



UNIVERSITAT JAUME I

ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS
EXPERIMENTALES

MÁSTER UNIVERSITARIO EN EFICIENCIA
ENERGÉTICA Y SOSTENIBILIDAD (PLAN 2018)

***“MEJORA DE LA EFICIENCIA DE UNA
PLANTA TERMOELÉCTRICA DE
CARBÓN MEDIANTE EL REEMPLAZO
DE HIPOCLORITO DE SODIO POR UN
NUEVO AGENTE OXIDANTE PARA EL
AGUA DE PROCESO”***

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

AUTOR
NICOLAS ARISTIZABAL

DIRECTOR
ANTONIO GALLARDO

Castelló de la Plana, julio 2023

Tabla de contenido

1. OBJETIVO	4
2. INTRODUCCIÓN	5
3. CONTEXTO ENERGÉTICO Y TÉCNICO	7
3.1. CARBÓN	8
3.2. HUELLA HIDRICA	9
3.3. TERMOELÉCTRICA DE CARBÓN	12
3.3.1. Recepción del carbón	14
3.3.2. Caldera	15
3.3.3. Turbina	16
3.3.4. Condensador	19
3.3.5. Ciclo Rankine	20
3.4. PAPEL DEL AGUA	21
3.4.1. Ciclo de trabajo	22
3.4.2. Ciclo de refrigeración	29
3.4.3. Calidad del agua	31
3.4.4. Oxidación	35
4. PLANTA DE ESTUDIO	46
4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	46
4.2. SITUACION ACTUAL	47
4.2.1. Puntos de mejora	49
4.2.2. Costos	50
5. REQUISITOS DE PROYECTO	52
5.1. SEGURIDAD	52
5.1.1. Almacenamiento	52
5.1.2. Producción	52
5.1.3. Manipulación	53
5.1.4. Generación de subproductos	53
5.1.5. Automatización y control	53
5.1.6. Riesgo a la salud	53
5.2. EFICIENCIA	53
5.2.1. Reacción con hierro	54
5.2.2. Reacción con manganeso	54
5.2.3. Reacción con materia orgánica	54
5.2.4. Velocidad de reacción	54



5.2.5.	Persistencia	55
5.2.6.	Estabilidad.....	55
5.3.	PRECIO.....	55
5.3.1.	Costo de producción	55
5.3.2.	Costo del equipo	56
5.3.3.	Costo del compuesto	56
5.3.4.	Dosificación.....	56
5.3.5.	Generación de cloruros	56
6.	MATRIZ DE SELECCIÓN	57
6.1.	SEGURIDAD.....	59
6.1.1.	Almacenamiento.....	59
6.1.2.	Producción	60
6.1.3.	Manipulación	60
6.1.4.	Generación de subproductos	61
6.1.5.	Automatización y control	62
6.1.6.	Riesgo a la salud	62
6.2.	EFICIENCIA.....	63
6.2.1.	Reacción con hierro	63
6.2.2.	Reacción con manganeso	64
6.2.3.	Reacción con materia orgánica	64
6.2.4.	Velocidad de reacción	65
6.2.5.	Persistencia	66
6.2.6.	Estabilidad.....	66
6.3.	PRECIO.....	67
6.3.1.	Costo de producción	67
6.3.2.	Costo de equipo	67
6.3.3.	Costo del compuesto	68
6.3.4.	Dosificación.....	68
6.3.5.	Generación de cloruros	69
6.4.	RESULTADO.....	69
7.	DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA	70
7.1.	REACCIÓN QUÍMICA	70
7.2.	GENERADOR.....	71
7.2.1.	Líneas de flujo	72
7.2.2.	Tanques de precursores	72
7.2.3.	Sistema de contención secundario	74



7.2.4.	Alimentación agua motivante	74
7.2.5.	Bombas de dosificación	75
7.2.6.	Reactor	76
7.2.7.	Interfaz con el usuario	77
7.2.8.	Sensores y control de seguridad	78
7.2.9.	Lazos de control	79
7.3.	PLANTA OBJETIVO	79
8.	VALORACIÓN ECONOMICA	80
8.1.	COSTOS DIRECTOS	80
8.1.1.	Inversión inicial	80
8.1.2.	Precursores	82
8.1.3.	Mantenimiento	82
8.2.	COSTOS INDIRECTOS	82
8.2.1.	Análisis de agua	83
8.2.2.	Amortización	83
8.3.	AHORROS	83
8.4.	FLUJO DE CAJA	85
8.5.	PERIODO DE RETORNO	86
9.	VALORACIÓN AMBIENTAL	87
10.	CONCLUSIONES	88
	REFERENCIAS	89



1. OBJETIVO

Este trabajo tiene el objeto de realizar un análisis de alternativas para la sustitución de Hipoclorito de Sodio como principal oxidante de agua en una planta termoeléctrica en Colombia. Dichas opciones serán evaluadas en diferentes aspectos para encontrar la opción más adecuada para la planta, tanto económica como ambientalmente.

Para lograr este objetivo, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Generar una introducción a la ciencia del agua en la industria energética.
- Evaluar el estado actual de la planta.
- Evaluar las alternativas de oxidantes en aspectos económicos, ambientales y de utilidad para la planta.
- Diseñar la alternativa que más se ajuste a las necesidades.
- Determinar la viabilidad técnica, económica y ambiental del proyecto.



2. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se encuentra en funcionamiento alrededor de 8.500 plantas en el mundo de generación de energía eléctrica a partir de la combustión con carbón, con una capacidad instalada de aproximadamente 2.000 GW. Al ser una de las formas de generación más usadas en el mundo, es de gran importancia disminuir los consumos de agua y aumentar su generación. En este contexto, se realizará el estudio de diferentes opciones de agentes de oxidación para el agua de alimentación en la termoeléctrica de Sochagota (Termopaipa IV), ubicada en Colombia. Esta planta cuenta con una capacidad instalada de 160 MW y consume alrededor de 1'700.000 m³ de agua por año en el ciclo de potencia y en las torres de enfriamiento, siendo estas últimas las que más consumen agua.

El agua industrial para este uso requiere unas características específicas de calidad, que se obtienen luego de realizar un pretratamiento en el cual se retiran los sólidos suspendidos y se oxida para eliminar microorganismos y precipitar metales pesados. Esta oxidación se realiza actualmente con Hipoclorito de Sodio (NaClO), que es el oxidante más usado en la industria. En este trabajo se estudiarán 3 alternativas diferentes para sustituir el agente oxidante, buscando disminuir la concentración de cloruros en el agua clarificada, mejorar la oxidación de metales pesados y disminuir los costos asociados a la dosificación de los productos químicos.



Mediante un análisis cualitativo y cuantitativo se compararán las alternativas de generación de Dióxido de Cloro (ClO_2), lámparas de radiación ultravioleta y Ozono (O_3). El Dióxido de Cloro es un gas oxidante, que se genera en un reactor dentro de las instalaciones de la empresa, este gas tiene un poder oxidante mayor que el del Hipoclorito de Sodio por lo cual es más eficiente. Los rayos ultravioletas son una tecnología que ha venido tomando fuerza los últimos años, consiste en suministrar radiación que hace que el oxígeno del agua se convierta en ozono y oxide los microorganismos y los metales. El ozono es la última alternativa a analizar, ya que tiene una capacidad oxidante bastante alta.

Luego de escoger la mejor opción se realizará una estimación detallada de las necesidades del nuevo proceso industrial, los costos de operación, los beneficios ambientales, los beneficios potenciales en agua y en la generación de energía.

Finalmente se realizará un estudio de viabilidad económica de la instalación del proceso propuesto.

3. CONTEXTO ENERGÉTICO Y TÉCNICO

La energía eléctrica es uno de los servicios básicos que se deben asegurar, en los últimos años su demanda ha ido aumentando con el avance de la tecnología. Este incremento, junto a las necesidades ambientales del mundo, hace que los procesos de generación de energía eléctrica cada vez sean más eficientes y genera una gran cantidad de desafíos en este sector.

Una de las principales fuentes de generación de energía eléctrica son los ciclos de potencia, en los cuales se quema un combustible para, mediante una reacción exotérmica, generar calor y transferir este a un compuesto. Los ciclos más comunes utilizados a nivel industrial son el ciclo Rankine y el ciclo Brayton. El ciclo Rankine utiliza el calor de la combustión para calentar agua y generar un cambio de fase, de esta manera hacer pasar el vapor de agua a través de una turbina para transformarla en energía eléctrica. El ciclo Brayton, por otro lado, se utiliza agua como elemento de transmisión de energía, el cual absorbe el calor y entra a una turbina.

Los combustibles que se utilizan para este proceso son diversos, principalmente hidrocarburos que al interactuar con oxígeno generan una reacción denominada combustión, de la cual se puede obtener una gran cantidad de energía. Actualmente, los principales combustibles que se utilizan a nivel mundial son el carbón, el gas natural y la fisión nuclear (energía nuclear).



Este texto se enfoca en los sistemas de generación mediante el ciclo Rankine utilizando como combustible el carbón. El objeto de estudio será el agua de proceso de una planta ubicada en Colombia.

3.1. CARBÓN

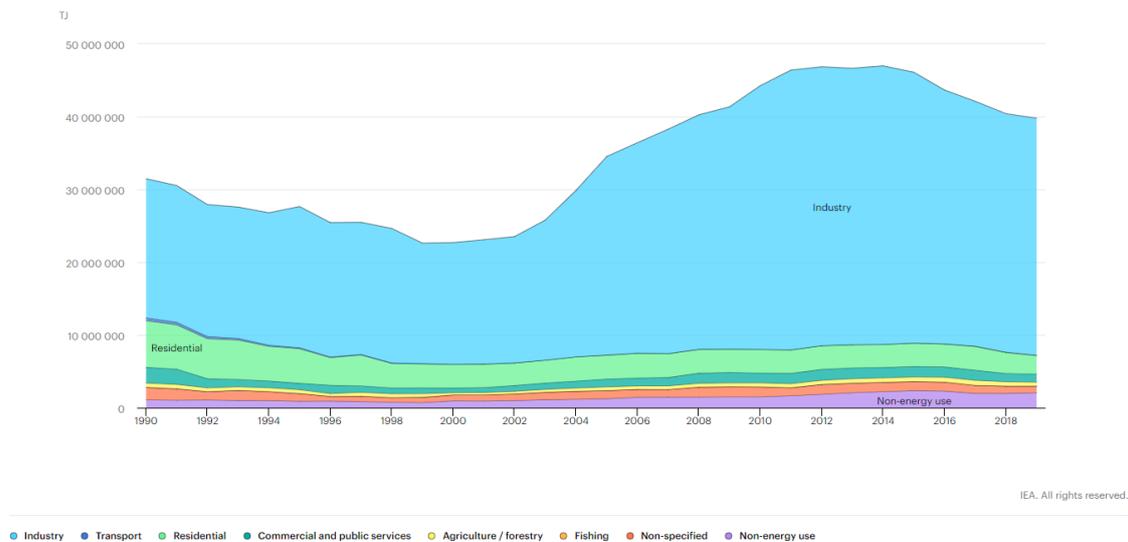
El carbón es una roca sedimentaria compuesta principalmente por carbono, hidrogeno, oxigeno, azufre y agua. Se forma naturalmente a partir de restos vegetales a condiciones de temperaturas alrededor de 250°C y alta presión. Al requerir unas condiciones especiales y una gran cantidad de tiempo para su formación, se considera un recurso no renovable. (Altamirano, 2008)

El carbón es el combustible fósil más abundante en la naturaleza con 984.453 Mt en reservas mundiales medidas a finales del 2003. Esto lo hace un combustible fósil de bajo costo, por este motivo, es ampliamente utilizado en diferentes entornos en los que se requiere energía térmica.

Colombia es el país latinoamericano con mayores reservas de carbón, por este motivo se utiliza en el país como combustible para las plantas de generación. Cuenta con recursos potenciales de 16.992 Millones de toneladas, siendo el sexto exportador de carbón a nivel mundial. Se estima que las reservas de Colombia ascienden a 120 años. (Unidad de Planeación Minero Energética, 2012)

Durante los últimos años, se ha observado una disminución en el consumo del carbón como combustible. La constante presión por los efectos climáticos adversos del uso del carbón en las emisiones de CO₂ y las nuevas políticas ambientales vienen afectando la demanda del mineral. En el año 2020 por el impacto de la pandemia, se redujo el consumo de carbón en un 4,4%. El descenso en el precio de combustibles alternos y la disminución de la demanda eléctrica (0,5%) fueron los principales motivadores de la reducción.

Coal final consumption by sector, World 1990-2019



Il·lustració 1. Demanda històrica de carbó 1990-2019. (IEA Publications, 2021)

Sin embargo, en 2021 se disparó el uso de carbón. El regreso a la normalidad productiva, las condiciones climáticas de invierno y verano y el incremento en los precios del gas natural fueron los detonantes para la recuperación de la demanda del carbón. El uso principal que se ha dado al carbón durante este periodo ha sido para la generación eléctrica. Los 3 principales consumidores de carbón China, India y USA.

La demanda energética mundial está en aumento, y el carbón juega un papel importante en el cumplimiento de esta demanda. Se espera que los próximos años, la mayoría de generación eléctrica provenga de fuentes renovables, sin embargo, la brecha que existe entre la demanda y la generación es aún muy grande. El carbón junto al gas natural, seguirán soportando la generación eléctrica en el mundo. Países como India o China tienen una gran dependencia de este mineral para sus plantas termoeléctricas. (IEA Publications, 2021)

3.2. HUELLA HIDRICA

La generación de energía eléctrica en las centrales termoeléctricas genera una gran cantidad de emisiones de gases al ambiente. Se suele hacer un seguimiento riguroso a

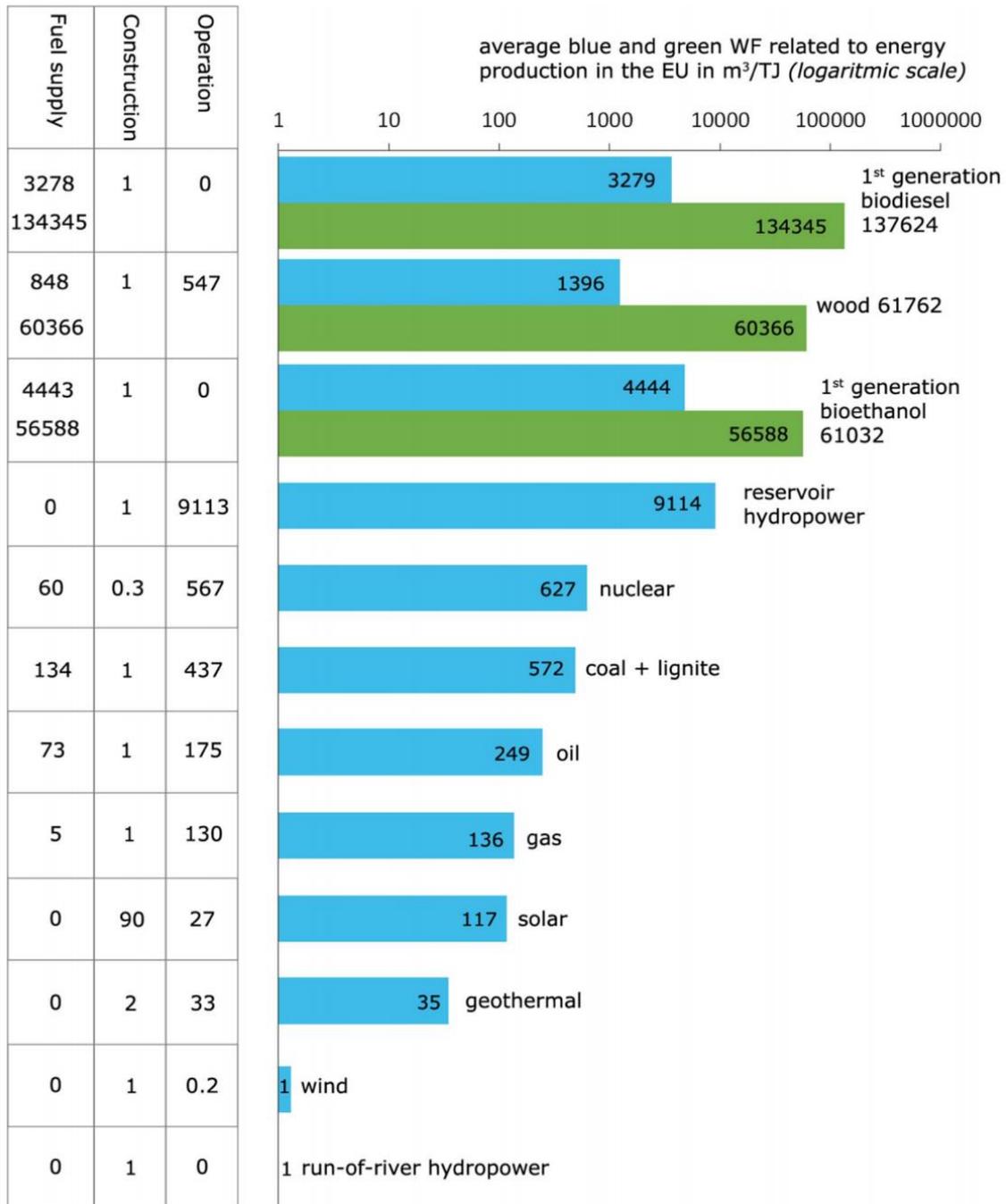


los gases y a la huella de carbono, sin embargo, el consumo de agua y la huella hídrica son puestos en un segundo plano y se lleva un seguimiento con la misma rigurosidad.

La huella hídrica en la generación de energía eléctrica se realiza tomando en consideración el agua tomada y el agua consumida. La diferencia entre ambos términos es que el agua tomada es la cantidad de agua que ingresa a la planta, mientras que el agua consumida es la cantidad de agua que fue usada y no retornó a la fuente. (Lohrmann, Child, & Breyer, 2021)

La generación eléctrica conlleva el uso de agua, algunos procesos consumen más que otros, pero el nexo agua-energía cada vez obtiene más importancia en el contexto energético y ambiental. Las plantas térmicas de carbón consumen agua dependiendo de la capacidad de generación y del tipo de ciclo de enfriamiento. En general, entre un 70% y 80% del agua que ingresa a la planta se utiliza en los ciclos de refrigeración. Más adelante se hará una explicación más detallada del ciclo de refrigeración.

La interrelación entre agua-energía ha sido estudiada bastamente en algunas regiones, lastimosamente en la unión europea no se han llevado a cabo muchos estudios sobre la huella hídrica. El estudio realizado por (Vanham, Medarac, Schyns, Hogeboom, & Magagna, 2019) es la fuente más completa que se encontró en este sentido.



Il·lustració 2. Consumo medio de agua relacionado con los sectores de producción en m³/TJ. (Vanham, Medarac, Schyns, Hogeboom, & Magagna, 2019)

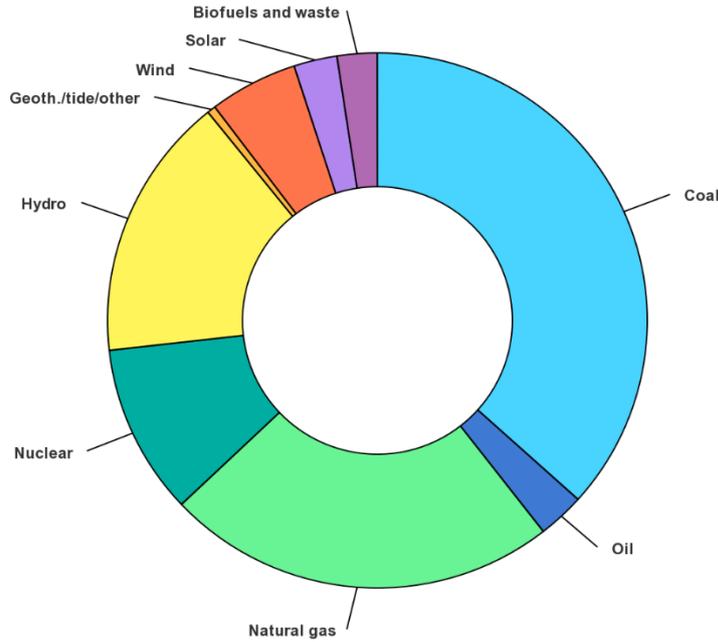
En la ilustración 2 se muestran unas barras azules y unas verdes. Las barras azules hacen referencia a las aguas superficiales y de pozo, mientras que las barras verdes hacen referencia al agua retenida en el suelo a causa de las precipitaciones. Para este ensayo, el valor de interés es el consumo en operación.



El consumo por operación más alto se da en las centrales hidroeléctricas, ya que requiere grandes volúmenes de agua almacenada, esto en épocas calurosas genera una gran evaporación de agua. Seguida se encuentran las centrales nucleares, que requieren unas condiciones especiales de agua debido a la radiación a la que son expuestos dentro del reactor. En tercer lugar, se encuentran las centrales térmicas de carbón, como la de este ensayo, en las cuales se dan consumos elevados dependiendo del sistema de enfriamiento que tienen, y en ese contexto, cobra relevancia alcanzar un ahorro en los consumos de agua.

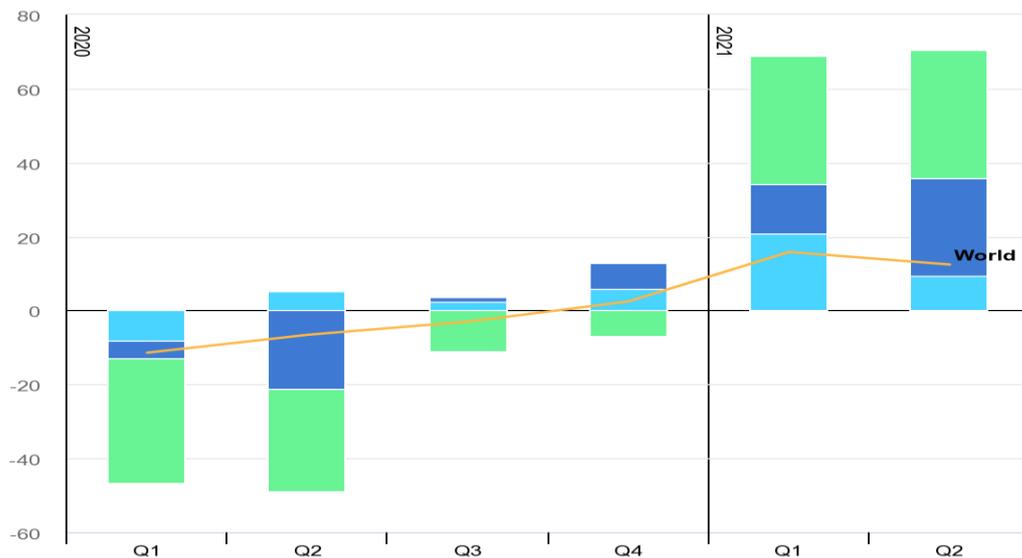
3.3. TERMOELÉCTRICA DE CARBÓN

La generación eléctrica a partir del carbón es la forma de generación más utilizada en el mundo, alrededor del 36,7% de la generación energética global era aportada por estas plantas en 2019. Al ser un combustible económico y ser una tecnología madura y robusta, es una opción interesante para las políticas públicas de generación energética. Por otro lado, el factor ambiental está llevando a la disminución del uso de estas plantas, buscando que las existentes sean cada vez más eficientes en el uso de recursos y la disminución de emisiones.



Il·lustració 3. Generació de energia elèctrica per recursos. (International Energy Agency, 2021)

Como se mencionó recientemente, en 2020 se generó una reducción en el consumo de energía eléctrica y un descenso en los precios del gas natural, esto llevó a una reducción en la generación térmica por combustión de carbón.



Il·lustració 4. Generació de energia elèctrica a partir de carbón 2020-2021. (International Energy Agency, 2021)

Las plantas termoeléctricas de combustión de carbón tienen como principio de funcionamiento termodinámico el ciclo Rankine, en el cual se calienta agua y se hace pasar el vapor de agua a través de una turbina en la cual se transforma la energía cinética en energía eléctrica.

3.3.1. Recepción del carbón

Primero, el carbón es triturado para mejorar la eficiencia de la combustión y reacciona más rápido. Al tener un menor diámetro de partícula aumenta el área de contacto entre el carbono y el oxígeno y así se asegura que la reacción se dé de manera completa, aumentando la cantidad de energía producida y reduciendo la generación de monóxido de carbono. (Tarafdar & Sinha, 2019)

Luego de pulverizar el carbón, este ingresa a la caldera, el lugar donde se realiza la reacción de combustión y se obtiene la energía que se le entregará al agua. Dentro de este equipo, se le otorga energía al agua a partir del calor directo de la reacción exotérmica y a partir de los humos de chimenea que se generan en la reacción, así se utiliza la mayor cantidad de energía posible, pensando siempre en realizar un proceso eficiente.

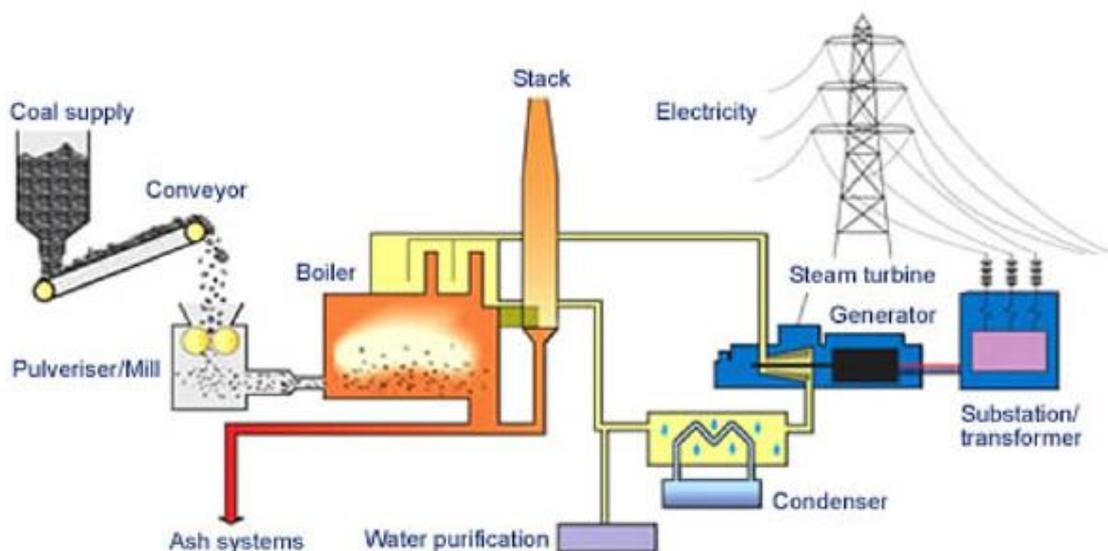


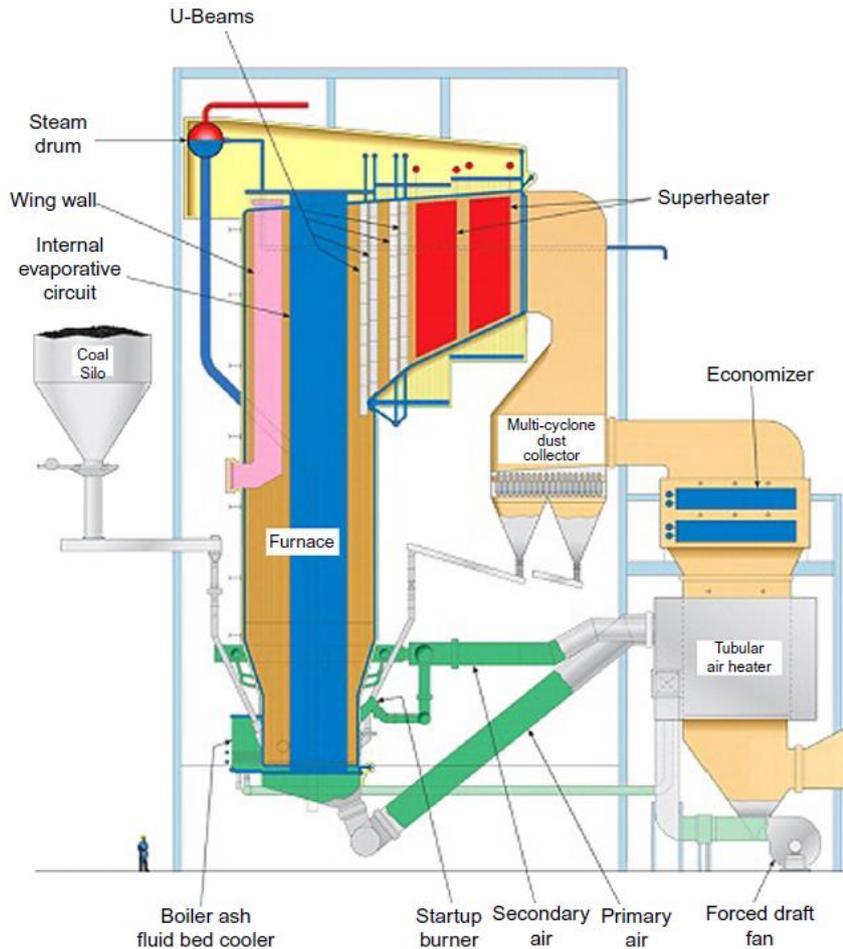
Ilustración 5. Diagrama general de una planta termoeléctrica carbón. (Rasul & Mohammad, 2011)

3.3.2. Caldera

En la ilustración 6 se presenta un esquema general de una caldera de alta presión para este tipo de aplicaciones. Estas calderas son conocidas como calderas acuotubulares, ya que el agua circula a través de los tubos, mientras que el calor y los gases circulan por la carcasa. Estas calderas funcionan con el principio de diferencia de densidad, ya que al aumentar la temperatura del agua y cambiar de fase, se vuelve menos denso y tiende a subir, mientras que los líquidos al ser más pesados bajan. Este continuo intercambio de energía hace que el agua circule de manera regular y genere vapor constantemente.

En la parte superior se encuentra el tambor de vapor, aquí llega el vapor generado junto con el agua líquida que arrastra el vapor. El vapor sobrecalentado sale por la parte superior y el agua baja por los conductos. La mayoría de las plantas cuentan con un sistema de sobrecalentamiento para obtener un vapor con una mayor temperatura y así obtener un mejor aprovechamiento de la energía, en la ilustración 6 se puede ver las secciones de superheater, dependiendo del diseño puede tener diferentes pasos de sobrecalentamiento. En la parte inferior se encuentra el tambor de lodos, en el cual se recoge el agua líquida concentrada con las sales residuales del agua que se evaporó, es necesario realizar purgas temporizadas para evitar daños en el equipo.

Además, como se muestra en la ilustración 6, se ha implementado en los procesos un sistema de recuperación energética mediante la instalación de una sección de precalentamiento con los gases chimenea que salen con una alta temperatura llamada economizador. De esta manera, se precalienta el agua que va a ingresar a la caldera y así puede alcanzar fácilmente la temperatura de ebullición. Se debe tener precaución con evitar la condensación de gases en esta sección, ya que se puede generar ácidos corrosivos que podrían dañar los metales del sistema. Por último, las calderas tienen una sección de recalentamiento a la cual entra el vapor después de hacer un paso por la turbina. (Sarkar, 2015)



Il·lustración 6. Esquema de una caldera. (Sarkar, 2015)

3.3.3. Turbina

De la caldera se obtiene vapor de agua con un alto contenido energético, para utilizar esta energía se utiliza un dispositivo llamado turbina. La turbina es un equipo diseñado para transformar la energía cinética en trabajo útil mediante el movimiento de un rotor, el cual puede ser utilizado en la generación de energía eléctrica o el funcionamiento de otros equipos que requieran trabajo (Bombas, compresores, etc.). Termodinámicamente, dentro de la turbina se genera una expansión del vapor, este cambio en la presión es el motivo por el cual se genera trabajo.

El vapor entra a la turbina por medio de una tobera con una pequeña área de salida, esto genera que su velocidad aumente y su presión se reduzca. Este aumento en la velocidad depende directamente de la temperatura a la que se encuentre el vapor, esto está enlazado con la cantidad de energía contenida a causa de la alta temperatura.

Dentro de la turbina se encuentran una serie de alabes fijos y móviles que generan una expansión del gas y generan trabajo.

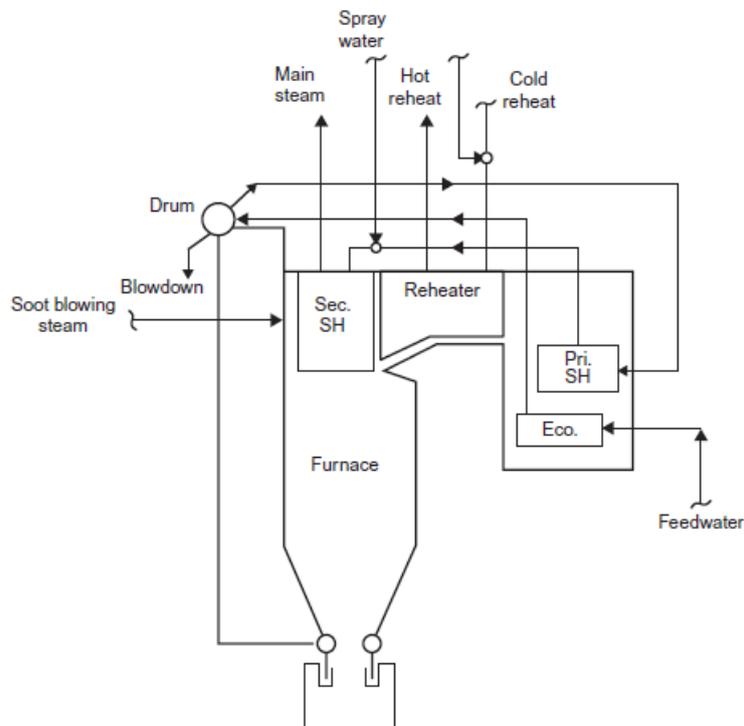


Ilustración 7. Esquema de una caldera en una planta termoeléctrica. (Sarkar, 2015)

La mayoría de las turbinas empleadas en estos sistemas de alta presión requieren una alta velocidad de entrada del vapor de agua, ya que la eficiencia del ciclo y de la generación dependen de la cantidad de giros que hace el rotor al mover los alabes. Estos alabes deben estar diseñados de tal manera que la pérdida de presión sea escalonada entre sus etapas. Entre las etapas móviles se ubican alabes fijos que tiene como objetivo mantener la caída de presión escalonada mientras hay pequeños incrementos de velocidad entre las etapas fijas y móviles y evitar que el vapor vaya en otra dirección.



Ilustración 8. Rotor y alabes móviles. (Ansaldo Energía, 2017)

Las turbinas de vapor utilizadas en las aplicaciones de generación eléctrica cuentan con diferentes secciones, una en la cual entra vapor a alta presión, otra en la que entra vapor intermedio y la última de baja presión. Como se mostró en las calderas, el vapor que sale de la sección de alta presión se recalienta para que vuelva a la turbina; este recalentamiento puede repetirse dependiendo del diseño del ciclo.

En la ilustración 9 se presenta el diseño típico de una turbina, en la parte delantera se encuentra la zona de alta presión, seguida por la zona intermedia y finalmente se encuentran dos zonas de baja presión. La zona de alta presión ocupa menos espacio y tiene un diámetro menor que el intermedio y alta.

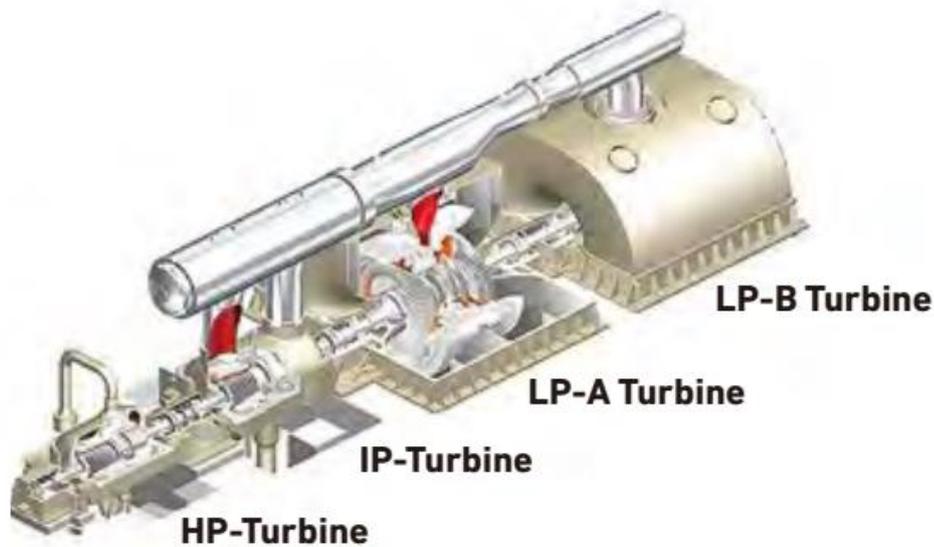


Ilustración 9. Diferentes diseños de turbinas de condensación. (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. , 2021)

3.3.4. Condensador

El último equipo en el ciclo de generación es el condensador. En esencia, es un intercambiador de calor que retira el calor latente del vapor que sale de la turbina. Existen dos tipos de condensadores, los que retiran el calor con agua y los que lo hacen con aire, sin embargo, los condensadores que usan agua son los más usados comúnmente a nivel mundial.

El condensador tiene como principales objetivos evitar la contrapresión del vapor, obtener un líquido con una alta calidad y una buena temperatura para retornar al ciclo y la manipulación de agua en estado líquido. De esta manera, se asegura una operación segura y eficiente energética y económicamente para la turbina y la caldera. Se debe asegurar que la temperatura del líquido caliente no sea muy baja, ya que esto significa una mayor cantidad de combustible en el calentamiento.

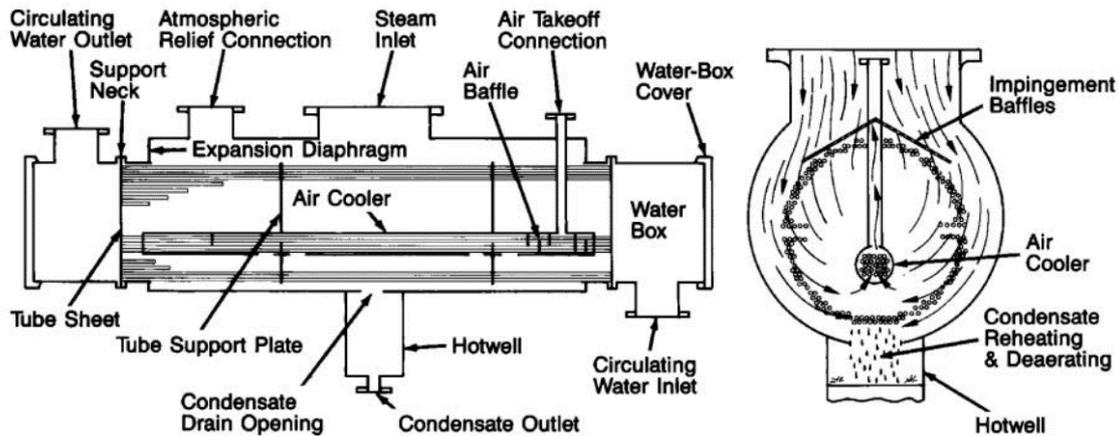


Ilustración 10. Esquema de un condensador de superficie.

En la Ilustración 10 se puede observar el esquema general del equipo, el vapor entra por la parte superior y se condensa a medida que baja. Debido a la reducción en el volumen que se genera del cambio de fase, se crea vacío dentro de este equipo, lo cual evita la contrapresión del vapor a la turbina.

3.3.5. Ciclo Rankine

El principio termodinámico por el cual se genera trabajo es el Ciclo Rankine, el cual se caracteriza por realizar el proceso de calentamiento y retiro de calor a presión constante. El ciclo es compuesto por una sección en la que se incrementa la presión, seguido por el calentamiento, después se reduce la presión y genera trabajo, a continuación, se retira el calor y finalmente se cierra el ciclo con el incremento de la presión nuevamente. Los equipos que componen el ciclo, como ya se detallaron son la bomba, la caldera, la turbina y el condensador.

Este ciclo puede realizarlo cualquier fluido, sin embargo, el agua es el fluido más utilizado en este ciclo debido a su capacidad calorífica, su precio y sus propiedades físicas. La ilustración 11 muestra un diagrama de Temperatura vs Entropía de un ciclo Rankine con un paso de recalentamiento, similar al que se realiza en la planta objetivo.

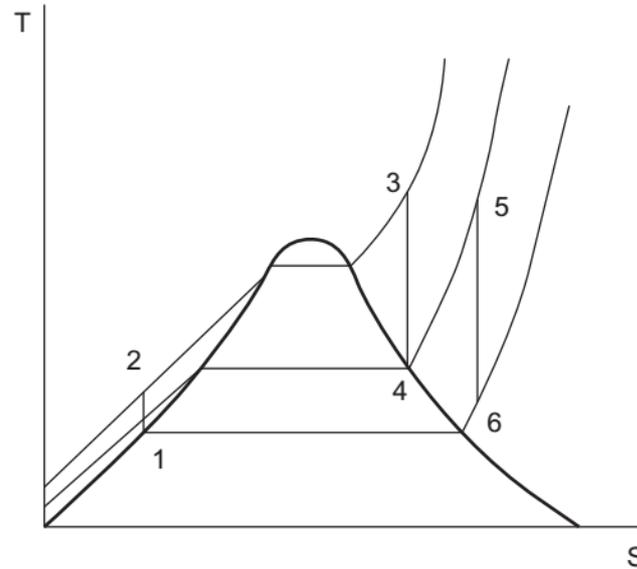


Ilustración 11. Diagrama Ts agua Ciclo Rankine. (Sarkar, 2015)

3.4. PAPEL DEL AGUA

Desde el inicio se ha destacado la importancia del agua en el proceso de generación eléctrica. Gracias a sus propiedades físicas y químicas el agua es el fluido ideal para ser usado como fluido de trabajo en este ciclo, ya que se encuentra de manera abundante, es económico y tiene un gran poder calorífico.

El agua realiza dos ciclos independientes, el primero es el ciclo de trabajo y el segundo es el ciclo de refrigeración del condensador. Ambos ciclos requieren diferentes tipos de calidades de agua, así mismo, su consumo difiere en gran medida uno del otro.

Principalmente existen 3 tipos de contaminantes que se pueden encontrar en el agua: Sólidos suspendidos, Sólidos disueltos y microorganismos. Los sólidos suspendidos son los sólidos que no se disuelven en el agua, generan material particulado y le dan color y turbidez al agua. Los Sólidos disueltos son minerales que están disueltos en el agua, no generan ningún cambio en la apariencia del fluido, pero generan cambios importantes en la composición química del agua. Los microorganismos pueden ser visibles o invisibles para el ojo humano, pero generan problemas a nivel de salud humana y en la eficiencia del proceso.



Por otro lado, los recursos hídricos de los cuales se obtiene usualmente el agua son: Aguas superficiales y Aguas subterráneas. Las aguas superficiales son pobres en sólidos disueltos pero abundantes en microorganismos y sólidos suspendidos; el agua de mar es una excepción, ya que además tiene en abundancia sólidos disueltos. Las aguas subterráneas son ricas en sólidos disueltos y pobre en sólidos suspendidos. Dependiendo de la principal fuente de captación con la que cuente la planta se establece el proceso de clarificación y adecuación del agua. (Nalco Water, 1979)

3.4.1. Ciclo de trabajo

Este ciclo se ha explicado en detalle previamente, sin embargo, en este apartado se explicará el proceso al cual es sometido el agua para cumplir con los requisitos de calidad que se requieren en los equipos.

3.4.1.1. Captación

El primer paso que hace el agua es la captación. Aquí, se toma el agua del recurso principal más cercano a la planta. Mediante bombas, se succiona el agua que es llevada a través de una serie de filtros de malla donde se retiran los sólidos más grandes.

Este proceso es sencillo, pero es importante asegurar una retención de estos sólidos de gran tamaño para evitar así daños en los equipos de clarificación.

3.4.1.2. Clarificación

La clarificación es el proceso en el cual se retiran los sólidos en suspensión, se oxidan los metales disueltos y los microorganismos y se ajusta pH en caso de ser necesario.

3.4.1.2.1. Oxidación

La oxidación se realiza añadiendo un agente oxidante al agua, el cual reacciona químicamente con impurezas metálicas y especies patogénicas. El cloro, bromo y oxígeno son los agentes oxidantes más usados a nivel industrial.

El oxidar especies patogénicas es uno de los aspectos más relativos del control microbiológico, ya que reduce la propagación de enfermedades. Además, se controla los microorganismos que generan lodos (biopelículas) y el crecimiento de algas en los sistemas de agua fría.

La oxidación de las especies metálicas se hace con el objetivo de volver insolubles las especies que se encuentran en solución, de esta manera, se hacen precipitar los metales y se pueden retirar mediante coagulación, floculación y sedimentación o filtración. Las especies metálicas más comunes son el hierro (Fe^{+2}) y el manganeso (Mn^{+2}), pero hay una gran cantidad de especies metálicas que hacen parte de los iones disueltos.

3.4.1.2.2. Coagulación y floculación

Después de oxidar el agua, se realiza el proceso de coagulación y floculación. Este proceso, en general, hace referencia a aglomerar el material suspendido para facilitar su futura remoción.

El agua turbia contiene dos tipos de material suspendido:

- Sólidos sedimentables: Partículas de gran tamaño que se precipitan con facilidad gracias a su peso.
- Sólidos dispersos: Partículas de tamaño pequeño que no sedimentan por sí mismas y permanecen en suspensión, se conocen como coloides.

Los coloides son principalmente material orgánico, microorganismos, arcilla, metales pesados, hidróxidos, sílice y tierra. Su tamaño de partícula varía ampliamente, en ese sentido, es necesaria la coagulación para forzar a sedimentar las partículas. Incluso las partículas sedimentables requieren de este proceso para acelerar su descenso.

La ayuda química es necesaria para la coagulación y floculación. Las partículas coloidales usualmente general cargas a través de la adsorción de iones cargados o a través de la

disociación de grupos superficiales (Ohshima, 2006). Esta carga hace que las partículas se repelan entre sí y sea imposible su sedimentación. El papel que juega el coagulante es la neutralización de estas cargas para disminuir las fuerzas de repulsión.

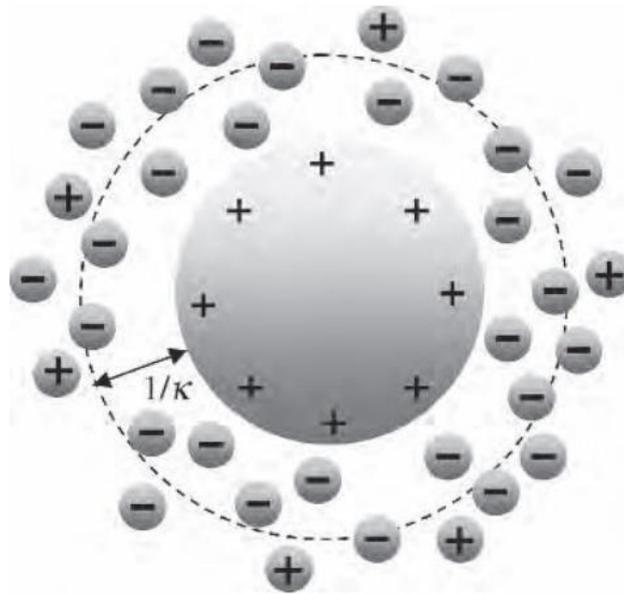


Ilustración 12. Teoría de carga de un coloide. (Ohshima, 2006)

Con las cargas anuladas, es posible aglomerar las partículas. A este proceso de aglomeración se le denomina floculación, el cual se realiza mediante la adición de un químico denominado floculante.

La floculación depende de la cantidad y eficiencia de los choques se realizan entre los coloides neutralizados, por este motivo es necesario darle energía al sistema mediante agitación. La agitación se hace desde la coagulación, realizando una agitación más rápida cuando se adiciona el coagulante y más lenta cuando se adiciona el floculante, ya que una agitación fuerte durante la floculación puede romper los flocs (aglomeraciones de coloides).

El proceso de coagulación se realiza en un corto periodo de tiempo, mientras que la floculación requiere un tiempo más prolongado.

3.4.1.2.3. Sedimentación

Por último, después de tener flocs lo suficientemente grandes, se realiza el proceso de sedimentación. La sedimentación se da gracias a la diferencia entre la densidad del agua y la de los flocs.

Para conseguir una adecuada sedimentación, se debe asegurar un tiempo mínimo de residencia en el tanque de sedimentación. Existen diferentes diseños de tanques de sedimentación dependiendo del caudal que debe ser tratado.

3.4.1.3. Filtración

La clarificación retira una gran cantidad de sólidos suspendidos, pero aún existen algunas partículas que no han sido retiradas mediante este proceso, por ese motivo se hace pasar el agua por una serie de filtros.

La filtración se realiza a través de una cama porosa de algún material (diferentes tipos de arena, carbón activado). El control de estos equipos se debe hacer con respecto a la caída de presión que sucede a medida que se taponan los poros del material; cuando la caída de presión es muy alta, se debe realizar un retro lavado para recuperar el caudal inicial de fluido.

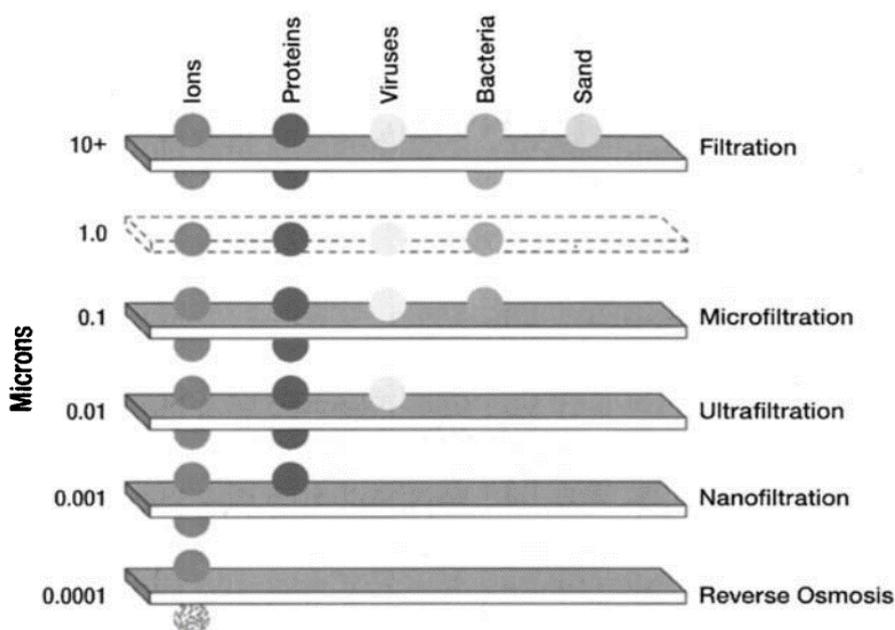


Ilustración 13. Tamaño de poros de filtros y membranas. (Kucera, 2010)

Existen diversos tipos de equipos de filtración, el más usado es el tanque vertical, donde se ingresa el agua en la parte superior y se retira por el fondo del equipo el líquido clarificado.

3.4.1.4. Desionización

Después de retirar los sólidos suspendidos, se debe eliminar los sólidos disueltos en el agua. Existen diversos procesos para eliminar esto, pero el más usado en este tipo de industria es la Osmosis Inversa.

La Osmosis Inversa es un sistema con una membrana semipermeable que retiene los iones libres y permite el paso el agua pura. Para que la membrana pueda retener los iones, el agua debe ingresar al equipo con una alta presión.

Ya que las membranas tienen un tamaño de poro muy pequeño, es necesario asegurar un adecuado retiro de los sólidos en suspensión, ya que el ingreso de estas partículas a la membrana obstruye los poros y reduce el flujo de agua procesada.

Las membranas semipermeables son elementos de mucho cuidado, pueden romperse o dañarse con facilidad y permitir el paso de sales indeseadas. Se deben operar a un pH y temperatura adecuadas, el agua de alimentación debe tener una concentración máxima de cloro y debe ser totalmente inocuo. (Kucera, 2010)

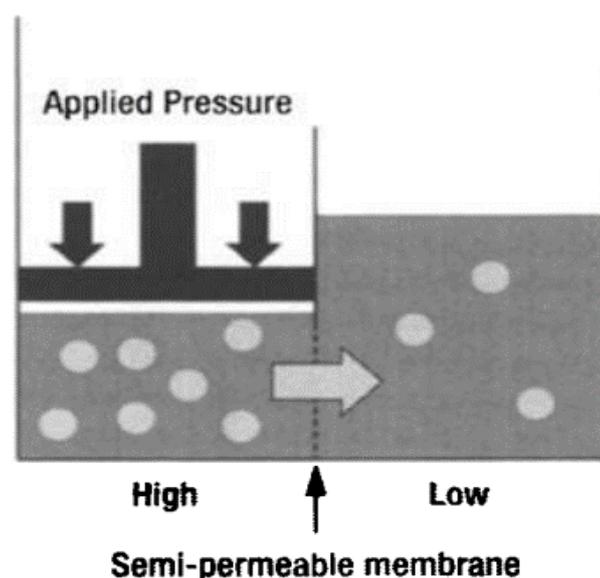


Ilustración 14. Principio de Osmosis Inversa. (Kucera, 2010)

La corriente de salida, denominada permeado, debe tener una conductividad cercana a $0 \mu\text{S}$. Aunque en la práctica no se alcanza tal eliminación de sales, se pueden alcanzar valores muy cercanos al cero.

Algunas plantas captan agua de fuentes con una concentración de sales altas, por este motivo, es necesario instalar procesos adicionales a la RO, como suavizadores o resinas de intercambio iónico.

Las resinas de intercambio iónico son tanques en los cuales se tienen pellets cargados iónicamente, al hacer pasar el agua con iones libres, se retienen estos y obtener agua desionizada. Los suavizadores funcionan como un equipo de intercambio iónico en donde se retira la dureza del agua.

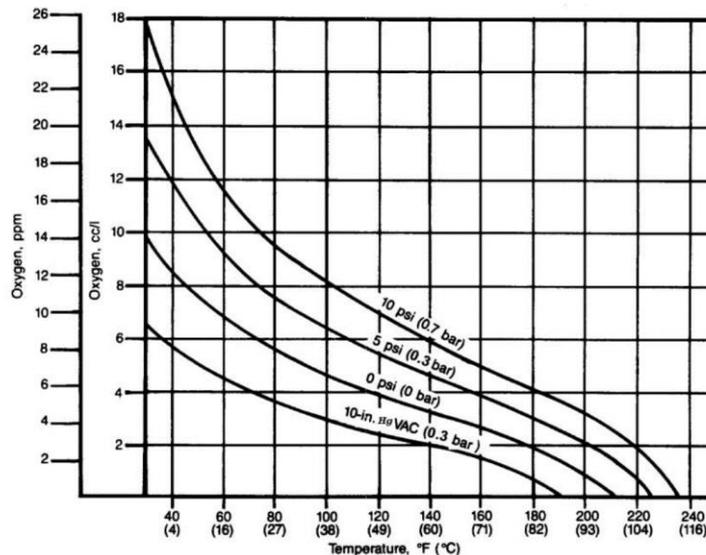
3.4.1.5. *Desaireación*

Hasta este punto del pretratamiento se han retirado los sólidos disueltos y suspendidos, sin embargo, la existencia de gases como dióxido de carbono (CO_2) y oxígeno (O_2) generan un potencial riesgo de corrosión en la caldera.

El oxígeno es altamente corrosivo, incluso pequeñas cantidades pueden generar daños catastróficos a las líneas de alimentación y retorno, economizador, caldera, intercambiadores y equipos de vapor. La velocidad de corrosión puede duplicarse con incrementos de 30°C , lo cual hace que los equipos donde se obtienen altas temperaturas sean los más afectados.

Los desaireadores son equipos que combinan la eliminación de gases por métodos físicos y químicos. Por métodos físicos se puede eliminar el oxígeno, ya que el oxígeno no se ioniza en el agua. Sin embargo, al estar en contacto el aire y el agua se disuelve el oxígeno, obteniendo concentraciones cercanas a $8,3 \text{ ppm}$ a 25°C (Xylem, 2019); para evitar la dilución del oxígeno en el agua se utiliza vapor, el cual reduce la cantidad de aire disminuyendo el contacto entre el oxígeno y el agua.

La temperatura juega un papel importante en este proceso, ya que al aumentar la temperatura disminuye la concentración de gases. Sin embargo, no se puede asegurar la eliminación total del oxígeno únicamente con el aumento en la temperatura.



Il·lustració 15. Solubilitat del oxigen respecte a la temperatura. (Xylem, 2019)

Por último, es necesario asegurar agitación para remover las partículas de gases atrapadas en el medio acuoso y asegurar una apertura para el adecuado venteo.

La mayoría de estos equipos requieren calentamiento, adición de vapor y la adición de un secuestrante de oxígeno para asegurar una concentración inferior a 7 ppb de oxígeno en el agua de alimentación.

A pesar de alcanzar mecánicamente una concentración inferior a 7 ppb, se requiere una concentración menor en las calderas de alta presión. Por este motivo se utilizan secuestrantes de oxígeno químicos. Con la adición de estos químicos se pueden obtener concentraciones cercanas a 0.

3.4.1.6. Alimentación a la caldera

Después de completar adecuadamente el pretratamiento, alcanzando una conductividad baja y la eliminación de los gases, se puede alimentar a la caldera. Primero entra al economizador y luego al tambor de vapor de la caldera.

3.4.2. Ciclo de refrigeración

En la sección anterior se hizo referencia al uso de agua en el condensador. El agua como agente refrigerante permite utilizar equipos mucho más reducidos en tamaño debido a diferencia que existe entre las propiedades térmicas del agua y el aire. Esta diferencia de tamaño es importante cuando no se dispone de una superficie muy amplia para la construcción de la planta.

Existen 3 tipos principales de refrigeración, el sistema de un solo paso, sistema abierto y sistema cerrado. El sistema de un solo paso es útil cuando se dispone de una fuente abundante de agua, esta entra al circuito de refrigeración y sale con una temperatura mayor; puede generar problemas ecológicos por altas temperaturas. El sistema abierto es el más usado, cuenta con una torre que enfría el agua con aire y retorna agua fría; su consumo de agua es menor en comparación con el de un solo paso. El sistema cerrado no vierte agua, retira el calor en el condensador y es enviado a otro punto en el cual se enfría de nuevo, usualmente utilizado en los sistemas tipo Chiller.

En esta planta, el agua de alimentación del circuito de refrigeración es la misma que se utiliza para el ciclo de generación. Después del proceso de clarificación es enviada hacia la piscina de la torre de refrigeración, de donde es enviada al condensador y regresa como agua caliente (Ilustración 16).

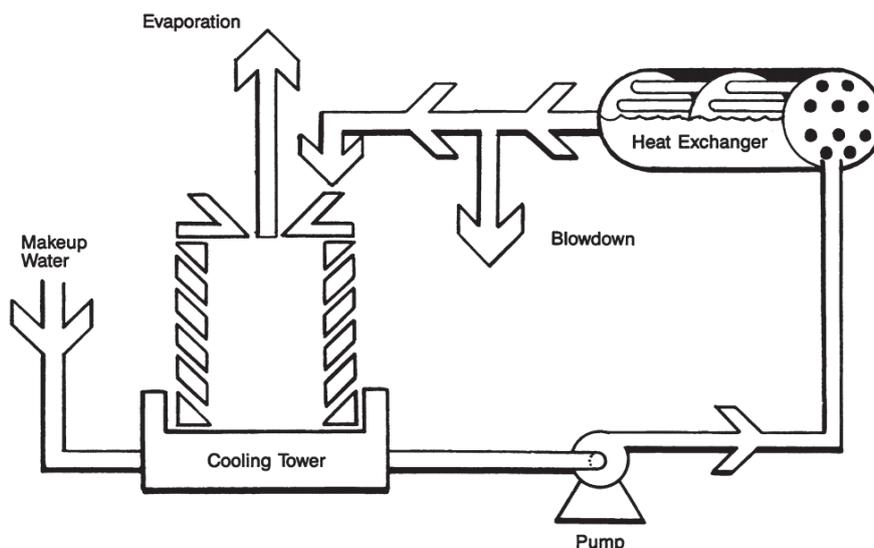


Ilustración 16. Esquema del sistema de enfriamiento abierto.

Los sistemas de enfriamiento abiertos funcionan mediante el principio de enfriamiento por evaporación. El enfriamiento evaporativo es en esencia la pérdida de calor latente del agua mediante una corriente de aire, las partículas de agua que tienen suficiente energía para cambiar de fase son arrastradas por aire a condiciones ambiente, de esta manera se retira el calor y se obtiene agua a una temperatura menor. La temperatura final del agua va a depender del diseño del sistema y de las temperaturas ambientales.

Para que las moléculas de agua puedan evaporarse, deben tener una temperatura adecuada para romper los puentes de hidrógeno. La corriente de agua que vuelve del proceso tiene unas condiciones adecuadas para que algunas de sus partículas cambien de fase, sin embargo, la torre debe propiciar ciertas condiciones para mejorar su enfriamiento. Por un lado, el relleno de la torre rompe las partículas de agua en unas más pequeñas, facilitando así el escape de las partículas en forma de vapor debido a su menor diámetro; y, por otro lado, el aire que fluye a través de la torre retira estas partículas de vapor y ayuda a que una mayor cantidad de partículas calientes salgan del sistema.

El circuito de enfriamiento pierde agua en forma de vapor y en la purga que se le debe hacer al sistema. Se debe asegurar que el agua de reposición que se alimenta directamente a la base de la torre compense las pérdidas y mantenga el nivel adecuado de agua dentro del sistema.

3.4.2.1. Torres de enfriamiento

Como se puede observar en el esquema de la ilustración 16, el circuito es compuesto por una torre de enfriamiento, una bomba y el intercambiador de calor del agua de caldera. Las torres de enfriamiento son el equipo más importante en el enfriamiento de los sistemas abiertos, ya que es el punto en el que se le retira el calor al agua.

Existen dos tipos principales de torres de enfriamiento, las torres de tiro inducido y las torres de tiro natural. Las torres de tiro inducido son las más utilizadas actualmente, ya que el desempeño térmico es más estable y menos dependiente de las condiciones climáticas.

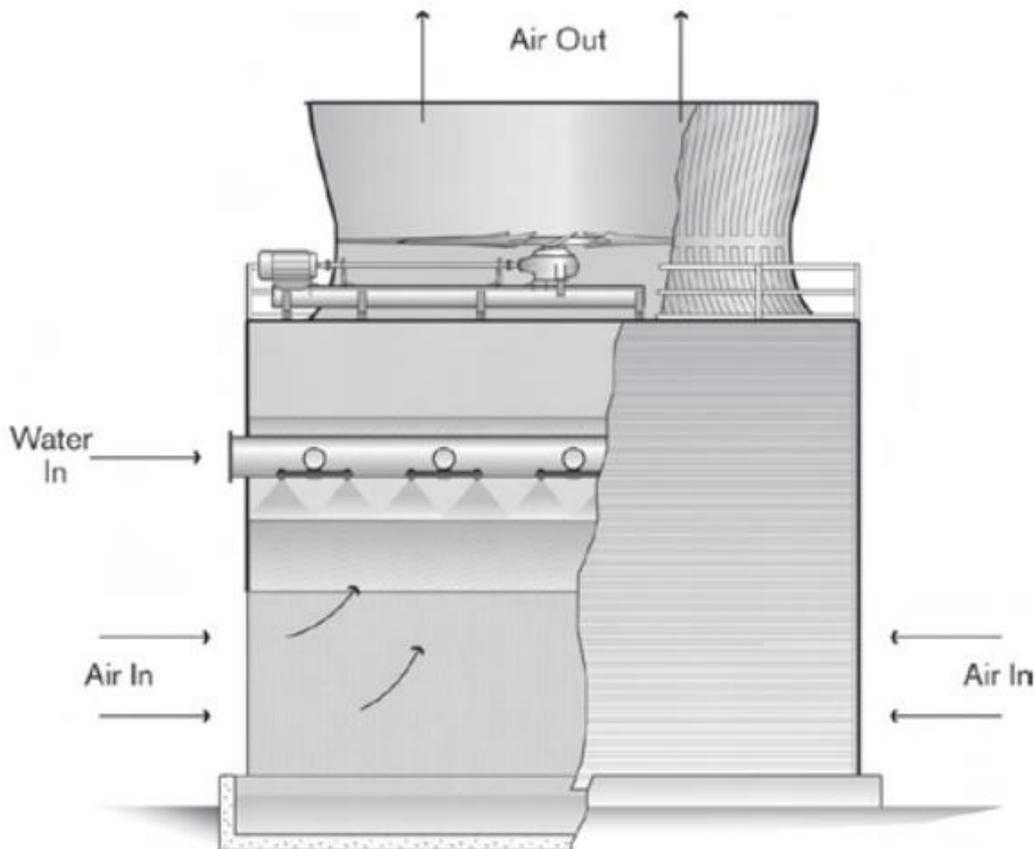


Ilustración 17. Esquema de una torre de enfriamiento. (SPX Cooling Technologies, Inc., 2009)

La ilustración 17 muestra una torre típica usada en este tipo de industrias, en la parte baja se encuentra la base de la torre, en donde se acumula el agua fría y de donde se toma el agua para enviar al proceso. El aire entra por las persianas laterales y sale por la parte superior con el vapor de agua. El agua entra por la parte alta de la torre y es pulverizado por las boquillas del sistema, luego entra en contacto con el relleno de la torre donde se rompe en partículas más pequeñas.

3.4.3. Calidad del agua

Como ya se mencionó, la composición de impurezas contenidas en el agua dependerá de la fuente de la cual se toma el agua. Muchas plantas que están ubicadas en zonas costeras se ven obligadas a utilizar agua marina, la cual tiene una importante concentración de sales.

La importancia del pretratamiento recae sobre la protección de los equipos del proceso, principalmente por los más costosos, como lo son la caldera, la turbina, los intercambiadores de calor y las torres de enfriamiento. Por este motivo, el agua de reposición que se adiciona a los circuitos debe tener una calidad adecuada para evitar dichos daños.

3.4.3.1. Agua de caldera

El agua que entra a la caldera debe tener una concentración de sales baja, ya que dentro de la caldera el agua cambia de fase y se produce el vapor que va a entrar en la turbina. En este proceso se retira agua pura, los contaminantes que vienen en el agua de alimentación quedan disueltos en el agua restante. Con el paso del tiempo, cada vez se obtiene más concentración de sales en el agua dentro de la caldera, las cuales generan problemas en la transferencia de calor y en la integridad de los materiales.

Para evitar una concentración excesiva de sales en el agua dentro de la caldera, se realiza una purga del tambor de lodos, retirando así agua con una alta concentración de sales. Las purgas se realizan a partir de la conductividad o alguna concentración en específico, se pueden hacer de manera manual o automática. La relación entre las concentraciones de sales en el agua de purga y el agua de alimentación se llama ciclos de concentración.

Presión de operación	1001-1500 PSI 6,90-10,34 MPa	1501-2000 PSI 10,35-13,79 MPa
Agua de alimentación		
Oxígeno disuelto, O ₂	<7 ppb	<7 ppb
Hierro total, Fe	<10 ppb	<10 ppb
Cobre total, Cu	<10 ppb	<10 ppb
Dureza total	ND	ND
pH a 25°C	8,8-9,6	8,8-9,6
TOC no volátil	<0,2 ppm	<0,2 ppm
Materia oleosa	<0,2 ppm	<0,2 ppm
Conductividad	<0,5 μS/cm	<0,5 μS/cm
Agua de caldera		

Sílice, SiO ₂	≤2 ppm	≤1 ppm
Conductividad	<150 μS/cm	<80 μS/cm
Sólidos Totales Disueltos en vapor		
TDS	0,1 ppm	0,1 ppm

Tabla 1. Concentraciones límites en agua de caldera. (ASME, 1994)

La tabla 1 resume los parámetros de control en la calidad del agua en la caldera. Tanto el agua de alimentación, como el agua dentro de la caldera y el vapor debe tener un seguimiento para mantener condiciones adecuadas.

El hierro y cobre son minerales que aceleran el proceso de corrosión al igual que el oxígeno. Mientras que la dureza se deposita sobre las superficies metálicas formando incrustaciones. Se espera que la concentración de compuestos orgánicos sea muy baja, ya que para este punto el sistema ha pasado por varios procesos de oxidación. La sílice es la única sal que es volátil, por lo cual genera depósitos en las tuberías de vapor y en la turbina, generalmente los fabricantes de turbinas establecen el límite de sílice en el vapor.

Los ciclos permitidos en las calderas van a depender del diseño del proceso, entre más ciclos, menor consumo de agua en la caldera y mayores condiciones de riesgo potencial para la metalurgia; a menor número de ciclos, mayor consumo de agua, pero menor riesgo para la integridad del equipo. En promedio, las calderas de alta presión operan entre 50 y 100 ciclos de concentración.

3.4.3.2. Agua de refrigeración

El agua de refrigeración no requiere una deionización severa como en el caso de la caldera, sin embargo, la calidad del agua afecta directamente tanto el rendimiento como la integridad de los equipos.

Los ciclos de concentración, al igual que en la caldera, es un parámetro de control importante. La concentración máxima de sales debe mantenerse en ciertos límites para mantener el correcto funcionamiento del proceso. Estos ciclos de concentración se calculan de la misma manera en que en la caldera.

Parámetros de control	
pH	8,0-9,2
Conductividad	<1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Turbidez	<8 NTU
Dureza Total	<700 ppm
Cloro libre, Cl_2	0,05-1,0
Hierro, Fe	<0,3 ppm
Manganeso, Mn	<0,5 ppm
Cloruros, Cl^-	<150 ppm
Sulfato, SO_4	<80 ppm
Recuento Microbiológico	<10 ⁴ UFC/ml

Tabla 2. Parámetros de control del agua de torre en Termosochagota.

En el apartado anterior se mostró como las calderas eran propensas a daños por corrosión e incrustación, los sistemas de enfriamiento además de tener riesgo de corrosión e incrustación están expuestas a crecimiento microbiológico, ya que las temperaturas de operación de una torre son perfectas para su proliferación.

Estas 3 dimensiones de control son claves en el buen funcionamiento del sistema. La velocidad de corrosión se ve afectada por diferentes parámetros, principalmente por el pH, la concentración de Hierro, Sulfato y Cloruros. La incrustación reduce la transferencia de calor, las sales como el Calcio, Manganeso y la Sílice forman complejos que con la temperatura alta se solidifican. Por último, el crecimiento microbiológico genera problemas tanto operacionales como a la salud, ya que los microorganismos generan lodos que luego se depositan en los puntos de transferencia de calor, y algunos de estos son nocivos para la salud humana, generando enfermedades graves como la salmonela.

La cantidad de ciclos máximos permitidos va a depender de la calidad del agua de alimentación, sin embargo, es usual que las torres operen entre 3 y 12 ciclos. En la mayoría de las plantas se utiliza la concentración de sales críticas como criterio de purga.



3.4.4. Oxidación

Hasta ahora se ha explicado de manera general cual es el ciclo del agua, cuáles son sus características y requerimientos para mantener una operación óptima. Para mantener estos requisitos hay que hacer una serie de procesos químicos, entre ellos uno de los más importantes es la oxidación.

La oxidación permite reducir muchos compuestos que, ya sea por motivos operacionales o de salud, generan inconvenientes. Un ejemplo muy común es la oxidación de la legionela en el agua de la torre, su propagación puede generar legionelosis en el personal de planta. Pero no solamente los microorganismos se oxidan, el hierro, por ejemplo, se oxida y pasa de un estado soluble a insoluble, de esta manera es posible retirarlo mediante procesos físicos.

Los principales motivos para oxidar el agua son los siguientes:

- Oxidar metales pesados
- Oxidar compuestos nocivos
- Oxidar microorganismos
- Mantener el medio inocuo
- Reducir formación de lodos
- Reducir taponamiento de membranas RO

Para conseguir esto, se utilizan diferentes agentes oxidantes en su mayoría químicos. La selección de la mejor opción de oxidante se hace de acuerdo a algunos parámetros como:

- Efectividad
- Seguridad
- Costo
- Compatibilidad con el proceso
- Agente principal
- Ausencia de agente oxidante en el agua final

Las principales opciones que se usan actualmente se enumeran a continuación.

3.4.4.1. Hipoclorito de sodio

El hipoclorito de sodio, también conocido como lejía, es quizás el oxidante más utilizado en la actualidad. Su utilidad es tal, que puede ser usado desde aplicaciones diluidas en el hogar, hasta aplicaciones concentradas como nivel industrial.

El hipoclorito de sodio es un líquido amarillento de fórmula química NaOCl. Al encontrarse en solución, se disocia formando la ecuación (1):



Por un lado, se obtiene el Ion Sodio y por el otro Ion Hipoclorito. El ion hipoclorito es el compuesto activo, al tener carga negativa será el responsable de oxidar los compuestos orgánicos y los metales pesados.

La solución de Hipoclorito de sodio en agua usualmente tiene un pH alto, puede oscilar entre 11 y 13 dependiendo de la concentración. Esta relación del pH y la concentración es muy importante para encontrar las especies que se encuentran en solución, como se muestra en la figura:

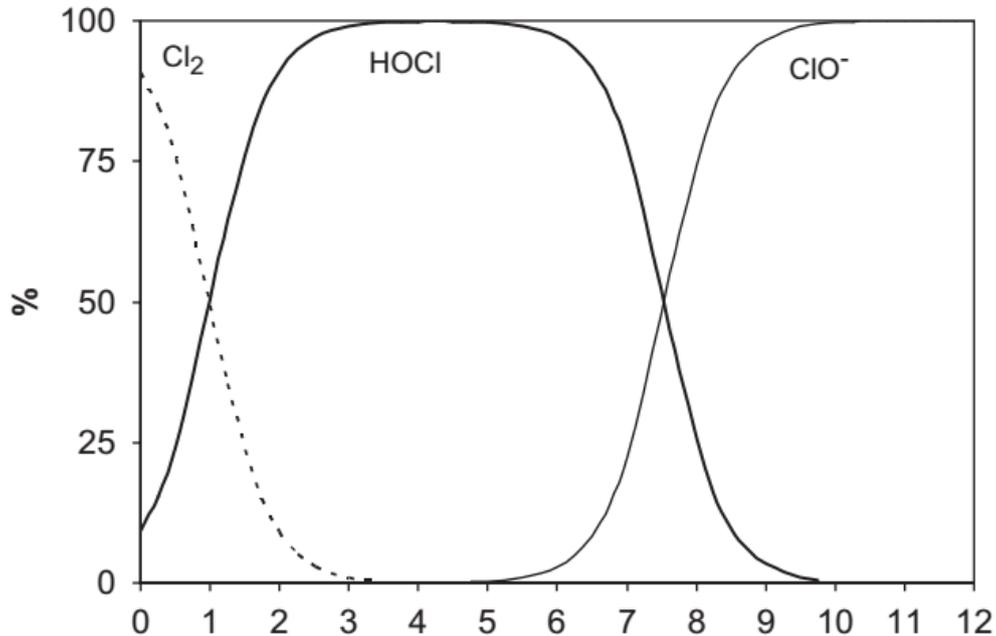
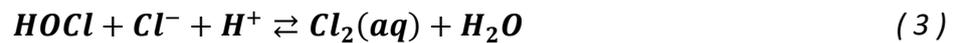


Ilustración 18. Concentración de especies en función del pH. (Fukuzaki, 2006)

Como se puede observar en la ilustración 18, a un pH superior a 10 el hipoclorito [OCl⁻] es la especie predominante; a medida que disminuimos el pH empezamos a tener una mayor concentración de ion hidroxilo [H⁺] y se forma ácido hipocloroso HOCl.

Aproximadamente a un pH de 7,5 se pueden encontrar concentraciones iguales de ambas especies (Li & Cho, 2005). Tanto el hipoclorito como el ácido hipocloroso son poderosos oxidantes y tienen un amplio rango de aplicación

Las reacciones de equilibrio a diferentes pH son las siguientes (Li & Cho, 2005):



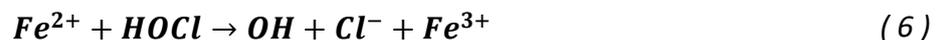
A un pH bajo, con exceso de ion Hidronio $[H^+]$ se presenta la formación de Cl_2 como se muestra en la ecuación (3). Este cloro en solución acuosa migra hasta convertirse en cloro gaseoso, lo cual implica una reducción en la capacidad de oxidación del compuesto. Es importante mantener un pH alcalino para la conservación del hipoclorito de sodio.

- **Mecanismo de oxidación**

Mediante oxidación se controla principalmente el crecimiento microbiológico y los metales pesados.

La acción del ion hipoclorito OCl^- sobre la materia orgánica es muy importante, ya que desnaturaliza las proteínas del muro celular para eliminar así los microorganismos. Además, puede separar los flocs que se forman de biomasa en partículas más pequeñas, de esta manera actúa sobre partículas independientes y las oxida.

En el caso de los metales, puede retirar electrones de iones en disolución para volverlo insolubles, mediante la siguiente reacción (Fukuzaki, 2006):



El rango de acción de pH es muy amplio, pero como se puede observar, es importante mantener las dos especies en disolución para conseguir la oxidación orgánica y mineral.

- **Monitoreo y control**

El control de Hipoclorito de sodio se hace con la cantidad de Cloro Libre (disponible), ya que a medida que el ion Hipoclorito OCl^- reacciona con materia orgánica va

disminuyendo la cantidad de Cloro Libre. De esta manera se acepta que al haber Cloro Disponible no hay presencia de materia orgánica.

Por otro lado, el monitoreo a la oxidación de metales se realiza mediante el seguimiento a la concentración de especies metálicas, es decir, se hace una medición de hierro total antes y después de la oxidación y clarificación.

- **Descomposición**

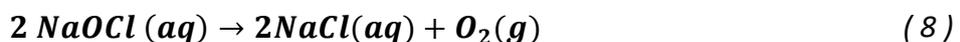
Una de las grandes desventajas del Hipoclorito de sodio frente a otros oxidantes es su inestabilidad, lo cual genera que se pierda su capacidad oxidante. Los parámetros que generan la descomposición del Hipoclorito de sodio son el pH, contaminación por metales y Temperatura.

El impacto del pH ya se explicó anteriormente, como la concentración de Hidroxilo libera Cloro gaseoso y pierde el compuesto activo.

Los incrementos en la temperatura favorecen la descomposición del Hipoclorito para formar sal mediante la reacción (7) (Olin Corporation, 2019). Este efecto es mayor en cuanto más concentrada este la solución inicial. Un aumento de 10°C en la temperatura puede generar pérdida en concentración entre 2 y 4 veces. La cristalización de sal y la generación de gas es un indicador de que el producto está perdiendo actividad.



Por último, la contaminación con metales cataliza la reacción (8) (Sandin, Karlsson, & Cornell, 2015) y produce oxígeno. Esta reacción se observa a simple vista ya que el contenedor puede inflarse de manera brusca.



Reducir la descomposición es vital para mantener el proceso bajo control, la disminución del compuesto activo significa un aumento en la dosificación. Para esto se utilizan tanques aislados, resistentes a los rayos UV y se almacena en un lugar donde no haya contaminación cruzada.

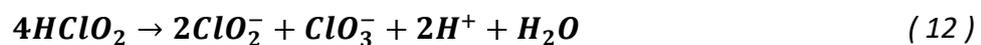
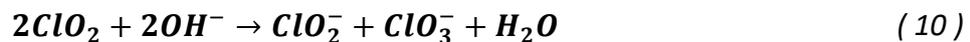
La concentración de cloritos ClO_2^- y cloratos ClO_3^- que se forman en la descomposición pueden afectar la medición de Cloro Libre.

3.4.4.2. Dióxido de cloro

El Dióxido de Cloro es un compuesto gaseoso en condiciones ambientales (condensa por debajo de 11°C), ligeramente amarillento y tóxico. Su toxicidad hace que sea necesario generarlo in-situ.

Es un oxidante muy efectivo, recientemente ha ido en aumento su uso en el tratamiento de agua, ya que actúa en un tiempo corto, no requiere grandes concentraciones y no genera el mismo número de subproductos que otros oxidantes (Xu, y otros, 2022).

El Dióxido de Cloro gaseoso se disuelve rápidamente en agua, formando grandes cantidades de Cloritos (ClO_2^-) y Cloratos (ClO_3^-). Como ya se mencionó, ambos compuestos son altamente oxidantes, y la proporción de su generación depende del pH al que se encuentre la solución, a un pH básico (pH10) se genera principalmente Cloritos (Ecuación 10) y a un pH ligeramente ácido (pH 4) se obtiene una mayor generación de Cloratos (Ecuaciones 11-12) (Lee, Kim, & Lee, 2004).

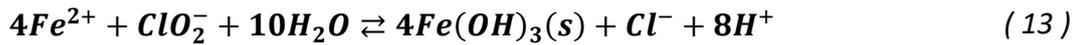


De manera general, el Dióxido de Cloro tiene un rango de operación de pH entre 4 y 10, y se obtienen mejores resultados a temperaturas bajas. Las concentraciones que se usan deben ser menores a 2 ppm (Xu, y otros, 2022), ya que con concentraciones mayores puede generar Cloritos y Cloratos en concentraciones que son nocivas para la salud humana.

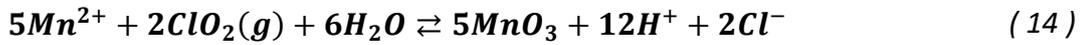
- **Mecanismos de oxidación**

El Dióxido de Cloro es un oxidante rápido para los metales pesados. Su uso hace que inicialmente haya una reacción del Dióxido con los metales, generando una primera oxidación. Luego los subproductos Cloritos y Cloratos continúan con el proceso de oxidación de los metales en solución remanentes (Rittmann, 2004).

El hierro se oxida rápidamente mediante la ecuación (13), el clorito que se ha formado en la ecuación (9) reacciona con el hierro, formando un compuesto sólido.



La oxidación de Manganeso es de gran interés, ya que el Dióxido de Cloro es el oxidante con mejor efecto sobre este mineral. Al igual que el Hierro, reacciona rápidamente mediante la reacción (14).



Algunos autores han hecho correlaciones en la dosificación de oxidantes en comparación con la dosificación de Dióxido de Cloro para oxidar la misma cantidad de Hierro y Manganeso (Rittmann, 2004). Con estos datos se fabricó la tabla 3.

Oxidante	Hierro Fe^{2+}	Manganeso Mn^{2+}
Dióxido de Cloro	0,3	0,5
Cloro	0,62	0,77
Ozono	0,43	0,88
Permanganato de Potasio	0,94	1,92

Tabla 3. Dosificación de oxidantes.

En el caso de la materia orgánica se ha observado una acción rápida, en los primeros 15 minutos elimina la mayor cantidad de materia, mientras que sigue actuando por los siguientes minutos con un residual de Dióxido, de Cloritos y Cloratos (Lee, Kim, & Lee, 2004).

- **Monitoreo y control**

El residual de Cloro Libre es la forma de monitorear y controlar el proceso, al igual que con el Hipoclorito de Sodio. La diferencia principal está en que en el primero se requiere un residual más alto que en el segundo.

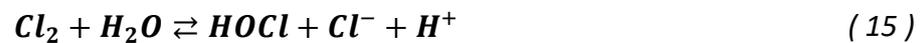
- **Toxicidad y explosividad**

Sin lugar a duda, el defecto más grande que tiene esta tecnología es su riesgo a la salud humana. Las compañías de tratamiento de agua han sabido superar este inconveniente mediante equipos de generación in-situ seguros y confiables, sin embargo, esto genera dudas en algunos usuarios.

3.4.4.3. Cloro gas

El Cloro diatómico es un gas amarillo verdoso con un olor muy característico. Su estado natural es en forma de gas, pero puede ser condensado para su transporte. Es un gas altamente tóxico, puede generar problemas para la salud a largo y corto plazo. Es ligeramente soluble en agua. (National Center for Biotechnology Information, 2022)

La disociación de Cloro (Cl_2) en agua depende, al igual que en los casos anteriores, de la temperatura, concentración de cloro y principalmente del pH. La curva de especies con relación al pH de la Ilustración 18 es igual para el Cloro que para el Hipoclorito, aunque las reacciones de equilibrio cambian. (Deborde & Von Gunten, 2008)



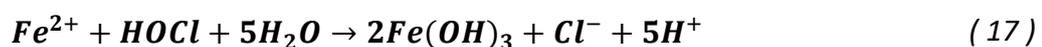
En un rango de pH entre 6-9 (condiciones de operación) las especies que predominan en el agua son Acido Hipocloroso e Hipoclorito. Al igual que en el caso del Hipoclorito de sodio, estas especies son las encargadas de la oxidación.

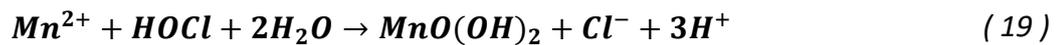
- **Mecanismos de reacción**

La oxidación de la materia orgánica se da principalmente por el Acido Hipocloroso (HOCl) debido a la polaridad de su estructura química (Cl^+-OH^-). Estos radicales se posan sobre los enlaces de carbono y rompen las cadenas, degradando los compuestos y favoreciendo su posterior eliminación. Además, tiene una gran persistencia en el sistema y permite mantener cloro libre que sigue actuando después de un tiempo de su dosificación. (Ghernaout, 2017)

Además de la materia orgánica, el Cloro puede oxidar virus. Esta propiedad lo hace interesante no solo para el tratamiento de agua, sino para la esterilización de elementos en ambientes de la medicina o biología.

La oxidación de metales pesados se puede dar mediante la reacción directa de Cloro y mediante la reacción de Acido Hipocloroso. (Jolley & Carpenter, 1982) Describen que las reacciones que mejor describen el mecanismo mediante el cual se oxida el Hierro y el Manganeseo son las siguientes:





La velocidad y eficiencia de la oxidación de estos compuestos es igual a la del Hipoclorito de Sodio, la diferencia principal radica en la concentración de cloro que se adiciona al sistema. El Manganeso tendrá una mejor oxidación si se realiza a un pH básico.

- **Monitoreo y control**

Se realiza el monitoreo con el residual de cloro libre. Si la concentración de cloro libre disminuye se inyecta cloro al sistema de nuevo.

- **Toxicidad y explosión**

Al igual que los demás compuestos clorados, el cloro tiene una alta toxicidad por inhalación a corto y largo plazo. Al ser un gas a temperatura ambiente, se dificulta su transporte hasta el punto de aplicación. Estas condiciones hacen que la mejor opción sea generar in-situ, sin embargo, los costos de estos equipos son elevados.

Se debe tener precaución con el manejo de estas sustancias gaseosas ya que pueden fijarse con facilidad.

3.4.4.4. Ozono

El Ozono (O_3) es un gas ligeramente azul formado a partir del oxígeno diatómico. Es un compuesto inestable ya que su configuración de 3 átomos de oxígeno comparte electrones entre sí formando un triángulo. Su "estado base" a condiciones normales es de 2 átomos, lo cual significa que ese será su estado de mayor estabilidad, el compuesto buscará su forma más estable.

Es un poderoso oxidante que no deja rastros de olor ni sabor, así que su uso en la clarificación y tratamiento de agua ha crecido con el paso del tiempo. Sin embargo, al ser un compuesto con una baja estabilidad incluso en solución en agua debe ser generado in-situ. El pH, la temperatura y los contaminantes del agua van a afectar su vida media, especialmente el pH.

La solución de Ozono en agua tiene una primera etapa en la que el oxidante principal es el Ozono, pero rápidamente disminuye su concentración y genera radicales de OH, que actúan como oxidante secundario. (Von Gunten, 2003) Muestra las reacciones de equilibrio de la dilución del Ozono en agua.



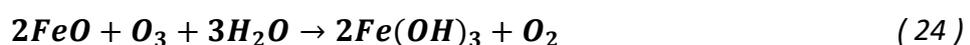
En una primera etapa, el Ozono reacciona con el Ion Hidróxido (OH⁻) presente en el agua, formando el Ion Hidroperóxido (HO₂⁻) y Oxígeno. La presencia de Hidroperóxido genera una la segunda reacción en la cual se forman los radicales de Hidróxido (OH[•]) y radicales del Ion Superóxido (O₂^{•-}). Finalmente, lo radicales del Ion Superóxido reacciona con Ozono para formar radicales del Ion Ozónido (O₃^{•-}). En las 3 reacciones de equilibrio se forma Oxígeno como producto final.

Las reacciones de equilibrio varían en función del pH, ya que cambia la concentración de Iones Hidronio e Iones Hidróxido.

- **Mecanismos de oxidación**

La oxidación de materia orgánica se realiza por reacción directa con el ozono o por reacción con los radicales de Hidróxido producidos en la descomposición en agua. El mecanismo de acción del ozono sobre la materia orgánica se da gracias a la estructura dipolar de este, que se posa sobre los enlaces y les roba los electrones. (Rodriguez, y otros, 2008) Describe las reacciones con cada uno de los compuestos orgánicos que pueden encontrarse en el agua.

La oxidación de Hierro y Manganese se debe realizar en un pH entre 8,0 y 8,5, ya que este es el mejor rango de operación del ozono. Las reacciones entre los iones de Hierro y de Manganese las describen (Rodriguez, y otros, 2008).





Cabe resaltar que el principal compuesto en la oxidación de metales es el Ozono, mientras que los radicales actúan sobre la materia orgánica.

- **Monitoreo y control**

Actualmente existen diversos equipos para medir la concentración de Ozono en el agua. Como ya se dijo, el Ozono se produce en línea, por este motivo se establece el control con el equipo de medición de concentración y así se produce a medida que se disminuye el valor de concentración requerido.

3.4.4.5. Oxidación Avanzada UV

Esta tecnología es ampliamente utilizada en la esterilización de microorganismos y la eliminación de materia orgánica. La oxidación mediante radiación de luz Ultravioleta se realiza utilizando lámparas UV de mercurio de baja densidad cubiertas por mangas de cuarzo, conectadas a corriente eléctrica que genera la radiación necesaria para generar radicales en el agua.

La fotólisis del agua con radiación de 185 nm genera radicales de hidróxido, que son altamente reactivos (oxidantes) con materia orgánica. Sin embargo, existen algunos tipos de Procesos de Oxidación Avanzada UV en los cuales combinan oxidantes regulares, como los vistos anteriormente, para conseguir un mejor resultado. (Yao, y otros, 2022)

Químicamente, el radical de hidróxido (OH^\bullet) cumple el papel de oxidante principal en la Oxidación Avanzada. La eficiencia de estos radicales va a depender de diferentes condiciones del agua, como el pH, la cantidad de materia orgánica y la concentración de carbonatos/bicarbonatos. (Khajouei, Finklea, & Lin, 2022)

- **Mecanismo de reacción**

Cualquier compuesto orgánico que sea reactivo con el radical hidróxido puede ser potencialmente tratado. El rango de contaminantes que pueden ser tratados es amplio, incluye una gran cantidad de contaminantes. Por otro lado, el tiempo de reacción es rápido, elimina rápidamente estos contaminantes.



La Oxidación Avanzada UV no oxida por si sola el hierro, se debe combinar con algún oxidante auxiliar para conseguirlo.

En el caso de Manganeso se ha observado una oxidación de un 46% de la concentración inicial en algunos ensayos de laboratorio (Jerani, Sadeghi, Soltan, Roshani, & Rindall, 2015). Además, encontraron que la oxidación del Manganeso se consigue en los primeros 15 minutos, luego de esto se detiene su oxidación.

4. PLANTA DE ESTUDIO

Este documento se realiza sobre una planta de generación eléctrica llamada Termosochagota (Termopaipa IV), que genera energía eléctrica a partir de la combustión de carbón. Tiene una capacidad instalada de 160 MW y consume 1'700.000 m³ anualmente.

La planta está ubicada en la población de Paipa, Boyacá. Al ser un clima tropical, se mantiene una temperatura constante durante todo el año, la cual varía entre 4°C y 20°C.

Colombia cuenta con la capacidad de satisfacer la demanda mediante hidroeléctricas, sin embargo, en los tiempos secos los niveles de agua en las represas disminuyen y es necesario recurrir a las plantas de combustión para satisfacer la demanda. Por este motivo la planta opera de manera intermitente y bajo demanda de energía.

Un diagrama simplificado de la planta se puede observar en el Anexo 1, donde podemos reconocer las áreas más importantes y el flujo que hacen tanto el agua como el carbón. La caldera encuentra ubicada geográficamente más cerca de la zona de almacenamiento de carbón que de la zona de captación del agua, mientras que las torres se encuentran mucho más cerca de la zona de captación. Las oficinas, los puntos de control y los laboratorios se encuentran ubicados de manera que sea fácil para el personal acceder a los puntos de control de cada proceso.

4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

En la sección anterior se describió el proceso de generación de energía y el tratamiento y pretratamiento que debe realizar el agua. En la Anexo 2 se muestra el diagrama de flujo de proceso que realiza el agua desde su captación hasta su purga.

Inicialmente se capta el agua del río Chicamocha, donde se bombea a los tanques de coagulación y floculación. Se controla periódicamente la concentración de sólidos disueltos y agentes oxidantes en la captación y en los tanques. Dentro de los tanques se retiran los sólidos suspendidos y se realiza una primera oxidación. El agua es almacenada en un tanque donde luego será enviada a desionización o a la torre, dependiendo de la



necesidad. En este tanque se realizan monitoreos de calidad del agua, es importante mantener un residual de cloro adecuado para evitar crecimiento microbiológico.

El agua que va a la caldera pasa por dos sistemas de resina de intercambio iónico, una con carga aniónica y otra catiónica. Cuando sale de este punto, el agua deberá tener una concentración de sales muy baja, sin embargo, es necesario hacerla pasar por un sistema de RO en donde se eliminan los iones remanentes en el agua. Después de pasar este proceso, el agua ingresa al desaireador donde se elimina el oxígeno y puede entrar en la caldera.

El recorrido de la caldera es, como se mencionó anteriormente, inicialmente a través del economizador para luego entrar al tambor de vapor y continuar con su vaporización y generación de vapor sobrecalentado. Este vapor entra a turbina y culmina su recorrido en el condensador.

La calidad del agua en la torre debe ser monitoreada al igual que la del proceso, principalmente en los parámetros que generan corrosión, incrustación y crecimiento microbiológico. Para esto, se controlan parámetros de concentraciones de iones, dureza, pH, Cloro libre y Unidades de Formación Microbiológica

El residual de cloro libre se mantiene en la torre a través de un punto de dosificación directamente en la base de la torre, así se asegura el residual de cloro libre necesario para el buen funcionamiento de la torre.

4.2. SITUACION ACTUAL

Actualmente la planta realiza la oxidación del agua mediante Hipoclorito de Sodio (NaOCl). Se dosifica en 3 puntos: en la entrada al clarificador, en el tanque de alimentación y en la base de la torre.

El agua de captación es agua del río Chicamoca, al ser una fuente superficial, esta agua tiene una gran cantidad de materia orgánica y microorganismos, las sales disueltas no tienen una concentración muy alta. La dosificación en la entrada del clarificador busca oxidar los microorganismos, la materia orgánica y los metales pesados. Se debe obtener

un residual de Cloro libre a la salida del equipo, para asegurar un ambiente inocuo en el tanque de almacenamiento.

El residual de cloro dentro del tanque de almacenamiento debe mantenerse, ya que de esta manera se asegura que el agua no tiene crecimiento microbiológico. Por este motivo se dosifica aquí para mantener el residual.

Finalmente, se explicó que en la torre se tiene la necesidad de dosificar un biocida oxidante para el control microbiológico, así que se establece una concentración de cloro libre en el agua de la torre y se mantiene este mediante la dosificación de biocida.

Los puntos de mayor interés son los de la alimentación y la torre, aquí es donde se dosifica una mayor cantidad de oxidante y donde se debe hacer un seguimiento más riguroso a sus parámetros de calidad.

Parámetros	Agua Bruta	Agua Clarificada	Agua de Torre
pH	6,9	7,2	8,7
Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	219	350	1375
Turbidez (NTU)	48	0,2	8,8
Cloro Libre (ppm Cl_2)	-	0,3	0,1
Hierro Total (ppm Fe)	3,3	0,02	0,2
Manganeso (ppm Mn)	0,4	0,05	0,2
TC (ppm C)	24,5	15,0	49,0
TIC (ppm C)	13,5	9,7	30
TOC (ppm C)	11,3	6,2	19
Cloruros (ppm Cl^-)	17	62	260
Sulfato (ppm SO_4)	10	10	35
Recuento Total (UFC/ml)	1000000	0	1000

Tabla 4. Parámetros de calidad en agua.

En la tabla 4 se resumen los valores normales que se podrían encontrar en el sistema. Algunos valores era necesario tenerlos bajo control para asegurar una operación adecuada de la planta.



Agua Clarificada:

- pH entre 5,5-8,5.
- Turbidez < 0,5 NTU.
- Residual de Cloro Libre > 0,3 ppm.
- Hierro total < 0,05 ppm
- Manganeso < 0,03 ppm
- Recuento microbiológico < 1000

Agua de Torre

- pH entre 8,0-9,0.
- Residual de Cloro Libre > 0,1 ppm
- Cloruros < 260 ppm
- Sulfatos < 60 ppm
- Recuento microbiológico < 1000

4.2.1. Puntos de mejora

Regularmente se alcanzan los requerimientos para un buen funcionamiento de la planta, sin embargo, el uso de Hipoclorito de Sodio como oxidante genera ciertos problemas.

El primero es en la oxidación de Manganeso. La eficiencia de oxidación de Manganeso con Hipoclorito de Sodio no es buena, requiere una gran cantidad de oxidante para alcanzar la concentración objetivo. En algunas ocasiones no se alcanza un nivel bajo a pesar de tener una dosificación adecuada. Como se puede ver en los datos de la Tabla anterior, no se alcanzó la concentración inferior a 0,03 ppm.

La concentración alta de Manganeso genera precipitación, principalmente en las superficies de transferencia de calor como los intercambiadores. Los depósitos ricos en Manganeso pueden generar una capa negra sobre las superficies y depósitos que son fácilmente removibles. En términos operacionales, puede generar reducción en la transferencia de calor y corrosión bajo depósito en las superficies de cobre.



El segundo es la concentración de cloruros en el agua de la torre, ya que los cloruros son altamente corrosivos, generando corrosión bajo deposito. La integridad de todo el sistema de enfriamiento puede verse afectada por estos compuestos, ya que afecta la metalurgia del intercambiador de calor, tuberías y torre de enfriamiento. La causa principal del aumento de cloruros en el sistema es el uso de Hipoclorito.

Este parámetro suele estar bajo control debido al daño que genera su concentración alta, pero la forma de mantenerlo bajo control es eliminar agua de la torre (disminuir ciclos de concentración). Eliminar agua es una solución fácil, pero genera aumentos el caudal de agua que entra a la planta, aumenta la huella hídrica y aumenta el costo del pretratamiento y tratamiento.

Para obtener una mejora en estos aspectos se busca un sustituto del Hipoclorito de Sodio como agente oxidante. La sustitución se hará por alguno de las opciones mencionadas en la sección de oxidación, para esto, se presenta una matriz de selección donde se darán puntuaciones a los parámetros más relevantes y al final se escogerá al de mejor puntaje.

4.2.2. Costos

El Hipoclorito de Sodio se encuentra en forma líquida, así que su distribución se hace en camión cisterna. El Hipoclorito luego es almacenado en un tanque del cual se distribuye a los puntos de aplicación.

El consumo estimado se obtuvo a partir de los datos en planta. Estos consumos dependen de varios factores:

- Condiciones climáticas: Si el año tiene lluvias frecuentes, la planta de generación entrará en operación pocas horas al año. Por el contrario, si es un año seco, la planta operará con mayor frecuencia.
- Condiciones del agua de alimentación: La dosificación de NaClO se hace a partir de las necesidades del agua. Si el agua tiene una carga orgánica e inorgánica alta, va a requerir una mayor concentración de oxidante.



- Estabilidad del NaClO: Ya se explicó porque el Hipoclorito de Sodio es un compuesto inestable, si se almacena por un tiempo prolongado no tendrá la misma eficacia que si se utiliza al poco tiempo de ser producido.

COSTOS DE TRATAMIENTO	
Costo NaClO (€/kg)	0,45
Consumo estimado (kg/año)	481.884
Costo NaClO anual	216.847,80 €

Tabla 5. Costos de tratamiento químico.

5. REQUISITOS DE PROYECTO

Los problemas generados a causa de la concentración de Manganeso en el agua de alimentación y la concentración de cloruros en la torre de enfriamiento pueden ser solucionados mediante una única alternativa, cambiar el agente oxidante.

Anteriormente se presentaron diferentes opciones de agentes de oxidación en el agua industrial, sin embargo, la elección de una de estas opciones debe cumplir con unos requisitos para ser entendida como una opción adecuada.

Los requisitos se distribuirán en 3 grandes pilares, los cuales se subdividen en diferentes aspectos que serán los que se evaluarán y compararán entre las opciones.

5.1. SEGURIDAD

Los agentes propuestos deben ser seguros, tanto para el personal de planta como para el medio ambiente. Estos compuestos son corrosivos y generan impactos negativos sobre la salud humana y el medio ambiente, sin embargo, el método de control, dosificación y manipulación tendrá valor al momento de realizar la elección.

5.1.1. Almacenamiento

El almacenamiento es un aspecto de seguridad muy importante ya que, dependiendo de las características químicas del compuesto, existen diversos potenciales riesgos a la salud de los trabajadores y las instalaciones.

5.1.2. Producción

Algunos compuestos pueden ser producidos in-situ, esto supone una opción al almacenamiento y reduce ciertos riesgos. Sin embargo, los equipos de generación cuentan con un riesgo particular, esto se debe tener en cuenta en la selección.



5.1.3. Manipulación

La manipulación está relacionada con el almacenamiento, el riesgo de manipulación aplica sobre los compuestos que no pueden ser producidos en planta, y que deben ser transportados al punto de dosificación.

5.1.4. Generación de subproductos

La descomposición de los compuestos al reaccionar con agua genera subproductos que pueden ser nocivos a la salud humana. Hay múltiples estudios comparando estos subproductos en agua potable, esta agua al ser principalmente de uso industrial no es un requisito con un peso alto.

5.1.5. Automatización y control

Los equipos de generación en planta cuentan con sistemas internos de automatización y control, esto ayuda a regular la producción y la dosificación. Los sistemas que utilizan el compuesto regulan la dosificación a partir de los residuales del agua. Se evaluará la robustez del sistema.

5.1.6. Riesgo a la salud

Los riesgos a la salud que supone la exposición directa a estos compuestos es uno de los parámetros más importantes a evaluar. Si llega a ocurrir un derrame o una fuga, se debe cuantificar el daño potencial a la salud de las personas que lleguen a estar expuestas.

5.2. EFICIENCIA

Este es quizás el parámetro más importante en la elección. Este es un parámetro que es relativo, ya que al tener propiedades químicas diferentes no se pueden comparar en un parámetro de eficiencia general, sin embargo, se pueden comparar en la eficiencia de oxidación de manganeso.



5.2.1. Reacción con hierro

La oxidación de hierro se realiza de una manera rápida por la naturaleza del metal. La mayoría de los compuestos cumplen con la oxidación de hierro con una buena velocidad de reacción. Para conseguir la oxidación del hierro se debe oxidar el hierro Fe^{+2} a Fe^{+3} , la función principal de los compuestos oxidantes será retirar ese electrón y formar una sal insoluble con el hierro.

5.2.2. Reacción con manganeso

El manganeso no reacciona con la misma facilidad que el hierro. Dependiendo de los radicales que generan la disociación de los compuestos, la velocidad de reacción del Manganeso varia. La oxidación de este compuesto es uno de los principales objetivos del cambio de agente oxidante, ya que como se mencionó anteriormente, su incrustación genera problemas operacionales y de eficiencia. Similar a la reacción del hierro, el manganeso se encuentra formado sales en la forma Mn^{+2} solubles y se requiere oxidar a Mn^{+3} y Mn^{+4} , formando sales insolubles.

5.2.3. Reacción con materia orgánica

La oxidación de materia orgánica es importante para evitar el crecimiento microbiológico y el depósito del material sobre los puntos de intercambio de calor. El crecimiento microbiológico puede generar problemas tanto a la salud humana como a la estructura y equipos.

En general la oxidación de materia orgánica se genera mediante la ruptura de las membranas de los microorganismos. Los mecanismos de reacción de cada uno fueron explicados previamente.

5.2.4. Velocidad de reacción

Las características químicas de oxidación que posee cada uno de los compuestos hacen que reaccionen de manera única con las impurezas. Cada una de estas reacciones tiene



una velocidad, a mayor velocidad de reacción se puede obtener una mejor remoción de impurezas.

5.2.5. Persistencia

Además de tener velocidades de reacción únicas, los compuestos oxidantes deben cumplir un criterio de persistencia en el sistema, para que su acción oxidante se mantenga por un periodo de tiempo suficiente para asegurar inocuidad en el sistema.

5.2.6. Estabilidad

En algunas aplicaciones, estos compuestos deben ser almacenados para su dosificación. La estabilidad del compuesto es importante para mantener las propiedades de oxidante durante el tiempo que este almacenado.

5.3. PRECIO

El tercer pilar de comparación gira en torno al precio. Las diferentes opciones tienen diferentes costos asociados, se hará una estimación de los precios en el mercado, costos de producción o de compra dependiendo del compuesto y ahorros para dar una puntuación.

5.3.1. Costo de producción

Si el compuesto se puede generar en planta, hay un costo asociado a su generación. Se realiza una estimación de estos costos y se compara con el que está actualmente. Ya que el Hipoclorito se trae preparado, el costo de producción de él será nulo.



5.3.2. Costo del equipo

El equipo en el cual se genera el compuesto oxidante también tiene un costo, ya sea de arrendamiento o de compra. El método de oxidación actual no cuenta con este costo asociado.

5.3.3. Costo del compuesto

El costo de compra del compuesto se hace con referencia al costo del Hipoclorito. El costeo se saca a partir del consumo estimado para las condiciones de agua durante un año de operación.

5.3.4. Dosificación

La concentración de compuesto necesaria varia con respecto a la cantidad de compuestos orgánicos e inorgánicos oxidables y respecto a las propiedades químicas de cada uno de ellos. La disminución en la dosificación simboliza la reducción en los costos de tratamiento químico para el sistema.

5.3.5. Generación de cloruros

La generación de cloruros está directamente relacionada con los ahorros. Reducir la concentración de cloruros significa reducir el consumo de agua, ya que se puede concentrar más la torre.

6. MATRIZ DE SELECCIÓN

El método de decisión elegido para realizar la selección de la mejor opción es el Método Pugh. El método Pugh utiliza una matriz para dar una ponderación numérica de diferentes opciones y así facilitar la toma de decisiones.

Stuart Pugh, fue un ingeniero británico autor del libro *Total Design*, publicado en 1990. En este libro, Pugh explica de manera detallada como utilizar una matriz para dar valores numéricos a criterios de selección para así tener una herramienta cuantitativa de selección de opciones.

Ya que la matriz fue diseñada para comparar opciones frente a un producto existente, se ajusta perfectamente a este caso. El primer paso para realizar la matriz es escoger los criterios de comparación, basado en los parámetros que son más relativos y los que se quiere conseguir una mejora en comparación con el anterior producto. El siguiente paso es dar una cuantificación o peso a cada uno de estos criterios; este paso es subjetivo y depende de la percepción del evaluador, ya que es esta persona la que finalmente establece el peso que mejor se ajuste a cada criterio. A continuación, se realiza la comparación entre las alternativas y el producto inicial, se suma cada vez que se obtiene una mejora y se resta cuando se empeora el criterio, cuando no se genera un cambio significativo se deja un valor nulo. Finalmente, se realiza la cuantificación de los valores alcanzados, obteniendo así un valor numérico para cada alternativa; la alternativa con el mayor puntaje es la elegida como la mejor alternativa. (Burge, 2009)

A continuación, en la tabla 6, se presenta el resultado del cálculo ponderado de las opciones de sustitución. Cada uno de los requisitos que deben cumplirse tienen un peso que fue establecido por el autor de este texto, basado en la importancia que tiene cada uno de ellos en el objetivo principal.

El peso se estableció desde 1 hasta 10, siendo 10 un mayor impacto sobre el proyecto.

Requisitos		Peso	Hipoclorito de sodio	Dióxido de Cloro	Cloro Gas	Ozono	Oxidación UV
Seguridad	Almacenamiento	3	0	-1	1	1	1
	Producción	3	0	1	1	1	1
	Manipulación	2	0	-1	1	1	1
	Generación de subproductos	2	0	1	0	1	1
	Automatización y control	3		1	0	0	0
	Riesgo a la salud	7	0	-1	-1	1	1
Eficiencia	Reacción con hierro	6	0	1	1	1	-1
	Reacción con manganeso	9	0	1	1	1	-1
	Reacción con materia orgánica	6	0	1	1	1	-1
	Velocidad de reacción	5	0	1	1	1	-1
	Persistencia	8	0	1	1	-1	-1
	Estabilidad	5	0	1	0	-1	1
Precio	Costo de producción	6	0	-1	-1	-1	-1
	Costo del equipo	6	0	-1	-1	-1	-1
	Costo del compuesto	6	0	1	1	1	1
	Dosificación	7	0	1	1	-1	1
	Generación de cloruros	9	0	1	-1	1	1
TOTAL			0	42	33	33	5

Tabla 6. Matriz de selección.



Se realizará un análisis de cada una de las categorías que encierran los requisitos para la elección final.

6.1. SEGURIDAD

La categoría de seguridad tiene un peso total de 20, lo cual significa un 21,5% del peso total sobre las categorías, siendo así, la categoría con menor peso.

La seguridad tiene menos peso esencialmente porque todas las tecnologías son bastante robustas y seguras, en este apartado no se obtiene una gran diferencia entre las opciones.

6.1.1. Almacenamiento

- **Hipoclorito de sodio:** El hipoclorito se almacena dentro de tanques de almacenamiento de fibra de vidrio, evitando el contacto directo con la luz solar ya que esta lo degrada. Debido a la cantidad necesaria para mantener el sistema, se requieren grandes tanques de almacenamiento para mantener la operación de la planta.
- **Dióxido de cloro:** El dióxido de cloro no es necesario almacenarlo, ya que este se produce mediante un reactor en la planta. No genera ninguna ventaja ya que para su producción son necesarios unos precursores que deben ser almacenados. Estos precursores son ácidos y se almacenan de igual manera en tanques de fibra de vidrio. La puntuación es negativa ya que el almacenamiento de ácido genera un mayor riesgo en comparación con el almacenamiento de hipoclorito.
- **Cloro gas:** El cloro gaseoso puede ser almacenado en forma de gas o producido in-situ como el Dióxido. Para este análisis supondremos un equipo de generación, ya que es mucho más seguro que almacenar cloro en forma de gas (gas bastante toxico). El proceso de generación de cloro se realiza mediante un reactor, pero a diferencia del dióxido, utiliza salmuera como reactivo. El almacenamiento de salmuera es más sencillo y seguro que el hipoclorito.

- **Ozono:** El ozono se genera en un reactor dentro de planta. Su producción se realiza utilizando oxígeno o aire, por lo cual no es necesario un gran espacio de almacenamiento ni se genera peligro por su almacenamiento.
- **Oxidación UV:** La oxidación de UV se genera mediante lámparas que no requieren almacenamiento de ningún producto, simplemente se instalan en los puntos en los cuales se quiere realizar la oxidación y se encienden. Es mejor opción que el hipoclorito ya que no ocupa espacio de almacenamiento.

6.1.2. Producción

- **Hipoclorito de sodio:** El hipoclorito se produce dentro de planta especial para su producción. Se transporta en camiones cisterna como producto terminado, por lo cual no cuenta con ningún riesgo relacionado con su producción.
- **Dióxido de cloro:** El dióxido de cloro si es generado en planta, su producción se realiza mediante la reacción de 2 precursores químicos. Los equipos de generación cuentan con un sistema de seguridad avanzado que lo hace muy seguro y eficaz. Es mejor alternativa ya que no se pierde producto final en el transporte y almacenamiento, sino que se produce lo que se usa.
- **Cloro gas:** El cloro gaseoso se genera mediante electrolisis de salmuera, en un proceso bastante seguro y eficiente. La producción en planta favorece la producción de producto a la medida de la necesidad del proceso.
- **Ozono:** El ozono se genera en un reactor dentro de planta, mediante una descarga eléctrica al aire que entra dentro del equipo. Al igual que las otras opciones genera un beneficio en comparación con el hipoclorito.
- **Oxidación UV:** La oxidación de UV no requiere ningún tipo de producción, ya que simplemente funciona con luminarias.

6.1.3. Manipulación

- **Hipoclorito de sodio:** El hipoclorito se debe manipular para el proceso de descarga del producto, se deben utilizar bombas de trasiego para mover el líquido del camión al tanque de almacenamiento. Estas maniobras suponen un riesgo potencial para los operarios que deben realizar la actividad.

- **Dióxido de cloro:** El dióxido de cloro no se debe manipular como producto final, pero sus precursores deben ser almacenados en planta de la misma manera que el hipoclorito. Al ser los ácidos productos corrosivos, existen más riesgos asociados a la actividad de trasiego.
- **Cloro gas:** El cloro gaseoso no debe ser almacenado ni manipulado como producto final, y sus precursores son inofensivos a la salud humana. El producto tiene ventajas sobre el hipoclorito.
- **Ozono:** El ozono no se manipula como producto final, su precursor es el aire, así que no genera ningún riesgo a la salud humana.
- **Oxidación UV:** La oxidación de UV no debe ser manipulada, luego de instalar las lámparas no se debe realizar ninguna actividad en su proximidad, a menos que se vaya a realizar algún trabajo.

6.1.4. Generación de subproductos

- **Hipoclorito de sodio:** El hipoclorito genera una serie de subproductos que son potencialmente tóxicos para la salud humana. Este es uno de los motivos por los cuales se regula su uso en agua potable. En este caso, al ser agua industrial no es uno de los parámetros más importantes.
- **Dióxido de cloro:** El dióxido de cloro no genera los subproductos que genera el hipoclorito ya que las reacciones de disociación en medio acuático son diferentes. Esto le da ventaja sobre el hipoclorito ya que no genera estos subproductos tóxicos.
- **Cloro gas:** El cloro gas genera los mismos subproductos del hipoclorito, ya que su composición química genera la misma disociación del hipoclorito.
- **Ozono:** El ozono no genera ningún subproducto nocivo.
- **Oxidación UV:** El uso de rayos UV para la oxidación no genera ningún tipo de subproducto.

6.1.5. Automatización y control

- **Hipoclorito de sodio:** La dosificación de Hipoclorito se realiza bajo el control sobre la concentración del residual de cloro libre. De esta manera se regula la sobredosificación y posibles riesgos a la salud.
- **Dióxido de cloro:** El control sobre el dióxido de cloro se realiza igualmente sobre la concentración de cloro libre, así se regula su sobredosificación. Además, el equipo de generación cuenta con un sistema robusto de control de producción, esto le da cierta ventaja sobre el Hipoclorito tradicional.
- **Cloro gas:** El cloro gas se regula de manera similar, la sobredosificación del producto se puede regular fácilmente. El equipo de generación cuenta con este sistema de control de producción para evitar riesgos a la salud.
- **Ozono:** El ozono se regula de manera diferente, ya que no genera residual de cloro libre, en ese sentido, se encuentra en desventaja con respecto a las otras opciones.
- **Oxidación UV:** Los rayos UV como agente oxidante no se controlan mediante ningún método de los mencionados anteriormente, ya que este funciona mediante luz, se mantienen las lámparas encendidas todo el tiempo.

6.1.6. Riesgo a la salud

- **Hipoclorito de sodio:** El hipoclorito es un compuesto tóxico e irritable, puede generar problemas de salud graves si se entra en contacto directo con él.
- **Dióxido de cloro:** Es un gas bastante corrosivo, tóxico y puede generar riesgo de explosión. Sin embargo, el equipo de generación cuenta con un sistema bastante robusto para evitar cualquier tipo de fuga.
- **Cloro gas:** El cloro gas es un gas bastante tóxico y corrosivo. Al igual que el sistema de generación de Dióxido de cloro, cuenta con un sistema de seguridad adecuado para el producto.
- **Ozono:** El ozono puede generar afectación a la salud, pero no tiene el mismo potencial de daño que tienen los compuestos clorados.
- **Oxidación UV:** Los rayos UV no generan ningún tipo de daño a la salud por contacto esporádico. Puede generar cáncer después de un contacto prolongado.

6.2. EFICIENCIA

La categoría de eficiencia tiene un peso total de 39, lo cual significa un 41,9% del peso total sobre las categorías, siendo así, la categoría con mayor peso.

La eficiencia es el mayor objetivo de este estudio, ya que a partir de los beneficios que podría obtener al usar cualquier alternativa. Los aspectos con más relevancia para la elección serán relacionados con la duración y la capacidad de oxidación.

6.2.1. Reacción con hierro

- **Hipoclorito de sodio:** La reacción del hipoclorito de sodio con el hierro es rápida y eficaz. Se puede conseguir una oxidación avanzada de los iones de hierro soluble y alcanzar la remoción de la mayor parte del hierro del agua. Se requiere 1,33 ppm de hipoclorito de sodio para oxidar 1 ppm de hierro.

- **Dióxido de cloro:** El dióxido de cloro es un excelente oxidante de hierro, su reacción es rápida y eficaz. Se puede entender como una mejora en la reacción con hierro ya que velocidad de reacciones mayor y puede alcanzar una mayor cantidad de iones oxidados.

El dióxido de cloro puede oxidar un 99% del hierro soluble en unos 5 minutos. Se requiere 0,29 ppm de dióxido de cloro para oxidar 1 ppm de hierro.

- **Cloro gas:** El cloro gaseoso tiene la misma cinética que el hipoclorito de sodio. Ambos compuestos se disocian de la misma manera, formando subproductos similares. La diferencia principal está en la concentración de cloro, en el cloro gas se dosifica cloro con una concentración del 100%, mientras que el hipoclorito esta diluido.

- **Ozono:** El ozono tiene una buena cinética de reacción con el hierro. Su velocidad de reacción es rápida y oxida una gran cantidad de hierro con una pequeña cantidad de ozono. En comparación con el Hipoclorito de sodio, se tiene beneficios en la no generación de subproductos, su velocidad es similar. Se requiere 0,13 ppm de ozono para oxidar 1 ppm de hierro.

- **Oxidación UV:** La oxidación por UV no es compatible con altas concentraciones de hierro. Si se tiene una concentración de hierro superior a 0,3 ppm, se está expuesto a generar una capa de hierro sobre las lámparas, ya que este se oxida y se deposita sobre el cristal. Esto afecta drásticamente el funcionamiento del equipo, ya que impide el paso de la luz.

6.2.2. Reacción con manganeso

- **Hipoclorito de sodio:** La reacción del hipoclorito de sodio con el manganeso es poco eficaz. En general, se puede oxidar 1 ppm de manganeso con 5 ppm de hipoclorito de sodio. Una de las razones más importantes para justificar el cambio es la oxidación alcanzada con el hipoclorito.
- **Dióxido de cloro:** El dióxido de cloro es un excelente oxidante de manganeso. Se estima que la velocidad de reacción del dióxido de cloro puede ser 2 veces más alta que la del hipoclorito, además de necesitar menos cantidad. Se puede oxidar 1 ppm de manganeso con 2,5 ppm de dióxido de cloro.
- **Cloro gas:** El cloro gaseoso tiene una rápida reacción con el manganeso. Su mecanismo es similar al que se genera con el Dióxido de cloro, pero se requiere una cantidad menor de producto. Se estima que se oxida 1 ppm de manganeso con 2 ppm de cloro.
- **Ozono:** El ozono tiene una cinética rápida con el manganeso, de hecho, requiere una pequeña cantidad de oxidante para alcanzar una oxidación adecuada. Se puede oxidar 1 ppm de manganeso con 1,6 ppm de Ozono.
- **Oxidación UV:** La oxidación por UV no es compatible con altas concentraciones de manganeso. Análogamente a lo que sucede con el hierro, concentraciones superiores a 0,05 ppm de manganeso hacen que se obstruya la emisión de luz, disminuyendo así el efecto oxidante del equipo.

6.2.3. Reacción con materia orgánica

- **Hipoclorito de sodio:** La reacción del hipoclorito de sodio con la materia orgánica es rápida y eficaz. Se obtienen resultados adecuados en los conteos microbiológicos que se realizan periódicamente.



- **Dióxido de cloro:** El dióxido de cloro es un buen oxidante de materia orgánica. Oxida compuestos de manera rápida y eficiente, además de mantener el número de microorganismos bajo durante la operación. Los conteos microbiológicos dan resultados adecuados.
- **Cloro gas:** El cloro gaseoso tiene una cinética similar al Dióxido de cloro, generando resultados similares. Puede mantener el conteo microbiológico en la cantidad adecuada.
- **Ozono:** El ozono es un excelente oxidante, oxida rápidamente la materia orgánica. Sin embargo, no puede mantener un conteo microbiológico adecuado debido a su baja persistencia.
- **Oxidación UV:** La oxidación por UV tiene dificultades de control sobre la materia orgánica, puede depositarse sobre la fuente de luz y obstruir la salida de esta.

6.2.4. Velocidad de reacción

- **Hipoclorito de sodio:** La velocidad de reacción del hipoclorito es media. Previamente se estudiaron las reacciones del hipoclorito donde se mostraba las reacciones que se llevan a cabo con las impurezas.
- **Dióxido de cloro:** El dióxido de cloro tiene una velocidad de reacción bastante rápida, puede oxidar la mayor parte de las impurezas durante los primeros minutos de la reacción.
- **Cloro gas:** El cloro gas tiene una velocidad rápida de reacción. Tanto el cloro gas como el dióxido son compuestos gaseosos diluidos en agua, esto hace que la reacción sea muy rápida.
- **Ozono:** La velocidad de reacción del ozono es rápida. Al igual que en el cloro gas y el dióxido, su estado inicial ayuda a acelerar el proceso de oxidación.
- **Oxidación UV:** La velocidad de reacción de los rayos UV es media, requiere tener exposición a los rayos durante un tiempo prolongado. No saca diferencia en comparación con el Hipoclorito.

6.2.5. Persistencia

- **Hipoclorito de sodio:** El Hipoclorito de sodio tiene una persistencia adecuada para el tratamiento de agua de torre. Puede mantener el sistema inocuo por un prolongado periodo de tiempo, ya que luego de oxidar las impurezas se mantiene un residual de cloro libre.
- **Dióxido de cloro:** La persistencia del Dióxido de cloro es adecuada. Genera un residual de cloro libre que se mantiene por un prolongado periodo de tiempo.
- **Cloro gas:** El cloro gas genera un residual adecuado. Los compuestos halogenados generan un residual que mantiene la actividad y sigue oxidando los nuevos compuestos orgánicos e inorgánicos que puedan aparecer.
- **Ozono:** El ozono no genera ningún tipo de residual. Esto es una de las grandes desventajas del uso de Ozono. Su persistencia es tan baja que se tendrían que poner diferentes puntos de dosificación para mantener oxidante en el sistema.
- **Oxidación UV:** La oxidación UV no tiene ningún tipo de persistencia, si las impurezas no están en contacto directo con la luz, no se obtendrá oxidación alguna.

6.2.6. Estabilidad

- **Hipoclorito de sodio:** La estabilidad es uno de los puntos débiles del Hipoclorito. Es un compuesto bastante inestable, pero pierde concentración de compuesto activo con el paso del tiempo. El calor hace que se degrade en sal.
- **Dióxido de cloro:** El dióxido de cloro no tiene problemas de estabilidad ya que no se debe almacenar. Al ser producido en planta, no se requiere que tenga una estabilidad alta porque se dosifica inmediatamente después de ser producido.
- **Cloro gas:** El cloro gas se genera en un equipo en planta, al igual que el dióxido de cloro. No se requiere que tenga una estabilidad alta.
- **Ozono:** El ozono es un compuesto inestable, se genera en planta, pero se puede degradar rápidamente. Esa inestabilidad se demuestra con la baja persistencia en el sistema.
- **Oxidación UV:** La oxidación UV es super estable ya que no tiene ninguna reacción asociada con el mecanismo de oxidación de este método.



6.3. PRECIO

La categoría de precio cuenta con el 36,6% del puntaje total de selección, lo cual lo hace el segundo en importancia.

El precio es el segundo criterio de importancia para la selección ya que debemos buscar una solución que se amortice rápidamente y sea más económico o por lo menos del mismo precio que la tecnología actual. En general se analizan los costos de producción, transporte y los ahorros que se pueden alcanzar.

6.3.1. Costo de producción

- **Hipoclorito de sodio:** El hipoclorito no tiene ningún costo de producción asociado, ya que se compra ya preparado en forma de solución líquida.
- **Dióxido de cloro:** El dióxido de cloro tiene un costo de producción asociado, ya que se deben consumir reactivos precursores para la formación del producto. Dependiendo del proveedor del equipo, se utilizan diferentes tipos de reacciones y precursores, en este caso, utilizaremos como base la reacción de ácido sulfúrico con Purate (marca registrada de uno de los proveedores)
- **Cloro gas:** El cloro gaseoso se genera por electrolisis de salmuera. La salmuera se genera a partir de sal, lo cual no equivale a un coste alto, sin embargo, la electrolisis si genera un coste asociado de producción alto (aunque al tratarse de una térmica no supone un inconveniente)
- **Ozono:** El ozono se genera mediante electrolisis de aire u oxígeno. El aire no genera ningún costo adicional, pero al igual que el cloro gas, el consumo de electricidad es alto.
- **Oxidación UV:** La oxidación de UV no requiere ningún tipo de precursor, así que su único consumo es la electricidad de mantener las lámparas encendidas.

6.3.2. Costo de equipo

- **Hipoclorito de sodio:** El hipoclorito no tiene ningún costo de equipos de generación asociado.

- **Dióxido de cloro:** El dióxido de cloro tiene costo de equipo asociado, ya que se debe comprar el equipo de generación.
- **Cloro gas:** El cloro gaseoso tiene costo de equipo asociado, ya que se debe comprar el equipo de generación.
- **Ozono:** El ozono tiene costo de equipo asociado, ya que se debe comprar el equipo de generación.
- **Oxidación UV:** La oxidación de UV tiene costo de equipo asociado, ya que se debe comprar las lámparas de generación.

6.3.3. Costo del compuesto

- **Hipoclorito de sodio:** El hipoclorito de sodio debe ser comprado a los proveedores del oxidante. Diferentes proveedores existen en el mercado que ofrecen este producto.
- **Dióxido de cloro:** El dióxido de cloro no se compra preparado, así que no tiene un costo directo de compuesto diferente a los costos de producción y del equipo.
- **Cloro gas:** El cloro gaseoso no se compra preparado, así que no tiene un costo directo de compuesto diferente a los costos de producción y del equipo.
- **Ozono:** El ozono no se compra preparado, así que no tiene un costo directo de compuesto diferente a los costos de producción y del equipo.
- **Oxidación UV:** La oxidación de UV no se compra preparado, así que no tiene un costo directo de compuesto diferente a los costos de las lámparas y la electricidad.

6.3.4. Dosificación

- **Hipoclorito de sodio:** El hipoclorito de sodio es el punto de comparación de la dosificación. Si se requiere más dosificación se cuenta como punto negativo, si consume menos se cuenta como punto positivo.
- **Dióxido de cloro:** El dióxido de cloro requiere una dosificación menor que el hipoclorito de sodio.
- **Cloro gas:** El cloro gaseoso requiere una dosificación menor que el hipoclorito de sodio.



- **Ozono:** El ozono necesita una dosificación mayor para asegurar el medio oxidante.
- **Oxidación UV:** La oxidación de UV no se puede comparar ya que no se dosifica.

6.3.5. Generación de cloruros

- **Hipoclorito de sodio:** El hipoclorito de sodio genera una gran cantidad de cloruros, esta es una limitante en los ciclos de concentración.
- **Dióxido de cloro:** El dióxido de cloro no genera cloruros.
- **Cloro gas:** El cloro gaseoso genera cloruros al igual que el hipoclorito de sodio.
- **Ozono:** El ozono no genera cloruros.
- **Oxidación UV:** La oxidación de UV no genera cloruros.

6.4. RESULTADO

Después de realizar la contabilización de los puntos, se observó que la solución que mejor se adapta a las necesidades de la planta es el Dióxido de Cloro.

Ahora, realizado el proceso de análisis de posibilidades, se efectuará una descripción de la tecnología escogida, un análisis de costos y los posibles ahorros que podría tener.

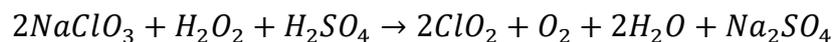
7. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

Existen diferentes métodos de producción de Dióxido de Cloro, cada uno de los proveedores de tratamiento químico cuentan con diferentes tecnologías de producción. El equipo que se escogió en este trabajo es el Purate, perteneciente a Nalco Water.

7.1. REACCIÓN QUIMICA

Purate basa su tecnología en la reacción entre Clorato de Sodio al 40% (ingrediente activo), Peróxido de Hidrogeno al 8% (estabilizador) y Ácido Sulfúrico al 85%. El medio ácido que se genera en el reactor genera la reducción del Clorato de Sodio a Dióxido de Cloro. (Ecolab, s.f.)

La estequiometria de la reacción que sucede dentro del reactor es la siguiente:



La reacción genera Dióxido de Cloro en fase gaseosa, el cual es arrastrado al agua motivante formando así una mezcla de agua oxidante que se dosifica en línea.

Esta estequiometria de diseño del reactor favorece la velocidad de la reacción, ya que el Peróxido de Hidrogeno cumple una función de estabilizador de la reacción. Por otro lado, consume menor cantidad de ácido, lo cual ayuda a controlar el consumo de precursores y el pH de la mezcla final. La rápida velocidad de reacción favorece el diseño de un reactor de menor tamaño y se puede alcanzar el punto de operación rápidamente.

Con esta cinética, se puede asegurar una eficiencia del 95% en la generación de Dióxido de Cloro, sin embargo, es importante asegurar un medio ácido para que la reducción sea completa (Clorato de sodio como reactivo limitante). (Burke, Tenney, Indu, & Carr, 1993)

7.2. GENERADOR

El generador de dióxido de cloro es un equipo que cuenta con un reactor, dos bombas de dosificación de precursores, una bomba booster del agua motivante y una pantalla táctil para la configuración.

La ilustración 19 muestra el equipo. El agua motivante pasa a través de la bomba booster, en donde se aumenta la velocidad del flujo; la velocidad del fluido es importante para el buen funcionamiento del reactor, ya que se debe asegurar presión de vacío dentro del reactor. Cuando se alcanza el vacío necesario, entran en funcionamiento las bombas de los precursores generando el Dióxido de Cloro. Al ser una mezcla principalmente gaseosa, el efecto Venturi generado por el agua motivante hace que el gas se dirija hacia el agua, generando así la mezcla de producto concentrado.

El equipo cuenta con diferentes entradas de señales de control, que permiten que el equipo regule la dosificación en función de la necesidad del sistema. Envía datos de consumo de precursores y producción, además de por ser monitorizado en línea desde cualquier parte.

Con respecto a la seguridad, el equipo cuenta con sensores de fuga de precursores y de Dióxido de Cloro (Como se explicó anteriormente, puede ser explosivo). Además, cuenta con protección anti explosión y seguros de inicio que no se activan si no tiene las condiciones adecuadas de operación.



Ilustración 19. Esquema del equipo. (Ecolab, s.f.)

7.2.1. Líneas de flujo

Las líneas de flujo deben ser de un material resistente a la corrosión, ya que la mezcla de dióxido de cloro concentrada que sale del equipo es muy corrosiva. Se consideran, al igual que en los tanques, materiales poliméricos.

La primera opción es utilizar PVC Schedule 80 por su resistencia química y mecánica. En Colombia es usual realizar las instalaciones en este material.

7.2.2. Tanques de precursores

La instalación de los tanques de almacenamiento de precursores es una de las tareas previas que se deben realizar. El almacenamiento de los precursores es uno de los principales riesgos de seguridad asociados con este proyecto, debido a sus características químicas.

- **Ácido Sulfúrico**

El ácido sulfúrico es uno de los ácidos más usados en la industria gracias a su bajo coste y alta acidez. Se utiliza en procesos como catalizador, reductor de pH, reactivo, etc.

Existe una gran aceptación con el uso de este ácido en la industria, pero para mantener un proceso seguro, es necesario tener el depósito adecuado para su almacenamiento. Se recomendará instalar tanques de materiales poliméricos resistentes a la acidez del ácido, como PFR o PEHD.



Ilustración 20. Depósito doble pared para almacenamiento de químicos. (Siler Tank, 2022)

Debido a la naturaleza del compuesto, es necesario utilizar depósitos de doble pared, para que contenga el derrame en caso de ruptura. Debe contar con un venteo para evitar la acumulación de gases y un sistema de vertido de rebose. Algunos de ellos tienen un visor de nivel, es importante monitorear la cantidad de producto que se tiene dentro, tanto para evitar que se agote como para controlar los consumos.

- **Purate**



El Purate es por naturaleza inofensivo, sin embargo, genera una reacción fuerte con los compuestos orgánicos. Se debe evitar la contaminación con cualquier tipo de suciedad, ya que puede generar una reacción indeseada en el almacenamiento.

El tanque que se debe utilizar tiene unas características similares a las de ácido, por simplicidad se utiliza el mismo tipo de materiales y de tanques para el almacenamiento. En este tanque el venteo tiene mayor relevancia, ya que puede generar gases si se almacena por un tiempo prolongado.

7.2.3. Sistema de contención secundario

Los tanques deben tener unos diques de hormigón que contengan los químicos en caso de derrame accidental durante el proceso de trasiego del camión al tanque. Su volumen debe ser 20% superior al del volumen del tanque, y deben ser individuales para cada uno de los precursores.

7.2.4. Alimentación agua motivante

La alimentación del agua motivante se hace por la parte trasera del equipo, es importante asegurar un caudal entre 1,4 y 29,5 m³/h. El flujo de agua será introducido a una bomba booster, la cual debe subir la presión a unos 10 bar. Tanto la presión como el flujo deben mantenerse durante el proceso de producción, ya que son responsables de generar vacío en el reactor; si el vacío se llegase a perder, el equipo inmediatamente sale de funcionamiento y activa el protocolo de apagado, evitando así acumulación de Dióxido de Cloro gaseoso dentro del reactor.

- **Bomba booster:**

Se ha mencionado la importancia de la bomba booster para el funcionamiento del equipo. Su principio de funcionamiento es similar al de un ventilador, utiliza un mecanismo que gira (rodete) para impulsar el líquido a través de ella aumentando su presión. Se usa principalmente en locaciones donde es necesario aumentar la presión.

Una de las principales ventajas sobre las bombas centrifugas tradicionales es que pueden encender y apagar rápidamente, además son más resistentes a la abrasión y cavitación.

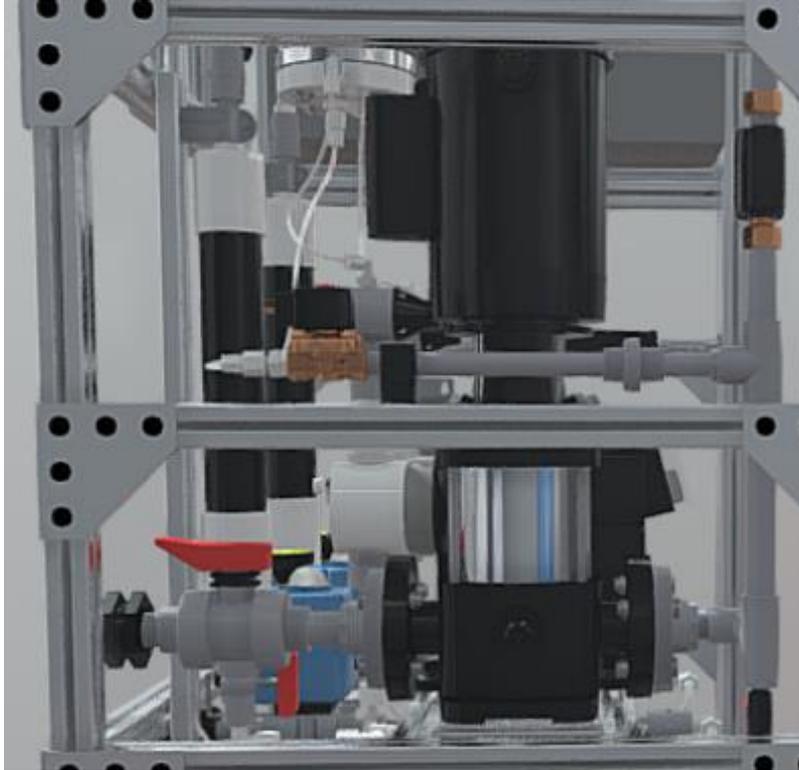


Ilustración 21. Sección de alimentación de agua motivante. (Ecolab, s.f.)

7.2.5. Bombas de dosificación

Los precursores cuentan con bombas de dosificación finamente calibradas. La relación entre la cantidad de Acido y Purate se debe mantener para que la eficiencia de la reacción sea la esperada.

Estas bombas de dosificación son bombas de diafragma. Su principio de funcionamiento es mediante pulsaciones del diafragma, va impulsando el fluido a través de las mangueras hacia el reactor.

Las bombas tienen un enlace de control que modifica su dosificación con respecto a las necesidades del sistema, así reaccionan de manera inmediata cuando el sistema necesita algún incremento o disminución de dióxido de cloro.

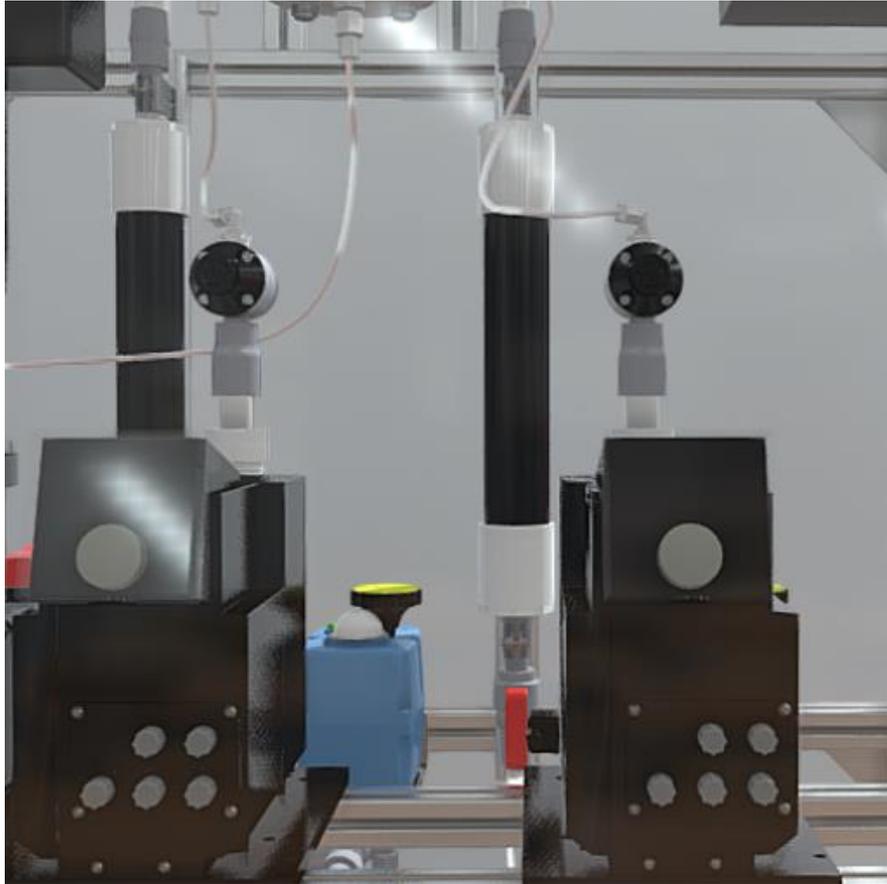


Ilustración 22. Sección de dosificación. (Ecolab, s.f.)

7.2.6. Reactor

El reactor es un equipo simple. Al ser esta una reacción espontánea, no se requiere de sistemas de agitación o calentamiento. Consiste en un cilindro plástico con una capa metálica para asegurar la resistencia mecánica, unido a una tubería curva que se conecta con la tubería de agua motivante.

Como se mencionó previamente, el agua motivante pasa a una alta presión por el eyectador, lo cual hace que se genere vacío dentro del reactor. Con este sistema se asegura que todo el dióxido producido sale hacia el punto de dosificación.

Por último, el reactor cuenta con un sensor de vacío, el cual debe marcar una presión máxima de 0,4 bar, si se sobrepasa esta presión el sistema no arrancará o parará la producción.

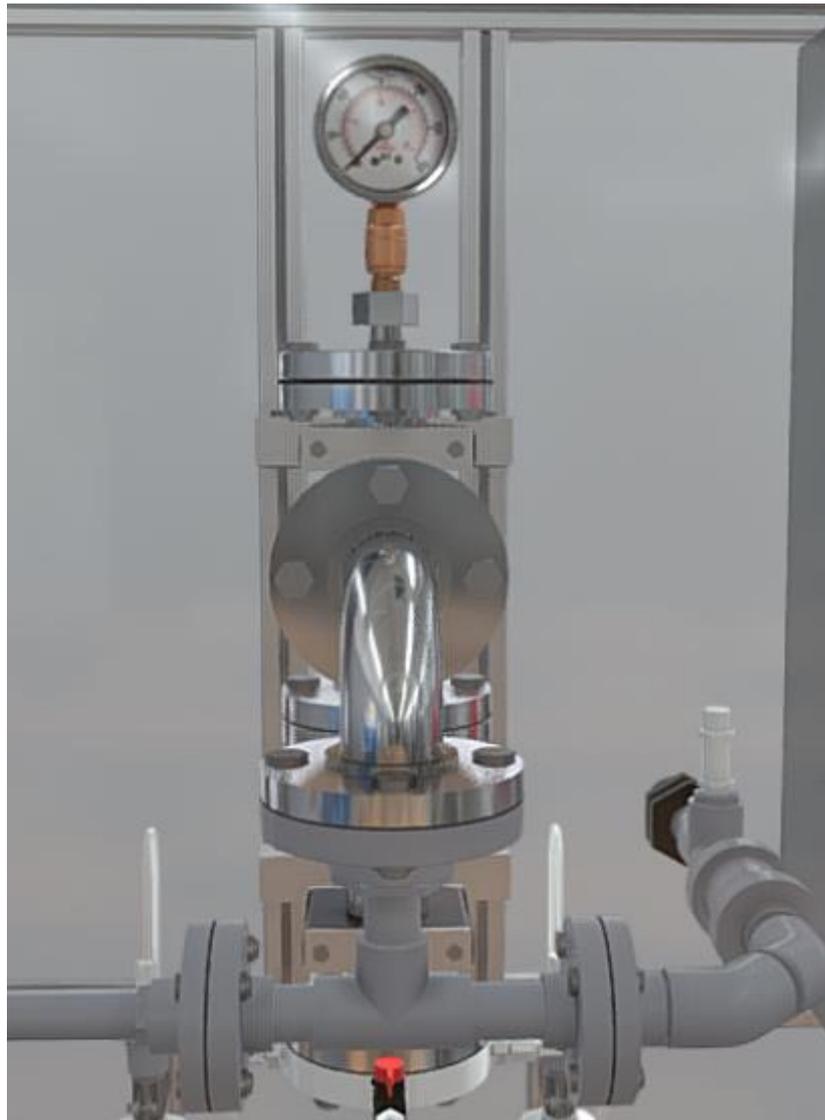


Ilustración 23. Sección del reactor. (Ecolab, s.f.)

A la salida del reactor el equipo cuenta con una mirilla, donde se puede verificar que el equipo este generando dióxido de cloro.

7.2.7. Interfaz con el usuario

El equipo cuenta con una interfaz sencilla y amigable. Tiene una pantalla táctil mediante la cual se puede monitorear el funcionamiento y la producción. Si se cuenta con permisos de usuario, se puede modificar la relación entre Acido y Purate, además de aumentar o disminuir la producción.



El equipo además tiene un sistema de internet móvil que le permite subir datos a la red, así se puede ver el estado del equipo desde cualquier parte sin tener que estar cerca de él.

7.2.8. Sensores y control de seguridad

Una de las razones principales por las que no se había usado dióxido de cloro en forma masiva en la industria era por su explosividad e inestabilidad en forma de gas. Este equipo cuenta con sensores de control que lo hacen muy seguro.

- **Sensor de flujo de alimentación**

Justo después de la bomba booster, se encuentra un sensor de flujo, este sensor no tiene ningún sistema de actuación, simplemente indica cual es flujo que esta saliendo de la bomba.

- **Válvula antirretorno eléctrica**

En la parte trasera de las bombas de dosificación, se encuentra una válvula antirretorno. Esta válvula se bloquea para evitar que el fluido vaya en sentido contrario, si por ejemplo el equipo se inunda y llega agua a la manguera de dosificación, esta no pasara al taque de los químicos (lo cual generaría una reacción altamente exotérmica).

- **Sensores de vertido en las bandejas**

En la parte inferior de las dosificadoras, se instalan unas bandejas que retienen los derrames de químicos. En cuanto exista algún derrame, el sistema iniciara su proceso de apagado.

- **Sensor de vacío**

Sensor que asegura que exista vacío en el reactor, si se pasa del limite dispara el equipo y entra en el proceso de apagado.

- **Sensor de detección de dióxido de cloro**



Este sensor está situado en la parte exterior. Es un sensor electroquímico que reacciona con el cloro en el ambiente. En caso de haber alguna fuga, el sensor enviará una señal de alerta y activará el proceso de apagado.

- **Cabina de seguridad**

Todo el equipo está dentro de una cabina de plástico resistente a las explosiones. Esta cabina cuenta con un dispositivo de bloqueo de la puerta, que impide que se abra la puerta mientras el equipo esté en funcionamiento.

7.2.9. Lazos de control

El equipo cuenta con la posibilidad de recibir y enviar señales externas mediante cable. De esta forma se enlaza con el cuarto de control y desde ahí se puede controlar el equipo y monitorearlo.

7.3. PLANTA OBJETIVO

El generador se instalará en la zona de la planta de clarificación de agua. Desde allí, se enviará el agua motivante hasta el punto de dosificación. La dosificación se puede poner en el punto más conveniente para la planta; en este caso, se recomendó oxidar el agua al ingreso de la planta, justo en la captación del agua.

El control de la dosificación se programará en función de la cantidad de residual de cloro que tenga el sistema, en principio se debe asegurar un residual de cloro de 2 ppm en el agua almacenada.

8. VALORACIÓN ECONOMICA

Este capítulo está enfocado en analizar la viabilidad económica del proyecto mediante el estudio de los costos directos e indirectos de instalación y operación. Ya que este proyecto se enfoca en generar ahorros, se estudiarán únicamente los ahorros como ingresos del proyecto.

Primero se realizará un análisis de los costos directos e indirectos, luego se realizará el cálculo del VAN y TIR para verificar la viabilidad del proyecto.

8.1. COSTOS DIRECTOS

En los costos directos se incluyen los costos que se generan en la instalación y la operación:

- Costo del equipo
- Costo de los tanques de almacenamiento de precursores
- Costo de la obra civil
- Costo de los precursores
- Costo de mantenimiento

8.1.1. Inversión inicial

La inversión inicial del proyecto será la compra del equipo, de los tanques de almacenamiento y de la obra civil:

Inversión Inicial	
Equipo	165.000 €
Tanques de Almacenamiento	15.300 €
Obra Civil	18.910 €
Total	199.210 €

Tabla 7- Costos de inversión inicial.



El precio del equipo de generación, del tamaño necesario para la planta en Colombia ronda los 165.000 €.

Los tanques se fabricarían con un proveedor local de tanques, realizando una búsqueda en línea se encontró que los tanques tienen un costo de 7.650 € cada uno.

La obra civil incluye el montaje de los diques de contención de los químicos, las tuberías de alimentación de agua motivante, la tubería del equipo al punto de dosificación y la mano de obra.

Obra civil		
Tubería PVC SCH 80	71,43 €	4.761,90 €
Mano de obra	714,29 €	11.428,57 €
Supervisor	857,14 €	3.428,57 €
Cemento y alambre		5.000 €
		17.190,48 €

Tabla 8. Detalle de costos Obra Civil.

La tubería de PVC SCH 80 tiene un costo de 71,43 € por 6 m lineales, se estiman 400 m lineales de recorrido desde el equipo hasta el punto de dosificación.

La mano de obra se calcula por el salario de los trabajadores. En general., un trabajador cuesta 714,29 € por mes, se calculan 4 trabajadores por 2 meses (tiempo máximo estimado de construcción).

El supervisor será el encargado de verificar que todo esté bien, el costo mensual es de 857,14 €. Se estiman 2 meses de trabajos en la obra.

El cemento y el alambre son los materiales para la construcción del dique, se estima un coste total de 5.000 € en estos materiales.

El coste final se le suma un 10% de más de margen de error.



8.1.2. Precursores

Como se mencionó en el apartado anterior, los precursores son Purate y Ácido Sulfúrico. Ambos precursores son ofrecidos por los fabricantes del equipo, se producen en una planta en el norte del país.

Costo Unitario (€/kg)	
Ácido sulfúrico	1,20 €
Purate	3,40 €

El costo incluye el transporte de los productos.

8.1.3. Mantenimiento

Los fabricantes del equipo ofrecen el servicio de mantenimiento anualizado por un coste de 2.000 €. Este mantenimiento incluye calibración, desarme de las piezas, kit de repuestos y mano de obra.

Ya que este un gasto anualizado, no se incluye como inversión inicial.

8.2. COSTOS INDIRECTOS

En los costos indirectos incluyen costos relacionados con la operación del equipo, que no se producen directamente de su operación. Algunos de estos gastos indirectos no son indispensables para el buen funcionamiento del equipo.

- Análisis del agua
- Amortización

8.2.1. Análisis de agua

El seguimiento del agua se debe realizar de manera diaria, con el fin de llevar un control sobre la producción y la eficiencia del equipo. Para realizar este seguimiento se consume lo siguiente:

- Horas de análisis (hora hombre del analista)
- Químicos para el análisis

Análisis de agua		
Horas de análisis	1,07 €	364,29 €
Químicos de análisis		800,00 €
		1.164,29 €

8.2.2. Amortización

La amortización se realiza sobre los activos que se van a depreciar. Se establece el tiempo de amortización basado en el tiempo de duración del equipo, de esta forma se obtuvo los siguientes resultados:

Amortización			
Equipo	165.000 €	15	11.000 €
Tanques de Almacenamiento	15.300 €	20	765 €
Obra Civil	18.910 €	20	945 €
		TOTAL	12.710 €

Tabla 9. Amortización de bienes.

8.3. AHORROS

El objetivo principal del proyecto es generar ahorros, los cuales se obtienen con la diferencia de consumos de precursores comparada con la tecnología antigua.

Anteriormente se mostró una tabla con los precios unitarios de los precursores, mediante una relación experimental realizada en la planta, se calcula un consumo estimado de ellos.

$$\frac{15 * NaClO}{Q} = DQ$$

NaClO: hipoclorito de sodio (kg)

Q: Flujo volumetrico de agua por dia (m³/dia)

DQ: Demanda quimica (g/m³)

La ecuación muestra que la Demanda Química de Oxidante se puede calcular asumiendo la concentración de componente activo de 15% (aunque como se mencionó anteriormente, la concentración disminuye con el tiempo de almacenamiento).

Con la Demanda química se puede calcular la concentración de dióxido necesaria:

$$\frac{DQ * Q}{1000} = ClO_2$$

ClO₂: dióxido de cloro (kg)

Con esta fórmula, se calcula la necesidad de dióxido de cloro:

$$DQ = \frac{15 * 481884}{1925808} = 3,75 \text{ (g/m}^3\text{)}$$

$$ClO_2 = \frac{3,75 * 1925808}{1000} = 7228,26 \text{ kg}$$

A partir de la cinética del equipo, se establecen los siguientes consumos anuales de los precursores:

Consumo Anual (kg/año)	
Ácido sulfúrico	37.236
Purate	28.908
Hipoclorito	481.884

Tabla 10. Consumo Anual de químicos.

El costo de los precursores será:

Costo Consumo Anual	
Ácido sulfúrico	44.683,20 €
Purate	98.287,20 €
Hipoclorito	216.847,80 €

Tabla 11. Costo de los químicos anualizado

De esta forma, con la diferencia de consumos se obtiene un ahorro anualizado de:

Ahorro	73.877,40 €
--------	-------------

Tabla 12. Ahorros anuales.

8.4. FLUJO DE CAJA

Año	Ahorros	Mantenimiento	Indirectos	Amortización	Balance	Flujo de caja	Flujo de caja presente
1	73.877,40 €	2.000,00 €	1.164 €	12.710,48 €	58.002,64 €	70.713,11 €	66.710,49 €
2	73.877,40 €	2.104,00 €	1.225 €	12.710,48 €	57.838,10 €	70.548,57 €	62.787,98 €
3	73.877,40 €	2.213,41 €	1.289 €	12.710,48 €	57.665,00 €	70.375,47 €	59.088,60 €
4	73.877,40 €	2.328,51 €	1.356 €	12.710,48 €	57.482,90 €	70.193,37 €	55.599,73 €
5	73.877,40 €	2.449,59 €	1.426 €	12.710,48 €	57.291,33 €	70.001,80 €	52.309,42 €
6	73.877,40 €	2.576,97 €	1.500 €	12.710,48 €	57.089,80 €	69.800,27 €	49.206,44 €
7	73.877,40 €	2.710,97 €	1.578 €	12.710,48 €	56.877,78 €	69.588,26 €	46.280,17 €
8	73.877,40 €	2.851,94 €	1.660 €	12.710,48 €	56.654,75 €	69.365,23 €	43.520,60 €
9	73.877,40 €	3.000,24 €	1.747 €	12.710,48 €	56.420,12 €	69.130,59 €	40.918,29 €
10	73.877,40 €	3.156,25 €	1.837 €	12.710,48 €	56.173,28 €	68.883,76 €	38.464,33 €
11	73.877,40 €	3.320,38 €	1.933 €	12.710,48 €	55.913,61 €	68.624,09 €	36.150,31 €
12	73.877,40 €	3.493,04 €	2.033 €	12.710,48 €	55.640,44 €	68.350,92 €	33.968,31 €
13	73.877,40 €	3.674,67 €	2.139 €	12.710,48 €	55.353,06 €	68.063,54 €	31.910,84 €
14	73.877,40 €	3.865,76 €	2.250 €	12.710,48 €	55.050,74 €	67.761,22 €	29.970,85 €
15	73.877,40 €	4.066,78 €	2.367 €	12.710,48 €	54.732,70 €	67.443,18 €	28.141,68 €

Tabla 13. Flujo de caja.



El flujo de caja se realiza con los ingresos de los ahorros y los gastos de mantenimiento e indirectos. Con estos datos se calcula el VAN y la TIR.

Utilizando una tasa de interés del 6%, que es la tasa que establece el Banco de la Republica de Colombia para la industria, se calcula el flujo de caja presente para calcular el VAN.

$$\sum FCP = 675.028,04$$

$$VAN = -199.210 + 675.028,04 = 475.818,52$$

La TIR se calcula con los flujos de caja usando la ecuación:

$$TIR = 34,84\%$$

Estos valores confirman que el proyecto es viable económicamente y podemos seguir adelante.

8.5. PERIODO DE RETORNO

El Periodo de Retorno se va a calcular por la inversión inicial entre el promedio del flujo de caja:

$$PR = \frac{199.210}{69.256,23} = 2,88 \text{ años}$$

9. VALORACIÓN AMBIENTAL

Para la valoración ambiental se contabiliza el ahorro en agua generado con el cambio de tecnología.

El cambio de tecnología, se reducirían los cloruros netamente a los cloruros del agua de alimentación. La concentración de cloruros es la limitante principal para aumentar los ciclos de concentración de la torre. Las mediciones iniciales antes de iniciar el proyecto son de 260 ppm de cloruros.

El flujo de agua inicial es de 1'925.808 m³/año para toda la planta, se estima que un 80% de este flujo se envía a la torre: 1'540.546,4 m³/año.

Este flujo se consume con 3 ciclos de concentración en la torre, si aumentamos los ciclos podemos conseguir una reducción en el agua, lo cual es posible ya que la limitante de los cloruros no existiría.

Según datos experimentales en diferentes torres de refrigeración, el incremento de 3 a 7,5 ciclos significa un ahorro del 23% en el consumo de agua. Sin embargo, luego de 7,5 ciclos no se genera un ahorro significativo.

Ahorro de agua (m³/año)	
Actual	1.925.808
Torre	1.540.646,4
Ahorro	354.348,6

Tabla 14. Ahorro de agua.

Ambientalmente se consigue una reducción importante en consumo de agua.

10. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo era realizar un estudio comparativo entre las diferentes alternativas de sustitución del oxidante. El estudio comparativo incluía análisis a nivel de seguridad, de rendimiento y económico de cada una de las alternativas, en paralelo con el oxidante actual, para así obtener la mejor solución.

Durante el desarrollo del trabajo se describió de manera precisa una de las principales problemáticas ambientales de la actualidad, la relación de dependencia entre el agua y la energía. En general, la industria energética moderna está buscando maneras de ahorrar agua, ya que la situación climática actual está obligando a las generadoras a utilizar nuevas tecnologías que ayuden en este propósito.

La elección del oxidante depende principalmente de las condiciones de la planta. Luego de evaluar diferentes parámetros, se estableció que la opción más adecuada a las necesidades de la planta es el dióxido de cloro. Esta tecnología es un desarrollo actual al cual están migrando muchas empresas debido a sus beneficios. Esta tecnología propuesta para la planta se describe perfectamente en el texto, en donde muestra los beneficios a nivel de diseño y de operación.

En conclusión, el proyecto es viable económica y ambientalmente. Genera ahorros a nivel económico y disminuye el consumo de agua, generando un impacto ecológico positivo. Además, ayuda a reducir los niveles de manganeso, cloruros y materia orgánica que generan diferentes problemas a la planta. Los resultados muestran que el proyecto es viable y seguramente podrá pasar a una fase de detalle en la planta.



REFERENCIAS

- Altamirano, C. L. (2008). EL CARBÓN, ¿GARANTÍA DEL FUTURO ENERGÉTICO? *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 16(3), 229-238.
- Ansaldo Energía. (Septiembre de 2017). *Steam Turbine*. Obtenido de Ansaldo Energia web site: www.AnsaldoEnergia.com
- ASME. (1994). *Consensus on operating practices for the control of feedwater and boiler water chemistry in modern industrial boilers* (Vol. 34). New York, USA: THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS.
- Burge, S. (2009). *The Systems Engineering Tool Box*. Obtenido de Pugh Matrix : <https://www.burgehugheswalsh.co.uk/uploaded/1/documents/pugh-matrix-v1.1.pdf>
- Burke, M., Tenney, J., Indu, B., & Carr, S. (1993). Kinetics of Hydrogen Peroxide-Chlorate Reaction in the Formation of Chlorine Dioxide. *Industrial Engineering Chemistry*, 1449-1456.
- Central Electricity Generating Board. (1971). *Modern Power Station Practice* (Vol. 5). New York: Pergamon Press Inc.
- Deborde, M., & Von Gunten, U. (2008). Reactions of Chlorine with inorganic and organic compounds during water treatment-Kinetics and mechanisms: A critical review. *Water Research*, 42, 13-51. doi:10.1016/j.watres.2007.07.025
- Ecolab. (s.f.). *Biocontrol del agua de refrigeracion*. Obtenido de Sistemas de dióxido de cloro PURATE™: <https://es-es.ecolab.com/offerings/cooling-water-bio-control/purate-chlorine-dioxide-systems>
- Ecolab. (s.f.). *Dioxido de cloro*. Obtenido de Sistema Purate: <https://es-es.ecolab.com/offerings/cooling-water-bio-control/purate-chlorine-dioxide-systems>
- Fukuzaki, S. (2006). Mechanisms of actions of sodium Hypochlorite on cleaning and disinfection processes. *Biocontrol Science*, 11(4), 147-157. doi:10.4265/bio.11.147
- Ghernaout, D. (2017). Water treatment chlorination: An updated mechanistic insight review. *Chemistry Research Journal*, 2(4), 125-138.
- Hypochlorous Acid as a Potential wound care agent. (Wang, L; Bassiri M; Najafi, R; Yang, J; Khosrovi, B; Hwong, W; Barati, E; Belisle, B; Celeri, C; Robson, MC). *Journal of burns and wounds*, 6, 65-79.



IEA Publications. (Diciembre de 2021). *Coal 2021*. Obtenido de International Energy Agency :
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/f1d724d4-a753-4336-9f6e-64679fa23bbf/Coal2021.pdf>

International Energy Agency. (6 de Agosto de 2021). *World gross electricity production by source, 2019*. Obtenido de <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-gross-electricity-production-by-source-2019>

International Energy Agency. (5 de Noviembre de 2021). *Year-on-year quarterly changes in coal-fired generation by region, 2020-2021*. Obtenido de <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/year-on-year-quarterly-changes-in-coal-fired-generation-by-region-2020-2021>

International Energy Agency. (Julio de 2022). *Coal Market Update – July 2022*. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/coal-market-update-july-2022>

Jerani, Z., Sadeghi, A., Soltan, J., Roshani, B., & Rindall, B. (2015). Effectiveness of advanced oxidation processes for the removal of manganese and organic compounds in membrane concentrate. *Separation and Purification Technology*, 149, 110-115. doi:10.1016/j.seppur.2015.05.009

Jolley, R., & Carpenter, J. H. (1982). *Aqueous Chemistry Of Chlorine: Chemistry, Analysis and Environmental Fate of Reactive Oxidant Species*. Tennessee: UNION CARBIDE CORPORATION. Obtenido de <https://www.osti.gov/servlets/purl/5505533>

Khajouei, G., Finklea, H. O., & Lin, L. S. (2022). UV/chlorine advanced oxidation processes for degradation of contaminants in water and wastewater: A comprehensive review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10, 1-18. doi:10.1016/j.jece.2022.107508

kirihara, M., Okada, T., Sugiyama, Y., Akiyoshi, M., Matsunaga, T., & Kimura, Y. (2017). Sodium Hypochlorite Pentahydrate Crystals (NaOCl·5H₂O): A Convenient and Environmentally Benign Oxidant for Organic Synthesis. *Organic Process Research and Development*, 21, 1925-1937. doi:10.1021/acs.oprd.7b00288

Kucera, J. (2010). *Reverse Osmosis*. Salem: Scrivener .

Lee, Y.-J., Kim, H.-T., & Lee, U.-G. (2004). Formation of Chlorite and Chlorate from Chlorine Dioxide with Han River Water. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 21(3), 647-653. Obtenido de <https://www.cheric.org/PDF/KJChE/KC21/KC21-3-0647.pdf>



Li, W., & Cho, E. H. (2005). Coal Desulfurization with Sodium Hypochlorite. *Energy and Fuels*, 19, 499-507. doi:10.1021/ef0400767

Lohrmann, A., Child, M., & Breyer, C. (2021). Assessment of the water footprint for the European power sector during the transition towards a 100% renewable energy system. *Energy*, 233, 1-12. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121098

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. . (Septiembre de 2021). *Energy Systems*. Obtenido de Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. : power.mhi.com

Nalco Water. (1979). *The Nalco Water Handbook* (Segunda ed.). USA: McGraw-Hill.

National Center for Biotechnology Information. (6 de octubre de 2022). *Chlorine*. Obtenido de Pubchem Web Site: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Chlorine>

Ohshima, H. (2006). *Interface Science and Technology: Theory of Colloid and Interfacial Electric Phenomena* (Vol. 2). Tokyo: Elsevier.

Olin Corporation. (2019). *Sodium Hypochlorite: Product Stewardship Manual*. Obtenido de Olin Web Site: https://olinchloralkali.com/wp-content/uploads/2016/11/102-00553-0619_Olin-Sodium-Hypochlorite-Manual.pdf

Rasul, & Mohammad. (2011). *Thermal Power Plants*. Croacia: InTech.

Rittmann, D. (2004). *Impact of Chlorine Dioxide and Chlorite Byproduct on Iron and Manganese Reduction*. El paso: AKZO NOBEL EKA CHEMICALS INC. doi:10.1.1.597.1064

Rodriguez, A., Rosal, R., Pedrigo-Melon, A., Mezcua, M., Agüera, A., Hernando, M. D., . . . García-Calvo, E. (2008). Ozone-Based Technologies in Water And Wastewater Treatment. *The Handbook of Environmental Chemistry*, 5, 127-175. doi:10.1007/698_5_103

Sandin, S., Karlsson, R., & Cornell, A. (2015). Catalyzed and Uncatalyzed Decomposition of Hypochlorite in Dilute Solutions. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 54, 3767-3774. doi:10.1021/ie504890a

Sarkar, D. K. (2015). *Thermal Power Plant: Design and Operation*. Amsterdam: Elsevier Inc.

Silera Tank. (2022). *Catalogo de tanques de Polietileno*. Obtenido de <https://www.sileratanks.com/catalogo-silera.pdf>



- SPX Cooling Technologies, Inc. (2009). *Cooling Tower Fundamentals* (Segunda ed.). Overland Park.
- Svenson, D., Kadla, J., Chang, H.-M., & Jameel, H. (2002). Effect of pH on the Inorganic Species Involved in a Chlorine Dioxide Reaction System. *Industrial And Chemical Engineering Research*, 41, 5927-5933. doi:10.1021/ie020191
- Tarafdar, A., & Sinha, A. (2019). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution Generated from Coal-Fired Thermal Power Plants: Formation Mechanism, Characterization, and Profiling. En *Pollutants from Energy Sources* (págs. 73-90). Springer Nature Singapore. doi:10.1007/978-981-13-3281-4_5
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2012). *El Carbón Colombiano: Fuente de energía para el mundo*. Bogota. Obtenido de http://www.upme.gov.co/Docs/Cadena_carbon.pdf
- Vanham, D., Medarac, H., Schyns, J., Hogeboom, R., & Magagna, D. (2019). The consumptive water footprint of the European Union energy sector. *Environmental Research Letters*, 14, 1-13. doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab374a>
- Von Gunten, U. (2003). Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation. *Water Research*, 37, 1443-1467. doi:10.1.1.1076.2806
- Wang, L., Van Fan, Y., Jiang, P., Sabev Varbanov, P., & Jaromir Klemes, J. (2021). Virtual water and CO2 emission footprints embodied in power trade: EU-27. *Energy Policy*, 1-11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112348>
- Wilson, J. A. (1916). Theory of Colloids. *Journal of the American Chemical Society*, 38(10), 1982-1985. doi:10.1021/ja02267a009
- Xu, M.-Y., Lin, Y.-L., Zhang, T.-Y., Hu, C.-Y., Tang, Y.-L., Deng, J., & Xu, B. (2022). Chlorine dioxide-based oxidation processes for water purification: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 436, 1-13. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129195>
- Xylem. (2019). *Dissolved Oxygen Tables*. Obtenido de Xylem Web Site: <https://www.yesi.com/File%20Library/Documents/Technical%20Notes/DO-Oxygen-Solubility-Table.pdf>
- Yao, Z., Wang, M., Jia, R., Zhao, Q., Liu, L., & Sun, S. (2022). Comparison of UV-based advanced oxidation processes for removal of different fractions of NOM from drinking water.



Journal of Environmental Sciences, 126, 387-395.

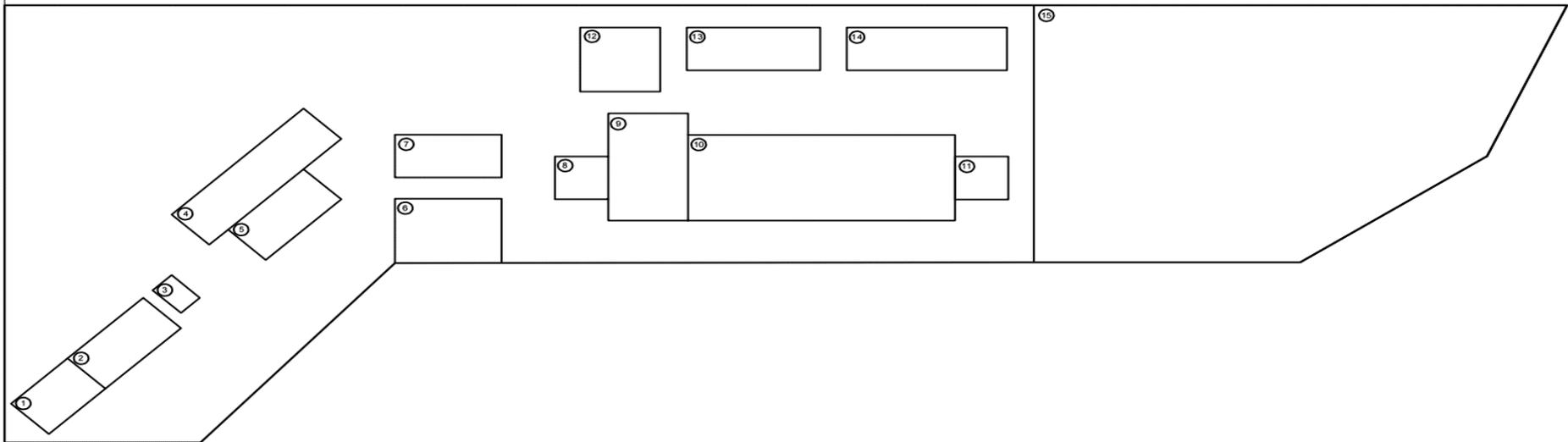
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.03.040>





ANEXOS

ANEXO 1



1- Captación	4- Torres de enfriamiento	7- Conexión a la red	10- Caldera	13- Laboratorio
2- Clarificación	5- Desionización	8- Transformadores	11- Chimenea	14- Taller
3- Laboratorio agua	6- Almacén	9- Turbina	12- Cuarto de control	15- Almacén Carbón

ANEXO 2

- C-101
Clarificador
primario
- C-102
Deshidratador
de lodos
- TK-101
Tanque de
almacenamiento
- CT-101
Torre de
enfriamiento
- IE-101
Resina de
Intercambio
Aniónico
- IE-102
Resina de
intercambio
Catiónico
- RO-101
Ósmosis
Inversa
- V-101
Desaireador
- B-101
Caldera
- T-101
Turbina
- HE-101
Condensador

