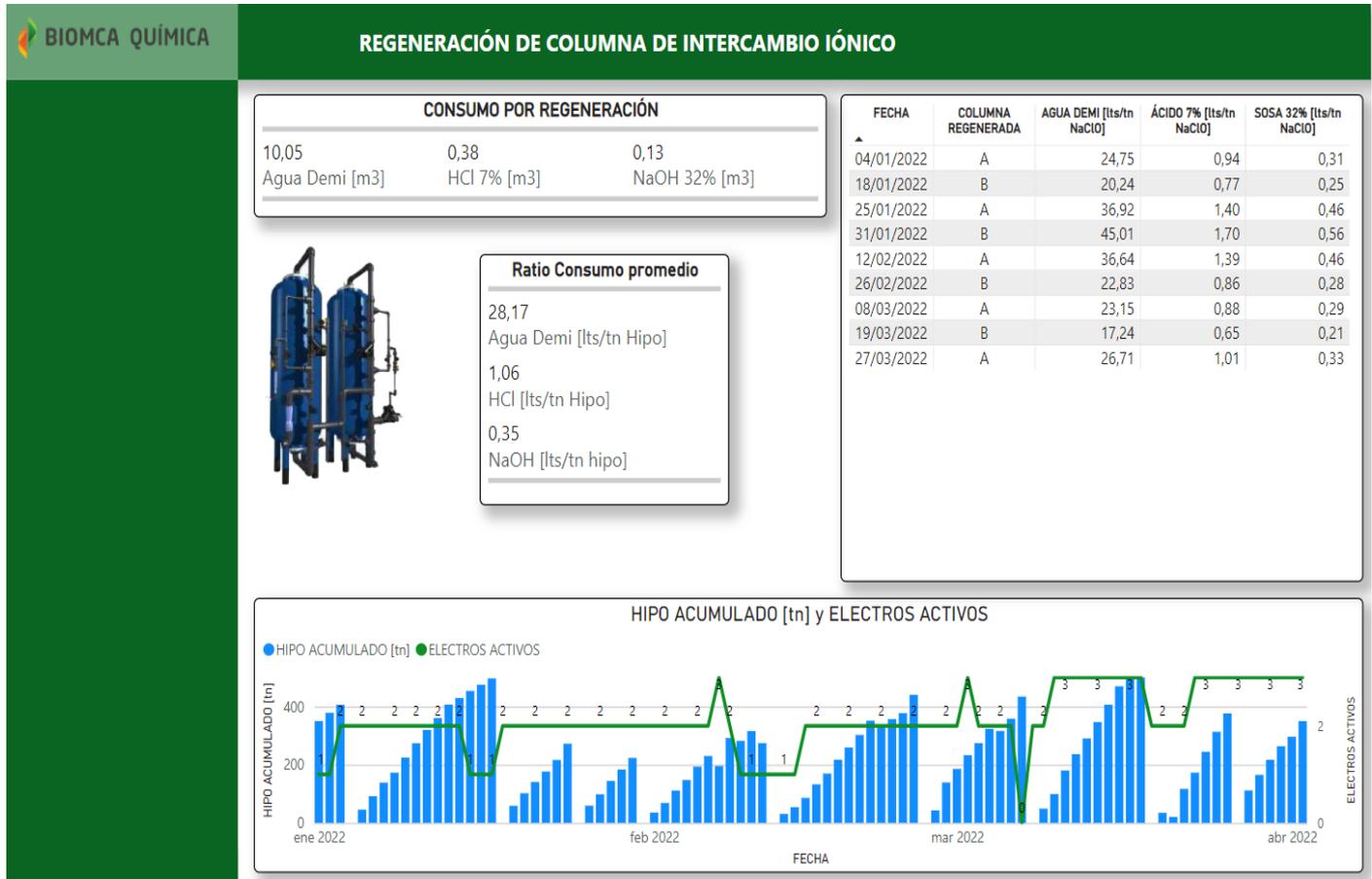


Figura 15: Cuadro de mando. Regeneración de intercambio iónico.

❖ **Reacción de hipoclorito de sodio (NaClO):**

El rendimiento de la reacción de hipoclorito de sodio está por encima del 95%, encontrándose en el rango deseado (95-100%) (Figura 16). Esto indica que la recirculación de la torre de hipoclorito es la adecuada y que está funcionando adecuadamente.

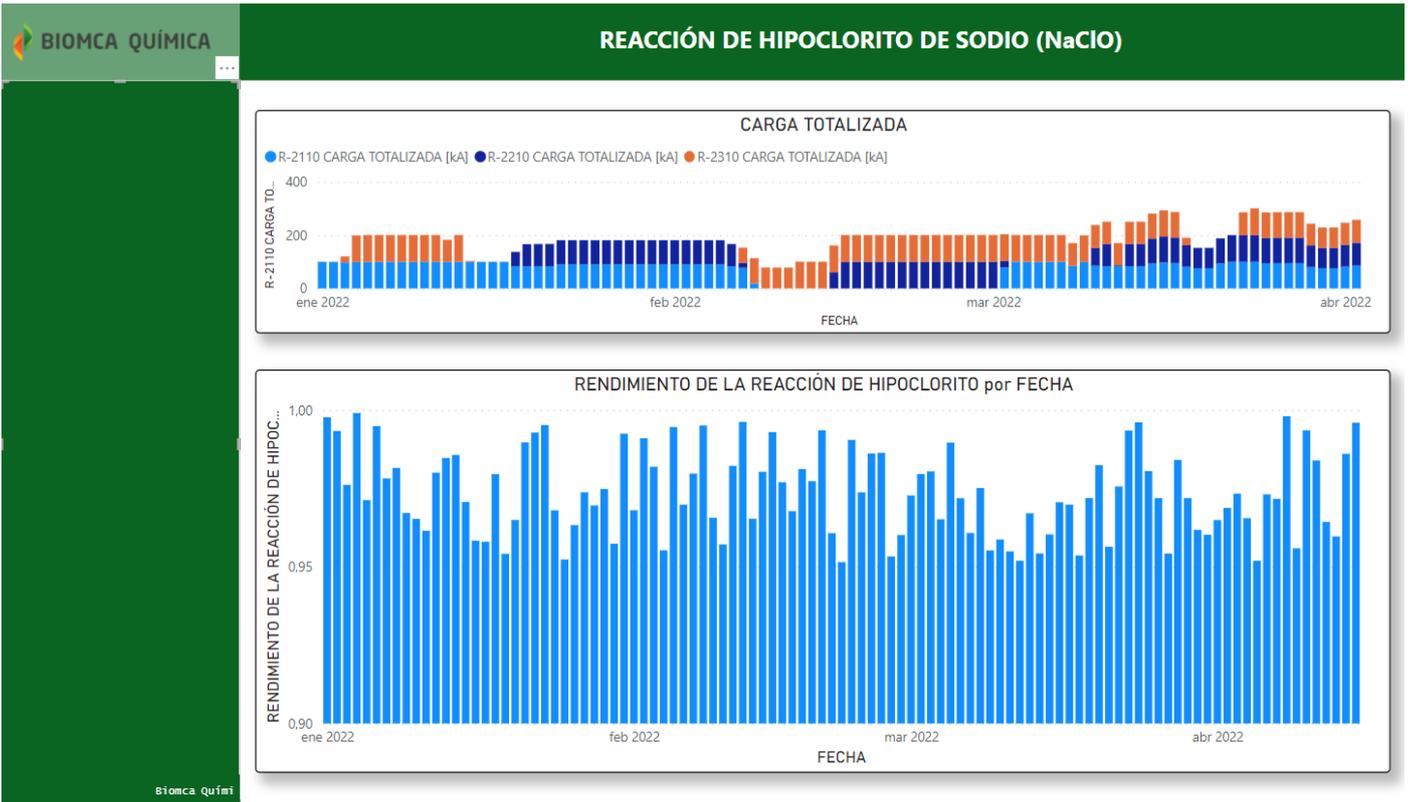


Figura 16: Cuadro de mando. Reacción de hipoclorito de sodio.

❖ **Ratio de electricidad:**

El consumo eléctrico constituye uno de los principales gastos de la empresa debido a que en el proceso de electrólisis se necesita electricidad para la producción de cloro gas.

Teniendo en cuenta los datos de la planta se puede observar en la Figura 17 que el consumo eléctrico del Transformador-Rectificador (TR) por toneladas de Cl₂ gas producidas permanece prácticamente constante en los 3400 kWh/ton Cl₂, encontrándose dentro del rango de operación adecuado. Cabe destacar que en la gráfica existen dos espacios en blanco que se deben a valores mal registrados en la toma de datos, de ahí la importancia de disponer datos fiables para su posterior análisis.

En el caso de la energía eléctrica renovable por energía consumida se puede apreciar que existe una mayor variación en los datos, sin embargo, se encuentra dentro de los límites de referencia. La energía eléctrica renovable procede de placas solares instaladas en las cubiertas de la empresa y su fluctuación se debe al cambio de las condiciones meteorológicas.

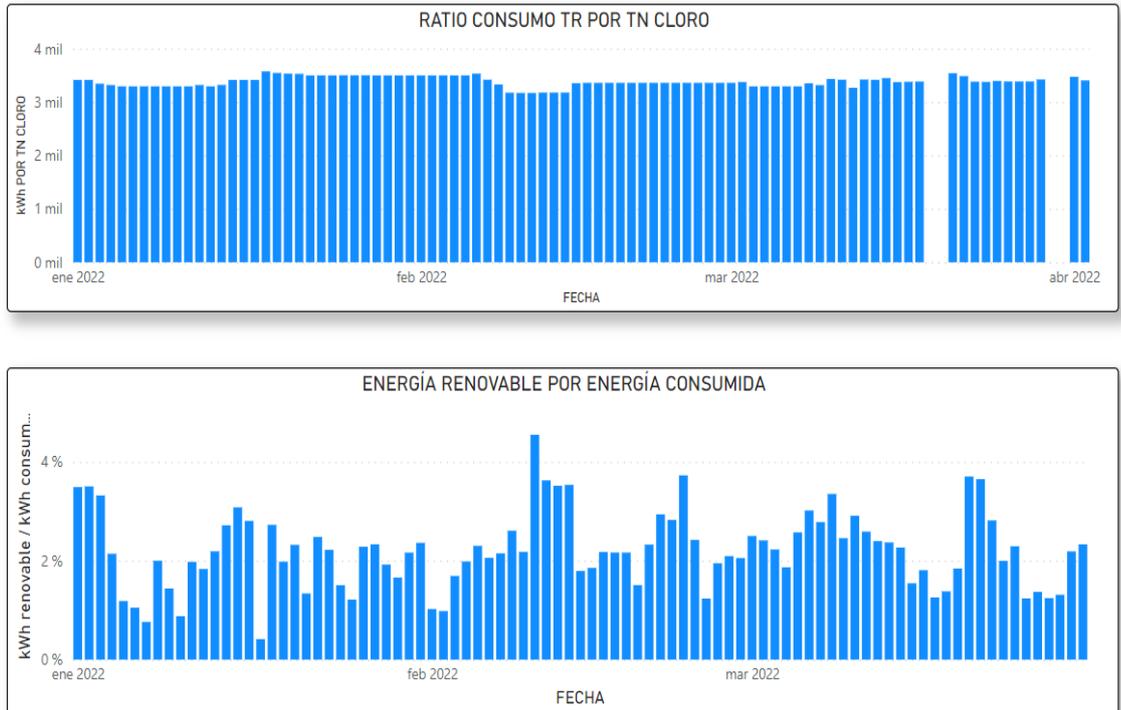


Figura 17: Cuadro de mando. Ratio de electricidad.

❖ **Ratio de agua:**

El consumo de agua desmineralizada en regeneraciones por toneladas de NaClO producidas se encuentra dentro del rango de referencia (0,05-0,20 m³/ton), siendo el valor promedio de 0,12 m³/ton. Se puede apreciar en la Figura 18 que existen días donde se consume más agua que en otros, esto puede estar condicionado por el proceso de enjuague de las columnas cuando se encuentra la sosa cáustica más concentrada ya que requiere mayor cantidad de agua, por dejar más tiempo del debido los pasos donde se utiliza el agua o por algún error cometido en algún paso de la regeneración y haya que comenzar desde el inicio la regeneración.

Por otra parte, el consumo de agua desmineralizada por toneladas de NaClO producidas tiene un valor promedio de 0,84 m³/ton y está dentro del rango deseado (0,5-1,2 m³/ton). El comportamiento es bastante estable y los máximos que se registran se deben al aumento de la concentración de la sosa cáustica.

0,12

Promedio m3 Agua Demi en Reg./ton NaClO

0,84

Promedio m3 Agua Demi/ton NaClO

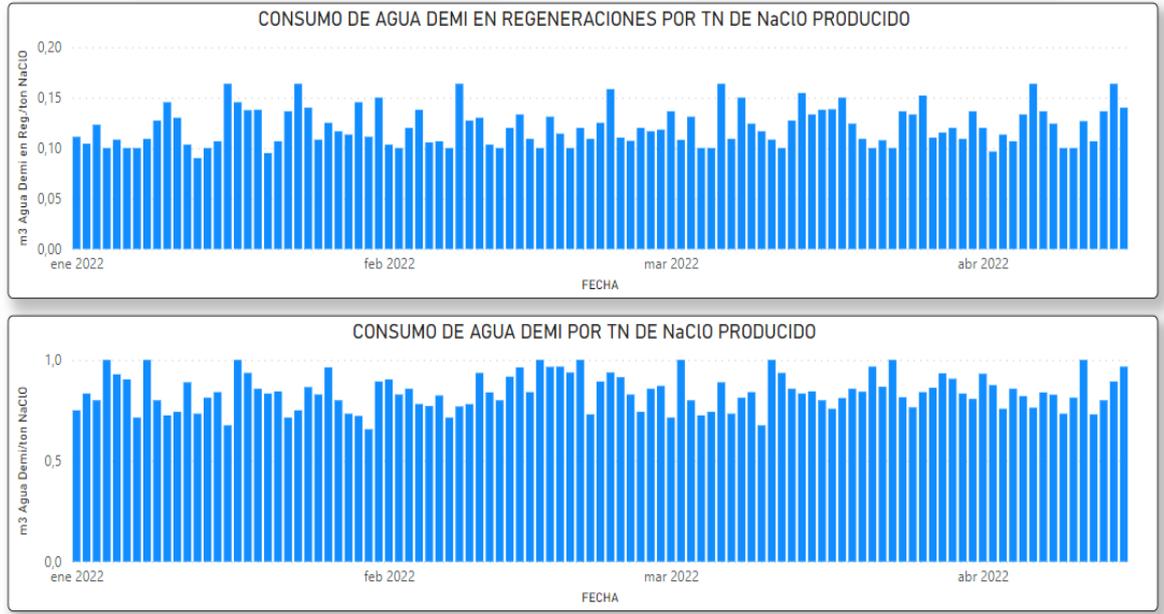


Figura 18: Cuadro de mando. Ratio de agua.

❖ **Ratio de sal:**

El consumo de NaCl en el saturador por toneladas Cl₂ producidas tiene un valor promedio de 1,80 ton NaCl/ton Cl₂ y se encuentra dentro del rango establecido (Figura 19). Cabe destacar que estos datos son estimaciones del peso de los sacos de sal que se depositan en el saturador ya que no existe en la planta ningún instrumento para su pesaje, de ahí las variaciones de estos. Otro factor que influye es la purga del saturador. Sería necesario disponer de un equipo para poder pesar los sacos de sal y de esta forma tener datos más fiables y precisos.

En cuanto al consumo de sal por toneladas de hipoclorito de sodio producido la media se encuentra en 0,24 ton NaCl/ton NaClO, siendo este un valor aproximado al ocurrir el mismo problema del pesaje de la sal.

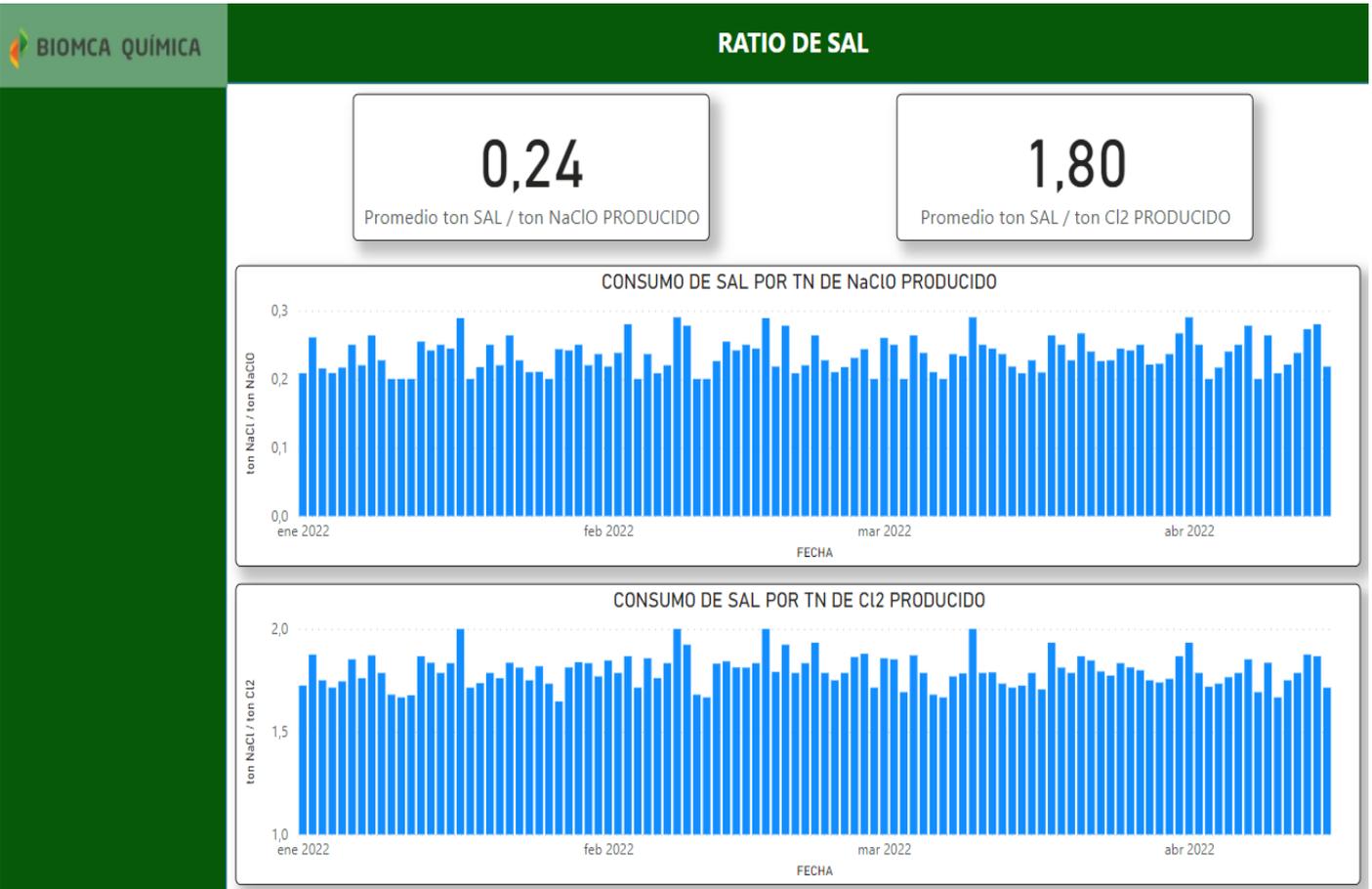


Figura 19: Cuadro de mando. Ratio de sal.

❖ **Ratio sosa cáustica (base seca):**

Las soluciones de hipoclorito de sodio son inherentemente inestables y comienzan a descomponerse desde el momento mismo en que se preparan y continúan haciéndolo hasta que están completamente descompuestas. Debido a esto son fabricadas y se mantienen siempre con un pequeño exceso de sosa cáustica (sosa libre o no reaccionada) con el fin de mantener la estabilidad del producto. El exceso de sosa promedio se encuentra en los 6,35 g/L, este valor se encuentra dentro de los límites establecidos (menor a 13 g/L) y se comporta de manera estable.

El consumo de NaOH en regeneraciones por toneladas de Cl₂ producidas se comporta de forma inestable, siendo su valor promedio de 0,02 m³/ton. Este indicador está dentro del rango deseado (0,01-0,03 m³/ton) (Figura 20) y sus fluctuaciones pueden estar causadas por la mala calidad del agua de abastecimiento, lo que conlleva a realizar mayor número de regeneraciones y además por dejar más tiempo del establecido los pasos que consumen sosa en las regeneraciones.

RATIO DE SOSA CÁUSTICA

6,35

Promedio de EXCESO DE NaOH (g/L)

0,02

Promedio m3 NaOH Reg/ton Cl2

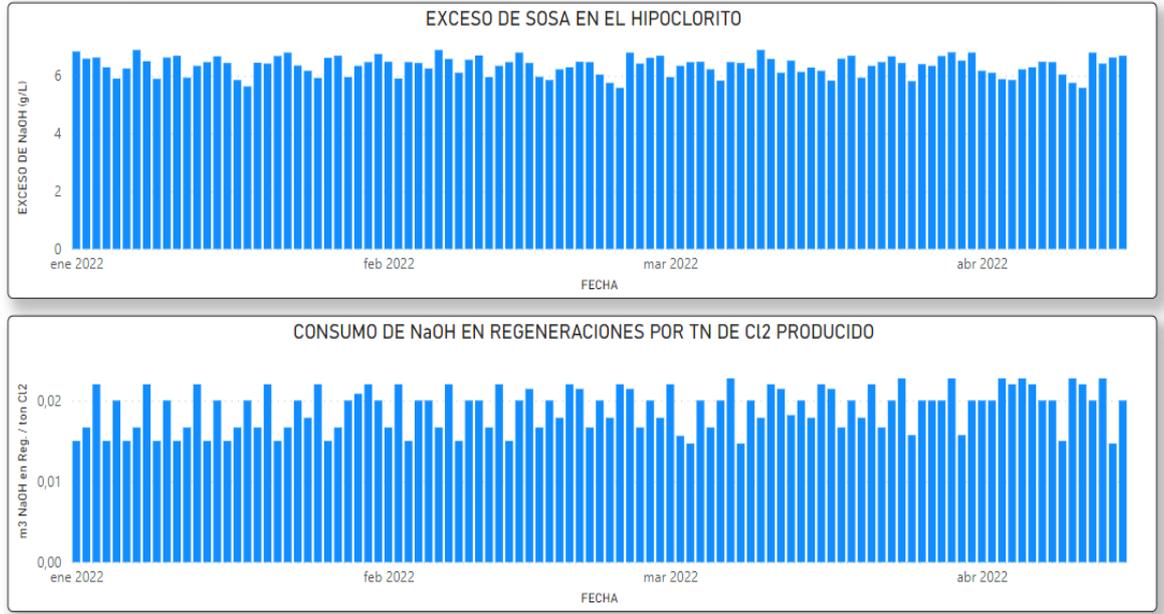


Figura 20: Cuadro de mando. Ratio de sosa cáustica.

6. Conclusiones

1. La electrólisis en celdas de membranas es la tecnología más respetuosa con el medio ambiente y la mejor técnica disponible para la producción de cloro en la actualidad.
2. Los indicadores claves de rendimiento deben ser específicos, medibles, alcanzables, relevantes y basados en el tiempo.
3. La toma de datos debe ser fiable para obtener indicadores que reflejen la realidad del proceso y se puedan tomar decisiones acertadas.
4. La implementación de instrumentación con automatización de las medidas permite obtener datos más precisos y establecer nuevos indicadores.
5. Los indicadores establecidos en la propuesta de cuadro de mando se encuentran dentro de los rangos establecidos, lo que indica una buena operación de la planta.
6. El cuadro de mando es flexible y puede ser modificado según las necesidades de la empresa.
7. El cuadro de mando es una potente herramienta para la gestión del proceso de producción, refleja la situación actual y permite la toma de decisiones para lograr los objetivos planteados.

Conclusions

1. Membrane cell electrolysis is the most environmentally friendly and best available technique for chlorine production today.
2. Key performance indicators must be specific, measurable, achievable, relevant, and time-based.
3. Data collection must be reliable in order to obtain indicators that reflect the reality of the process and the right decisions can be made.
4. The implementation of instrumentation with measurement automation allows obtaining more precise data and establishing new indicators.
5. The indicators established in the control panel proposal are within the established ranges, which indicates a good operation of the plant.
6. The scorecard is flexible and can be modified according to the needs of the company.
7. The scorecard is a powerful tool for managing the production process, it reflects the current situation and allows decisions to be made to achieve the objectives set.

7. Bibliografía

- Chlorine. <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.029.053> (consultada 20 de febrero de 2022).
- Cloro. <https://www.chemicalsafetyfacts.org/es/cloro/> (consultada 20 de febrero de 2022).
- Products of Chlorine. <https://trees.eurochlor.org/> (consultada 20 de febrero de 2022).
- Onandía de Dios, R. Retos de la industria cloro-álcali desde una perspectiva de ciclo de vida. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria, 2016. <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/8401/Tesis%20RODD.pdf?sequence=1> (consultada 20 de febrero de 2022).
- Noval Gómez, L. El cloro, producción e industria. Trabajo de Fin de Máster. Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2017. http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:master-Ciencias-CyTQ-Lnoval/Noval_Gomez_Lucia_TFM.pdf (consultado 21 de febrero de 2022).
- Generadores de cloro por electrólisis de salmuera con tecnología de célula con membrana. <https://www.tecnoaqua.es/articulos/20140328/procesos-sistemas-generadores-cloro-electrolisis-salmuera-tecnologia-celula-membrana-aquatracta#.YoPxhITMK3A> (consultada 5 de marzo de 2022).
- BREF. <https://en.prtr-es.es/Data/images//Resumen%20Ejecutivo%20BREF%20Cloro-sosa-3846CE248CD9F42E.pdf> (consultada 5 de marzo de 2022).
- Mercury cell process. <https://www.eurochlor.org/about-chlor-alkali/how-are-chlorine-and-caustic-soda-made/mercury-cell-process/> (consultada 5 de marzo de 2022).
- Diaphragm cell process. <https://www.eurochlor.org/about-chlor-alkali/how-are-chlorine-and-caustic-soda-made/diaphragm-cell-process/> (consultada 5 de marzo de 2022).
- Membrane cell process. <https://www.eurochlor.org/about-chlor-alkali/how-are-chlorine-and-caustic-soda-made/membrane-cell-process/> (consultada 5 de marzo de 2022).
- Bedor Espinoza, J.; Lema Lema, K. Determinación y aplicación de indicadores claves de rendimiento (Key Performance Indicators-KPIs) en la cadena de suministro sustentable de la empresa Inspectserv S.A. Trabajo de Fin de Grado. Universidad de Guayaquil, 2019. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/41400> (consultada 9 de marzo de 2022).
- Reyes Cordero, R. Análisis y determinación de los parámetros críticos de la sección de electrólisis en la nueva planta de cloro-sosa. Trabajo de Fin de Grado. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, 2019. <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/11662> (consultada 9 de marzo de 2022).

- Kerzner, H. In *Project management metrics, KPIs, and dashboards: a guide to measuring and monitoring project performance*, 2nd ed.; John Wiley & Sons Inc: 2013; pp 117-163.
- ¿Qué es y para qué sirve un cuadro de mando?<https://www.ambit-bst.com/blog/qu%C3%A9-es-y-para-qu%C3%A9-sirve-un-cuadro-de-mando> (consultada 10 de marzo de 2022).
- Biomca Química S.L <http://www.biomcaquimica.com/#section-video> (consultada 11 de marzo de 2022).
- Kaplan, R.; Norton, D. In *Cuadro de mando integral*, 2da ed.; Gestión 2000 S.A: Barcelona, 2002; pp 13-58.