



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS DE
ACTUALIZACIÓN PARA LA PLANTA POTABILIZADORA
DE MIRAFLORES EN PANAMÁ, ORIENTADAS HACIA
UNA GESTIÓN MÁS SOSTENIBLE

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

AUTOR/A: Sieiro Berbey, Isabella

Tutor/a: Montañés Sanjuan, María Teresa

CURSO ACADÉMICO: 2024/2025

AGRADECIMIENTOS

A mi tutora Teresa por su dedicación, tiempo y apoyo continuo, a mis padres y hermanos que han sido fuente de motivación a lo largo de estos años, al Sr. Marcos Odens, Jefe de la Potabilizadora de Miraflores por su valioso aporte para hacer posible la realización de este Trabajo de Fin de Grado y a mis compañeros de clase Hanae, Natalia, Guillermo y Claudia, que han hecho de esta experiencia universitaria única y especial.

RESUMEN

El diseño de instalaciones de tratamiento de agua se remonta varios siglos atrás; sin embargo, a principios del siglo XX la ingeniería del tratamiento del agua evolucionó siendo su principal objetivo asegurar la eliminación o inactivación de organismos infecciosos. Actualmente, debido a la gestión deficiente de los recursos naturales y la gran dependencia de recursos no renovables, se ha dado lugar a impactos negativos como el cambio climático y conflictos sobre los recursos naturales, incluyendo el agua. Por ello, hoy en día, además de mejorar los procesos ya existentes, existe un creciente énfasis en diseñar y ofrecer instalaciones de suministro y tratamiento de agua mucho más sostenibles. Esto engloba ciertos aspectos como: generación de un mínimo impacto en el medio ambiente, conservación de la energía, y evitar el agotamiento de recursos y la contaminación, lo cual conduciría a mejorar la condición actual del medio ambiente mientras se continúa proporcionando agua potable segura y suficiente.

En este Trabajo Final de Grado se proponen y estudian posibles modificaciones en la planta potabilizadora de Miraflores ubicada en Panamá, incorporando equipos y llevando a cabo acciones que promuevan la sostenibilidad a largo plazo. En concreto, se prestará especial atención al estudio de la implementación de tres equipos en la planta: un generador de ozono, un espesador de fangos y paneles solares. Como parte de este proyecto, también se propondrán acciones para la valorización de residuos que actualmente se desechan en vertederos, asegurando su reutilización o valorización óptima.

Una vez seleccionadas las mejoras a llevar a cabo, se efectuará el diseño de los equipos mencionados, se elaborarán los planos pertinentes y se calculará el presupuesto para implementar dichas mejoras. También se llevará a cabo un estudio económico de las implementaciones propuestas.

Palabras Clave: potabilizadora de aguas; oxidación avanzada; energías renovables; valorización de residuos; espesador de fangos.

RESUM

El disseny d'instal·lacions de tractament d'aigua es remunta diversos segles arrere; no obstant això, a principis del segle XX l'enginyeria del tractament de l'aigua va evolucionar sent el seu principal objectiu assegurar l'eliminació o inactivació d'organismes infecciosos. Actualment, a causa de la gestió deficient dels recursos naturals i la gran dependència de recursos no renovables, s'ha donat lloc a impactes negatius com el canvi climàtic i conflictes sobre els recursos naturals, incloent-hi l'aigua. Per això, hui dia, a més de millorar els processos ja existents, existeix un creixent èmfasi a dissenyar i oferir instal·lacions de subministrament i tractament d'aigua molt més sostenibles. Això engloba uns certs aspectes com: generació d'un mínim impacte en el medi ambient, conservació de l'energia, i evitar l'esgotament de recursos i la contaminació, la qual cosa conduiria a millorar la condició actual del medi ambient mentre es continua proporcionant aigua potable segura i suficient.

En aquest Treball Final de Grau es proposen i estudien possibles modificacions en la planta potabilizadora de Miraflores situada a Panamá, incorporant equips i duent a terme accions que promoguen la sostenibilitat a llarg termini. En concret, es prestarà especial atenció a l'estudi de la implementació de tres equips en la planta: un generador d'ozó, un espessidor de fangs i panells solars. Com a part d'aquest projecte, també es proposaran accions per a la valorització de residus que actualment es rebutgen en abocadors, assegurant la seua reutilització o valorització òptima.

Una vegada seleccionades les millores a dur a terme, s'efectuarà el disseny dels equips esmentats, s'elaboraran els plans pertinents i es calcularà el pressupost per a implementar aquestes millores. També es durà a terme un estudi econòmic de les implementacions proposades.

Paraules Clau: potabilizadora d'aigües; oxidació avançada; energies renovables; valorització de residus; espessidor de fangs.

ABSTRACT

The design of water treatment facilities dates back several centuries; however, at the beginning of the 20th century, water treatment engineering evolved with its primary objective being the removal or inactivation of infectious organisms. Currently, due to poor management of natural resources and the heavy reliance on non-renewable resources, negative impacts such as climate change and conflicts over natural resources, including water, have emerged. Therefore, today, in addition to improving existing processes, there is a growing emphasis on designing and providing much more sustainable water supply and treatment facilities. This encompasses aspects such as generating minimal environmental impact, conserving energy, and preventing resource depletion and pollution, which would lead to an improvement in the current environmental condition while continuing to provide safe and sufficient drinking water.

In this Final Degree Project, possible modifications to the Miraflores Water Treatment Plant located in Panama are proposed and studied, incorporating equipment and carrying out actions that promote long-term sustainability. Specifically, special attention will be given to studying the implementation of three pieces of equipment in the plant: an ozone generator, a sludge thickener, and solar panels. As part of this project, actions will also be proposed to valorize waste that is currently disposed of in landfills, ensuring its optimal reuse or valorization.

Once the improvements to be carried out are selected, the design of the mentioned equipment will be performed, pertinent plans will be drawn up, and the budget for implementing these improvements will be calculated. An economic study of the proposed implementations will also be carried out.

Keywords: Water treatment plant; ozonation; renewable energies; waste valorization; sludge thickener.

ÍNDICE

Documentos contenidos en el TFG:

- Documento I. Memoria
- Documento II. Presupuesto
- Documento III. Planos

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1.	INTRODUCCIÓN	10
1.1.	Descripción general del tratamiento de aguas para consumo humano	10
1.2.	Tratamientos para cada parámetro en la potabilización del agua	11
2.	OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN	13
2.1.	Objetivos específicos	14
2.2.	Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible	14
3.	DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN ACTUAL	16
3.1.	Funcionamiento y esquema actual de la potabilizadora	17
3.1.1.	Etapas del proceso	18
3.1.2.	Fuentes de energía	28
3.1.3.	Gestión de residuos	28
3.2.	Parámetros de caracterización del agua de entrada	29
3.3.	Legislación para el agua de salida	30
3.4.	Procesos susceptibles de mejoras y propuestas de modificación	34
4.	DESCRIPCIÓN DE LAS MODIFICACIONES PROPUESTAS	35
4.1.	Desinfección con ozono	35
4.1.1.	Antecedentes	35
4.1.2.	Fundamentos	36
4.1.3.	Ubicación de la ozonización en la potabilizadora	39
4.1.4.	Subproductos de desinfección generados	40
4.1.5.	Parámetros de diseño	40
4.1.5.1.	Parámetros del equipo	40

4.1.5.2.	Parámetros del agua a tratar	45
4.2.	Espesador de fangos	47
4.2.1.	Fundamentos	47
4.2.2.	Parámetros de diseño	50
4.3.	Producción de energía con paneles solares.....	56
4.3.1.	Fundamentos	57
4.3.2.	Parámetros de diseño	57
5.	DISEÑO DE LOS EQUIPOS	63
5.1.	Diseño del generador de ozono.....	63
5.1.1	Elección e integración del generador de ozono en la planta	65
5.1.2	Precauciones a tener en cuenta.....	67
5.2.	Diseño del espesador de fangos	71
5.3.	Dimensionamiento de los paneles solares	81
5.3.1.	Descripción técnica de la instalación	91
5.4.	Esquema de la planta con las modificaciones propuestas	97
5.5.	Estimación de la vida útil de los equipos.....	98
6.	EMPLAZAMIENTO DE LOS EQUIPOS EN LA PLANTA.....	99
7.	GESTIÓN DE RESIDUOS PROPUESTA	101
7.1.	Filtros de arena, grava y antracita	101
7.2.	Lodos generados en los espesadores	102
7.3.	Agua clarificada de los espesadores	102
8.	ESTUDIO ECONÓMICO	103
8.1.	Análisis de los beneficios/ahorros	103
8.2.	Análisis de los costes adicionales.....	110
8.3.	Balance económico	113
9.	CONCLUSIONES	114
10.	BIBLIOGRAFÍA	115

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1. INTRODUCCIÓN	118
2. PRESUPUESTOS PARCIALES	119
2.1 Presupuesto del generador de ozono	119
2.2 Presupuesto del espesador de fangos.....	120
2.3 Presupuesto de los paneles solares	121
2.4 Presupuesto de la mano de obra	123
3. PRESUPUESTO TOTAL.....	124

ÍNDICE DE LOS PLANOS

1. Plano 01: Distribución en planta de la potabilizadora actual.....	126
2. Plano 02: Distribución en planta de la potabilizadora con las implementaciones	127

DOCUMENTO I.
MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción general del tratamiento de aguas para consumo humano

El proceso mediante el cual el agua se convierte en potable se denomina potabilización. El agua a tratar proviene principalmente de ríos, lagos y acuíferos subterráneos y contiene componentes como sólidos en suspensión (arena, sedimentos) y microorganismos (virus, hongos y bacterias), que no la hacen apta para el consumo humano. Por ello, se deben analizar sus parámetros físicos, químicos y biológicos para determinar la calidad del agua y, en función de sus valores, proceder a definir el tratamiento necesario.

Además, en el caso de que la procedencia sea de fuentes superficiales como ríos, lagos, embalses y mar, se requerirán más tratamientos que para un agua proveniente de fuentes subterráneas como acuíferos, manantiales y pozos debido a que el agua proveniente de fuentes superficiales está en contacto directo con el medio ambiente, por lo que su exposición a contaminantes es mayor. Por otro lado, dependiendo de la estación del año y la ocurrencia de eventos climáticos extremos, sus características también varían. En épocas lluviosas y de desastres ambientales pueden aumentar las escorrentías, lo cual aumentará el nivel de sedimentos y contaminantes en el agua a tratar, por lo que será necesario ajustar las dosis de productos químicos utilizados en la planta potabilizadora para asegurar una adecuada potabilización. Por otro lado, el agua subterránea, aunque no se ve afectada por estos factores externos, tiene mayor concentración de minerales disueltos debido al largo tiempo de contacto del agua con las rocas y minerales, y su tratamiento será distinto al requerido para las aguas superficiales. [1].

Por tanto, dependiendo del origen del agua a tratar, la potabilizadora tendrá una estrategia de tratamiento u otro [1] y, si es necesario, incluirá etapas adicionales en función de la calidad del agua a tratar.

No obstante, un proceso convencional para el tratamiento de agua potable cuenta con las siguientes etapas: coagulación y floculación, sedimentación, filtración granular y desinfección [1]. A continuación, se describen brevemente estos procesos:

- Coagulación y floculación

El proceso de coagulación-floculación sirve para eliminar partículas como sólidos en suspensión, coloides, microorganismos y trazas de contaminantes como metales y compuestos orgánicos.

Las partículas en el agua se encuentran en forma estable, generalmente con carga superficial negativa, por lo que tienden a repelerse impidiendo que se agrupen y sedimenten de manera natural. Para solucionar esto, se añade un agente químico al agua llamado coagulante el cual tiene carga positiva y permite neutralizar las cargas negativas reduciendo las fuerzas de repulsión y formando agregados de partículas llamados flóculos. Por otro lado, existe un agente floculante el cual va a ayudar a aumentar el tamaño de estos flóculos, facilitando su eliminación en la etapa posterior.

- Sedimentación

La sedimentación permite eliminar los flóculos formados en la etapa anterior. Para ello, se reduce la velocidad del agua permitiendo que los flóculos se asienten en el fondo de los tanques de sedimentación debido a su mayor densidad, por efecto de la gravedad. El agua clarificada se obtiene en la parte superior del tanque y se dirige a la siguiente etapa del tratamiento.

El proceso de sedimentación mejora la claridad y calidad del agua, disminuyendo la turbidez de esta considerablemente.

- Filtración granular

Con la filtración se eliminan los sedimentos menos densos y se terminan de eliminar impurezas que no fueron eliminadas en las etapas anteriores. Se hace pasar el agua sedimentada por un lecho de material granular, de manera que quedan retenidas las impurezas en el filtro. En cuanto al tipo de filtro, existen filtros abiertos y por gravedad, o cerrados y a presión. Según el material filtrante pueden ser filtros de arena o de carbón activado.

Eventualmente se acumulará material en el lecho del filtro, lo que provocará que aumente la presión diferencial en los manómetros. Cuando esto ocurre, se realiza un lavado a contracorriente de los filtros inyectando agua a presión de manera que se remuevan las impurezas y materiales que obstruyen el flujo adecuado del agua [2].

- Desinfección

En esta etapa se lleva a cabo una desinfección final del agua con el fin de inactivar cualquier microorganismo patógeno restante, como virus, bacterias o protozoos. Normalmente se utiliza cloro por su poder remanente de desinfección, evitando que el agua se vuelva a contaminar en su distribución. Otros desinfectantes utilizados son el dióxido de cloro, las cloraminas, el ozono y la radiación ultravioleta.

1.2. Tratamientos para cada parámetro en la potabilización del agua

Con el tiempo se han ido desarrollando nuevos métodos para el tratamiento del agua. En la Tabla 1 se resumen los tratamientos que se realizan según el parámetro a eliminar del agua, clasificados por características físicas, químicas y biológicas.

Es importante mencionar que cada agua a potabilizar se trata de manera particular dependiendo de sus características y objetivos de tratamiento y, en función de esto, se escogerá un método de tratamiento u otro; sin embargo, es común combinar ciertos procesos para alcanzar una mayor eficacia de eliminación.

Tabla 1. Procesos comúnmente considerados en el tratamiento de agua potable

Característica	Parámetro	Tratamiento
Física y organoléptica	Color, olor, sabor y turbidez	Coagulación/floculación/sedimentación, filtración, adsorción en carbón activo u oxidación con permanganato de potasio, ozono, cloro, o dióxido de cloro
Química	Hierro y manganeso	Oxidación o aireación
	Materia orgánica	Oxidación o adsorción en carbón activo
	Compuestos orgánicos volátiles	Aireación, adsorción en carbón activo o combinación de ambas
	Control de subproductos de desinfección	Eliminación previa de materia orgánica
Biológica	Bacterias, virus	Coagulación/floculación/sedimentación, filtración, inactivación o desinfección con cloro, cloraminas, dióxido de cloro, ozono, radiación ultravioleta

Fuente: *Water Treatment Plant Design, American Water Works Association (AWWA) [2]*

2. OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN

Los procesos convencionales de tratamiento de agua consumen cantidades enormes de energía y de recursos materiales, por lo que se considera que son un importante contribuyente a los problemas ambientales a los que nos enfrentamos hoy en día.

El estrés hídrico y climático son los dos principales factores que afectan negativamente a la producción de agua potable. Del 100% del agua disponible en el planeta, aproximadamente el 97% es agua salada y solo el 3% es agua dulce. De ese 3%, cerca del 70% está almacenada en glaciares y casquetes polares, el 30% en aguas subterráneas y solo alrededor del 1% del agua dulce se encuentra en fuentes superficiales como lagos y ríos.

Hoy en día, el agua superficial y subterránea disponible se consume más rápido de lo que el planeta puede reponer, ya que la demanda de agua aumenta con el incremento de la población. Por otro lado, el aumento de las temperaturas en nuestro planeta está relacionado con el aumento de los gases de efecto invernadero y su acumulación en la atmósfera. Por tanto, a largo plazo, los efectos del estrés hídrico y climático no solo afectan la disponibilidad de agua potable, sino que pueden ocasionar la pérdida de hábitat, la reducción de fuentes de alimento y la extinción de plantas y animales.

Una potabilizadora sostenible se diseña y opera con el objetivo de minimizar su impacto ambiental y maximizar la eficiencia en el uso de recursos, sin comprometer el suministro de agua potable. Para lograrlo, debe enfocarse en una gestión adecuada de residuos, la conservación del agua y la energía, y la optimización de recursos.

Panamá se considera un país lluvioso; sin embargo, durante los últimos años ha sufrido una crisis de sequía que ha impactado negativamente su economía. El canal de Panamá, eje económico del país, depende del embalse Gatún, el cual almacena el agua necesaria tanto para el tránsito de buques como para el suministro de agua a la Potabilizadora de Miraflores, la cual distribuye agua a una parte importante de la población.

La escasez de lluvias ha ocasionado una disminución en el número de buques que pueden atravesar el canal, lo que ha afectado no solo el suministro de agua potable, sino también la economía del país. Es fundamental hacer énfasis en un uso eficiente de los recursos hídricos para mitigar ambos impactos.

El objetivo global de este Trabajo de Fin de Grado (TFG) es estudiar la implementación de tres equipos nuevos en la planta potabilizadora de Miraflores, con el fin de incorporar tecnologías y prácticas sostenibles que permitan enfrentar mejor las futuras sequías provocadas por el cambio climático. En concreto, se estudiará la implementación de un generador de ozono, un espesador de fangos y el uso de paneles solares. Estos equipos no solo mejorarán la eficiencia operativa de la planta, sino que también contribuirán a la valorización de residuos adaptándose a los espacios disponibles en la instalación.

2.1. Objetivos específicos

Los objetivos específicos para este trabajo, que permitirán lograr el objetivo global, son los siguientes:

- Describir el proceso general de tratamiento de aguas para el consumo humano.
- Identificar los parámetros a controlar para garantizar un consumo seguro.
- Identificar los tratamientos existentes para tratar cada parámetro.
- Analizar la instalación actual de la potabilizadora de Miraflores.
- Analizar la calidad del agua cruda.
- Identificar oportunidades de mejora en la planta actual con el fin de operar de manera más sostenible.
- Proponer modificaciones concretas.
- Describir y diseñar las modificaciones propuestas.
- Situar los equipos en la planta.
- Realizar un estudio económico de las modificaciones propuestas.
- Elaborar el presupuesto del proyecto.

2.2. Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se plantearon con el fin de abordar los principales desafíos a los que se enfrenta la humanidad, como la pobreza, la desigualdad, el cambio climático, la paz y la justicia, para conseguir un futuro sostenible para todos. Relacionar un trabajo académico con estos objetivos puede dar visibilidad a nuevas oportunidades que contribuyan a un futuro más sostenible.

Este TFG está relacionado con los siguientes ODS:

- ODS 6. Agua limpia y saneamiento

Este objetivo se enfoca en garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el saneamiento para todos. Cuenta con un total de 6 metas, aunque el presente TFG está relacionado con la siguiente:

- ✓ *Meta 6.3: De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial.*

Para promover el cumplimiento de esta meta se propone la implementación de un equipo que trate el agua residual generada en la potabilizadora y luego la recircule a la etapa inicial

de esta. De esta forma, se evita el vertido de aguas sucias a fuentes naturales cercanas. Se propone también el reemplazo de un químico por otro que no genera subproductos químicos peligrosos para la salud.

- ODS 7. Energía asequible y no contaminante

Este objetivo se enfoca en garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos. Este TFG presenta relación con la siguiente meta:

- ✓ *Meta 7.2: De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas.*

Para promover el cumplimiento de esta meta se propone el uso de paneles solares como fuente de energía renovable para el funcionamiento de la potabilizadora.

- ODS 12. Producción y consumo responsables

Este objetivo se enfoca en garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles. En concreto, este trabajo está relacionado con la siguiente meta:

- ✓ *Meta 12.2: De aquí a 2030, lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales.*

En este trabajo se propone el reciclado de materiales que cumplen su ciclo de vida en la planta como los filtros de arena, grava y antracita, vendiéndolos a empresas externas en lugar de ser desechados en vertedero. De la misma forma, para los residuos generados en planta como los fangos resultantes del espesador de fangos, se propone su venta al sector agrícola.

- ODS 13. Acción por el clima

Este objetivo se enfoca en adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. Concretamente, este trabajo se relaciona con la siguiente meta:

- ✓ *Meta 13.2: Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales.*

La implementación de paneles solares en la potabilizadora disminuye la dependencia de fuentes de energías no renovables, promoviendo una transición hacia energías limpias. Al mismo tiempo, el espesador de fangos contribuye a la gestión eficiente del agua, recurso vital, contribuyendo a su conservación y un uso más responsable.

3. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN ACTUAL

La planta potabilizadora de Miraflores opera desde 1915 y está ubicada estratégicamente al norte de las esclusas de Miraflores, en el lado este del lago Miraflores, lo que le permite acceder a fuentes de agua cruda fácilmente. La entrada está ubicada a 200 metros al norte de la entrada hacia las esclusas de Miraflores por la Avenida Omar Torrijos Herrera en el corregimiento de Ancón, distrito de Panamá, provincia de Panamá, en área accesible por carretera. Al estar ubicada en la zona del canal, opera bajo jurisdicción especial debido a su proximidad a una fuente de gran importancia económica para el país, el Canal de Panamá, por lo que debe cumplir con normativas adicionales para evitar riesgos de contaminación o interferencia con el Canal de Panamá. Esta planta es administrada por la Autoridad del Canal de Panamá (ACP) bajo la Dirección de Ambiente y Energía, en su Departamento de Agua Potable.

La planta tiene una capacidad de producción de 50 MGD de agua potable, aunque actualmente trata 44 MGD (166.558 m³/día) abasteciendo a más de 200.000 habitantes de la capital panameña. Es la tercera potabilizadora más grande del país, después de las plantas de Gamboa y Chilibre, que tienen capacidades de 60 MGD (227.100 m³/día) y 250 MGD (946.353 m³/día), respectivamente.

Pese a operar desde hace más de 100 años, solo se ha realizado una modificación en sus instalaciones y esta se debe a la transición de un sistema mecánico hidráulico a uno digital, en el año 1942.

En la Figura 1 se muestra su localización y en la Figura 2 se observa una vista aérea de la planta.

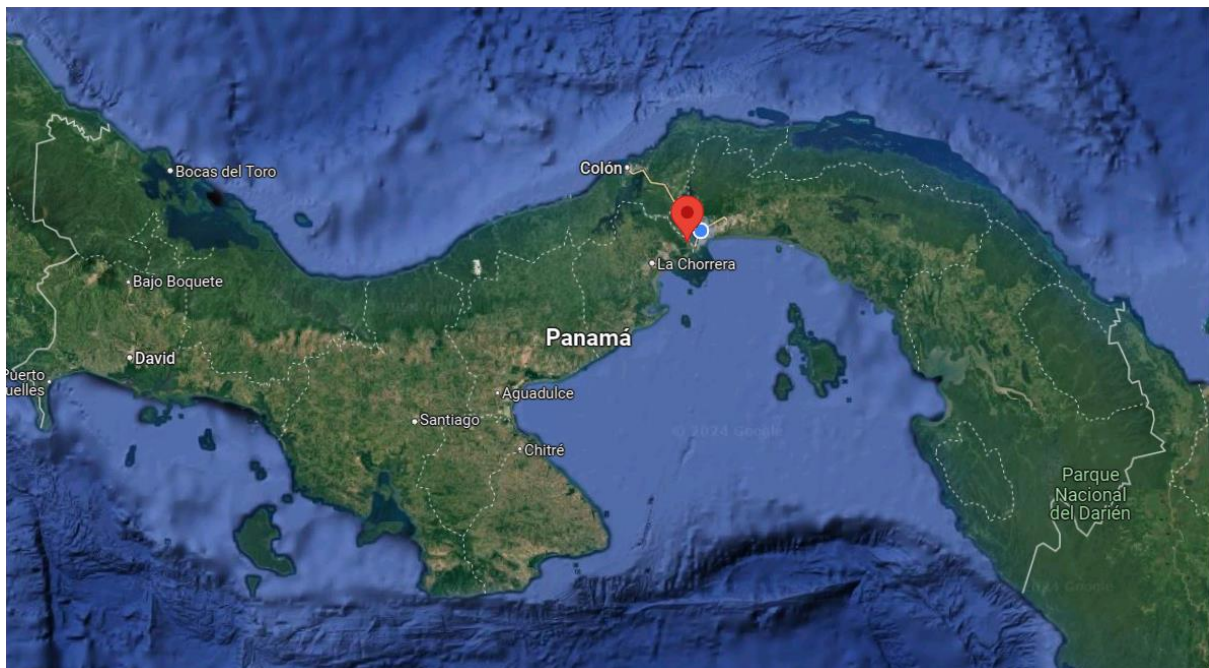


Figura 1. Localización de la planta potabilizadora de Miraflores

Fuente: Google Earth



Figura 2. Vista aérea de la potabilizadora de Miraflores

Fuente: Google Maps

3.1. Funcionamiento y esquema actual de la potabilizadora

La potabilizadora de Miraflores cuenta con un total de 6 etapas para llevar a cabo la potabilización del agua (excluyendo la aducción y distribución de esta), las cuales se muestran en la Figura 3.

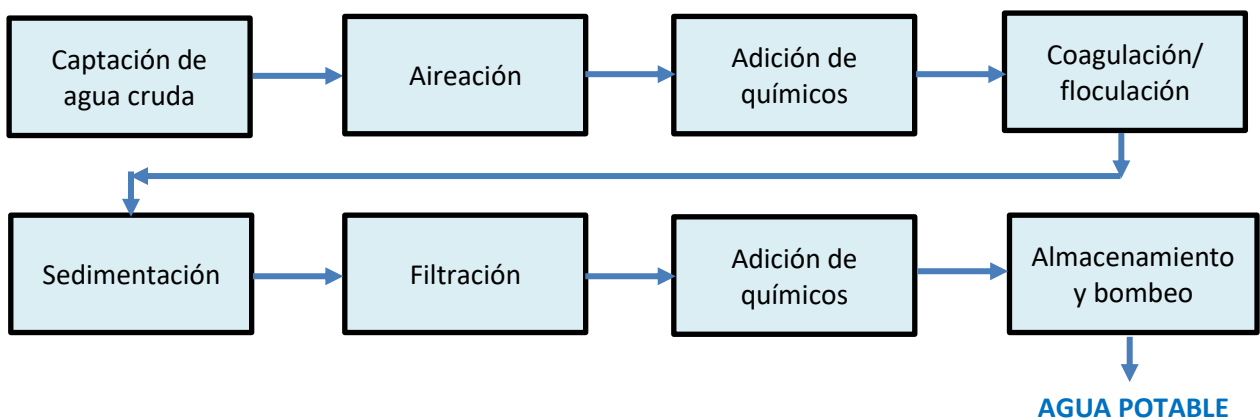


Figura 3. Diagrama de bloques de la potabilizadora de Miraflores

Fuente: Elaboración propia a partir del diagrama de bloques facilitado por Marcos Odens, jefe de la planta potabilizadora de Miraflores, 2024.

3.1.1. Etapas del proceso

A continuación, se describe cada una de las etapas del proceso actual de potabilización:

- Captación de agua cruda

El proceso de potabilización se inicia con la captación del agua cruda. La planta cuenta con 2 tomas de agua cruda, Paraíso y Gamboa, la primera abastecida por el Lago Gatún y la segunda abastecida por el Río Chagres, río que alimenta el Lago Gatún. En las Figuras 4 y 5 se muestra la distancia entre la potabilizadora y el Lago Gatún, y la distancia entre la potabilizadora y las dos tomas de agua cruda, respectivamente. En la Figura 6 se muestra la toma de Paraíso, ubicada a 4,5 km de la potabilizadora, y en la Figura 7 se muestra la toma de Gamboa, a 17 km de distancia. Para el transporte del agua se utilizan bombas y tuberías subterráneas, y al llegar a la potabilizadora esta pasa por unas rejillas antes de iniciar el proceso de potabilización, con el fin de evitar la entrada de objetos grandes. Para controlar el caudal de entrada a la potabilizadora, se utiliza el sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition).

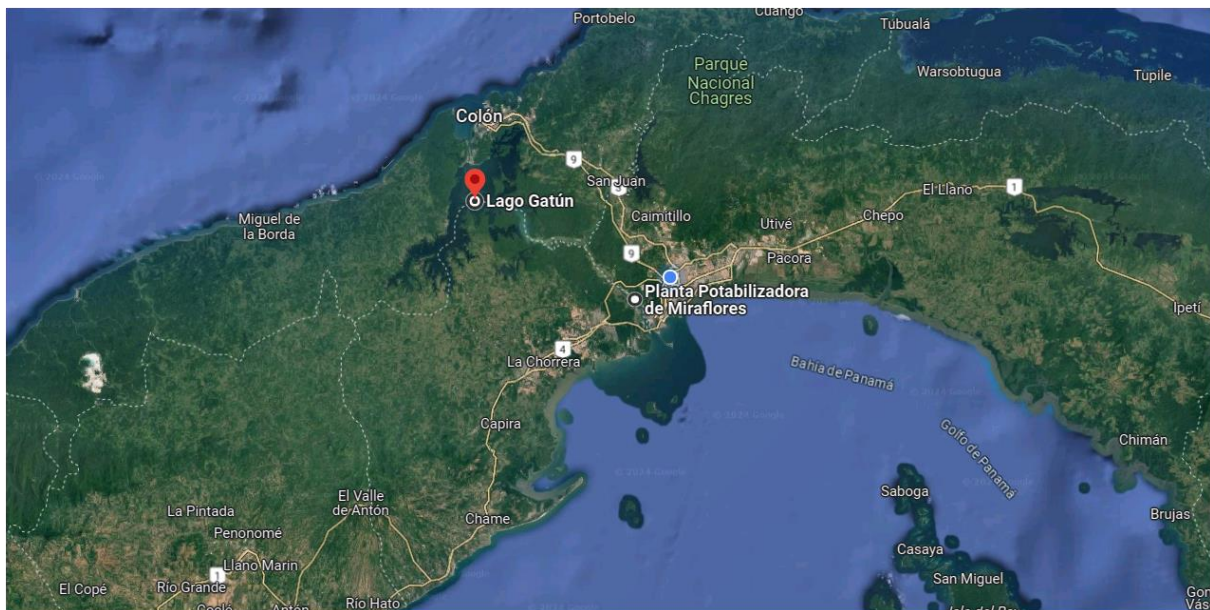


Figura 4. Distancia entre la potabilizadora de Miraflores y el Lago Gatún

Fuente: Google Earth



Figura 5. Distancia entre la potabilizadora de Miraflores y las tomas de agua

Fuente: Google Earth

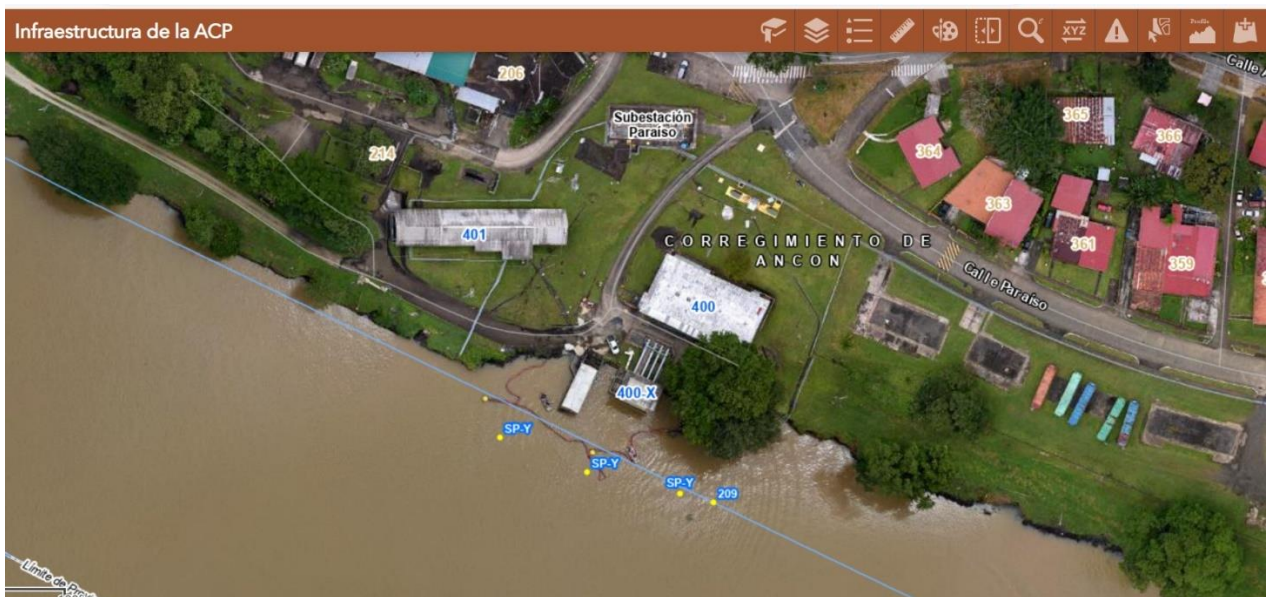


Figura 6. Toma 1 (Paraíso) de agua cruda

Fuente: Google Earth



Figura 7. Toma 2 (Gamboa) de agua cruda

Fuente: Google Earth

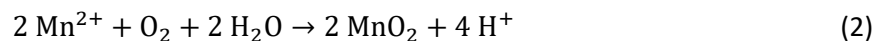
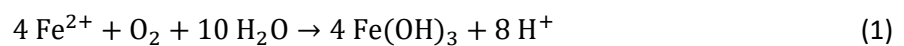
- Aireación

El primer proceso consiste en llevar a cabo una aireación, proceso en el que se pone en contacto el agua con el aire para aumentar el contenido de oxígeno disuelto en el agua y eliminar gases disueltos como el dióxido de carbono (CO₂), el sulfuro de hidrógeno (H₂S) y otros gases disueltos que pueden afectar el sabor, el olor y la calidad del agua. Además, la aireación sirve para oxidar ciertos contaminantes presentes en el agua como el hierro (Fe²⁺) y el manganeso (Mn²⁺), convirtiéndolos en formas insolubles que son eliminadas en etapas posteriores [2].

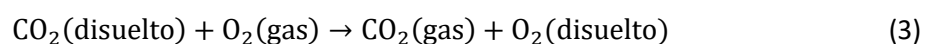
La aireación se lleva a cabo en un tanque que cuenta con 90 aireadores de aspersion. Estos se encargan de dispersar el agua hacia arriba provocando un aumento del contacto entre el agua y el aire.

Las reacciones que ocurren en este proceso se muestran en las ecuaciones 1, 2, 3 y 4.

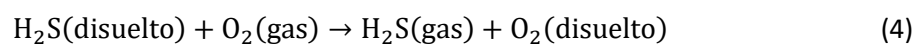
- ✓ Oxidación de metales:



- ✓ Desorción de CO₂:



- ✓ Desorción de H₂S:



- Adición y mezclado de agentes químicos

Una vez efectuada la aireación, el agua se dirige a tres tinas de mezclado mediante tres canales Parshall. En la Figura 8 se muestra uno de ellos. Esta etapa cuenta con un medidor de turbidez (NTU), que determinará la cantidad de agentes químicos a utilizar, y un medidor de pH. Los químicos utilizados son cloro para matar bacterias y algas, carbón activo para la eliminación de malos sabores y olores, fluoruro para la salud dental, sulfato de aluminio como agente coagulante y polímeros catiónicos como agente floculante. De momento no se están utilizando carbón activo ni floculantes, ya que la calidad del agua cruda es buena y no requiere de floculantes adicionales para remover partículas en suspensión ni carbón activo. El flúor en este momento tampoco se está añadiendo debido a un fallo del dosificador, por lo que no se mencionan las concentraciones de estos tres productos.

La dosificación de coagulante líquido se realiza por gravedad, con los tanques ubicados en la parte superior del canal de distribución, como se muestra en la Figura 9. Se utilizan 3 rotámetros, uno para cada canal. Se desea mantener una concentración de coagulante de 30 ppm en el agua, para esto se actualmente se dosifican 1,27 gal/min (4,81 L/min) en cada rotámetro. El cloro se dosifica en forma gaseosa mediante conductos como se muestra en la Figura 10. Se utiliza una concentración de cloro de 1,95 ppm con el objetivo de que la concentración residual de cloro en el agua no supere 0,8 ppm.

Las tinas son de mezclado rápido y en ellas el agua tiene un recorrido de zigzag para permitir una correcta mezcla de los químicos añadidos, como se muestra en la Figura 11.

En esta primera desinfección con cloro se generan trihalometanos (THM), un compuesto cancerígeno, aunque su concentración se mantiene por debajo de lo permitido. En esta etapa, el coagulante empieza a realizar su función como desestabilizante de partículas.



Figura 8. Canal Parshall



Figura 9. Dosificación de coagulante por gravedad



Figura 10. Dosificación de cloro



Figura 11. Tinas de mezclado rápido

- Coagulación y floculación

La coagulación (desestabilización de las cargas negativas superficiales de las partículas) tiene lugar en las tinas de mezclado rápido (Figura 11), pero la floculación (unión de las partículas desestabilizadas) requiere de una agitación lenta que tiene lugar en una tina. El agua se transporta desde las tinas de mezclado rápido a una tina mediante tuberías diseñadas para mantener una velocidad de flujo constante y controlada. Esta tina es de sección rectangular con fondo plano, tiene un área de aproximadamente 3.060 m² y una profundidad de 4,88 m y se divide en tres secciones. En la primera sección ocurre la floculación mientras en las siguientes ocurre la sedimentación de manera progresiva. En el fondo de la primera sección de la tina se encuentran tres floculadores de aspa horizontal los cuales se encargan de realizar una mezcla lenta y suave del agua, lo que permite la formación de los flóculos como se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Formación de flóculos

- Sedimentación

Una vez formados los flóculos, el agua fluye de manera gradual por declive a través de tres pantallas difusoras encargadas de reducir la velocidad del agua para iniciar el proceso de sedimentación. Los flóculos más grandes se asientan primero, mientras los más ligeros llegan a la tercera sección de la tina, donde se encuentran 12 canaletas diente de sierra. En la Figura 13 se observan algunas de ellas. Una vez sedimentados los sólidos, el agua clarificada se recoleta en estas canaletas, también encargadas de transportar el agua a una tubería de influente la cual conducirá el agua sedimentada a la siguiente etapa.

Esta tina cuenta con 6 drenajes destinados a la evacuación de los sedimentos acumulados a través de tuberías situadas en el fondo de la misma. Además, se realiza una limpieza semanal con mangueras a presión y se utilizan alrededor de 110 m³ por lavado, por lo que mensualmente se utilizan aproximadamente 440 m³ de agua para el lavado de la tina. Los lodos sedimentados son descargados en el río Grande, fuente superficial cercana. El tiempo de retención del agua en esta tina de sedimentación es de 2 horas, lo que permite reducir la turbidez del agua a 5 NTU al final de esta etapa.



Figura 13. Canaletas diente de sierra en la tina de sedimentación

- Filtración

La filtración ocurre en un área techada que cuenta con 20 tinas de filtrado. El medio filtrante está compuesto por arena, antracita y grava como soporte y el sistema es de tipo abierto, y por gravedad. El agua ya sedimentada entra a la etapa de filtración mediante la tubería de influente mencionada, observada en la Figura 14. Luego, se distribuye a través de tubos de influente en las 20 tinas de filtrado, cada una con un área de 47,69 m². En la Figura 15 se observa una de las tinas de filtración.

El medio filtrante está conformado por 20' (50,80 cm) de antracita, 12' (30,48 cm) de arena y 18' (45,72 cm) de grava, como se muestra en la Figura 16. En la Figura 17 se observa un modelo del medio filtrante utilizado. Una vez filtrada el agua, se dirige a un pozo de agua clara o 'clearwell' mediante tuberías de efluente. Al final de esta etapa se consigue una turbidez final de 1 NTU.

Cada tina cuenta con 4 válvulas para gestionar el agua a tratar, permitiendo su entrada y salida, siendo las siguientes: válvula de entrada, válvula de filtrado, válvula de retrolavado y válvula de drenaje. El proceso comienza habilitando la válvula de entrada ubicada al inicio del sistema de filtración, la cual controla la entrada de agua a las tinas de filtración. Luego se procede a habilitar de la válvula de filtrado, ubicada a la salida del filtro, siendo esta la responsable de dirigir el agua ya filtrada a su destino. Cuando es necesario lavar los filtros se habilita la válvula de retrolavado, la cual permite el flujo de agua limpia a través del filtro en dirección contraria al flujo normal, a una velocidad de siete a ocho veces la de filtración, para remover las partículas atrapadas en el medio filtrante. Por último, se habilita la válvula de drenaje la cual se utiliza para evacuar el agua con los residuos acumulados en el filtro destinada al lago Miraflores, fuente superficial cercana. En la Figura 18 se muestra la cámara de válvulas.

Para el retrolavado de los filtros, se utilizan aproximadamente 37,85 m³ de agua por filtro. Dado que el sistema cuenta con 20 filtros, el consumo total por ciclo de lavado es de 757 m³ de agua aproximadamente. Cada filtro se limpia 15 veces al mes, por lo que en total se utilizan aproximadamente 11.356,23 m³ de agua mensualmente para el proceso de retrolavado de los filtros. Actualmente los filtros tienen una vida útil aproximada de 10 años; sin embargo, cada uno o dos años se comprueban los niveles de arena y antracita, y si no se mantienen los niveles requeridos se añade más cantidad de dichos productos.



Figura 14. Tubería de influente a las tinas de filtración



Figura 15. Tinas de filtrado

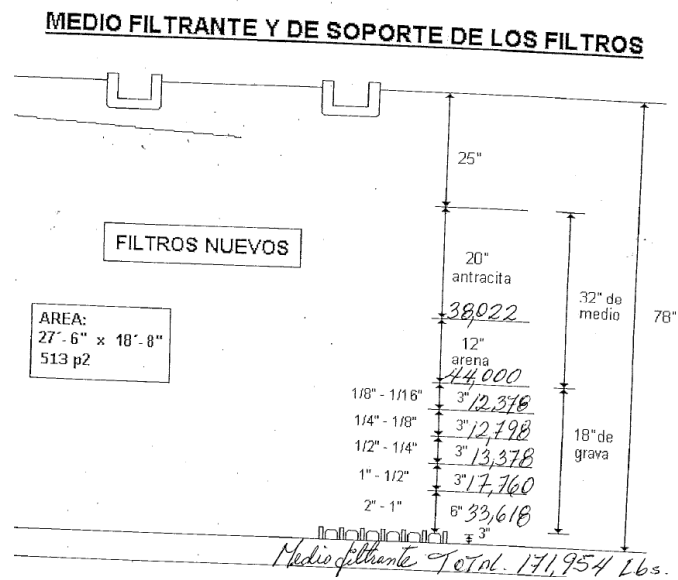


Figura 16. Dimensión y estructura de los filtros

Fuente: Imagen facilitada por Marcos Odens, jefe de la planta potabilizadora de Miraflores, 2024.



Figura 17. Modelo de medio filtrante



Figura 18. Cámara de válvulas del sistema de filtrado

- Adición final de cloro

Mediante sensores, se determina la cantidad de cloro necesaria para evitar la recontaminación del agua durante su distribución y cumplir con los estándares de potabilización. La dosificación se realiza directamente en la conducción, ajustando la cantidad requerida teniendo en cuenta que el máximo permitido es de 0,8 ppm.

- Almacenamiento y bombeo

El agua potable se almacena en el pozo de agua clara mencionado en la etapa de filtración. Este pozo tiene capacidad para almacenar 3.785,41 m³ de agua potable, aunque su función principal no es el almacenamiento, sino permitir una salida continua del agua tratada.

El agua se conduce por tres tuberías por gravedad hacia tres estaciones de bombeo, las cuales son responsables de su distribución a la población. El flujo de agua a través de estas tuberías se controla mediante el sistema SCADA.

Una vez el agua llega a las estaciones de bombeo, el IDAAN (Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales), es la entidad responsable de la gestión y operación de agua potable, la cual se encargará de almacenar y distribuir el agua potable a la población. El agua potable se vende al IDAAN a un precio de 0,281 \$/m³ lo que equivale a 0,26 €/m³.

3.1.2. Fuentes de energía

En la planta potabilizadora de Miraflores, la energía consumida proviene de una combinación de fuentes de energía tanto renovables como no renovables. En concreto, la planta hace uso de fuentes de energía hidroeléctrica y termoeléctrica. Aunque la potabilizadora dispone de ambas fuentes de energía, normalmente solo se utiliza la termoeléctrica con un consumo mensual de 2.614 kWh.

3.1.3. Gestión de residuos

Teniendo en cuenta el proceso descrito para llevar a cabo la potabilización del agua, cabe destacar los siguientes residuos o efluentes residuales:

- Los fangos generados en la tina de sedimentación se trasladan a una fuente superficial cercana, el río Grande.
- Las aguas residuales resultantes del lavado de los filtros se dirigen a otra fuente superficial cercana, el lago Miraflores.
- Los medios filtrantes cuando cumplen su ciclo de vida se destinan a vertedero.

3.2. Parámetros de caracterización del agua de entrada

El embalse de Gatún se encuentra en una zona con clima tropical húmedo y una temperatura promedio anual entre 24 °C y 26 °C [3].

Las Tablas 2, 3 y 4 presentan los valores de los parámetros físicos, químicos y biológicos, respectivamente, del agua cruda en la entrada de la potabilizadora de Miraflores.

Dado que los parámetros físicos y químicos del agua se mantienen relativamente constantes a lo largo del año, mientras que los parámetros biológicos presentan mayor variabilidad, en la Tabla 4 se muestran distintas mediciones efectuadas a lo largo del año.

Tabla 2. Parámetros físicos del agua de entrada a la potabilizadora de Miraflores

Parámetro	Agua cruda
Sólidos totales disueltos (mg/L)	115,6
Turbidez (NTU)	8-10
Conductividad (μ S/cm)	255,9

NTU: Unidad nefelométrica de turbidez

Tabla 3. Parámetros químicos del agua de entrada a la potabilizadora de Miraflores

Parámetro	Agua cruda
DQO (mg/L)	5,1
Calcio (mg/L)	12,5
Cloruros (mg/L)	32,0
Alcalinidad (mg/L)	55,2
Dureza (mg/L)	59,8
pH	7,4

Tabla 4. Parámetros biológicos del agua de entrada a la potabilizadora de Miraflores

Mes	Coliformes totales (NMP/100mL)	<i>Escherichia coli</i> (NMP/100mL)
Agosto	701,2	5,7
Septiembre	759,9	9,5
Octubre	1042,1	5,6
Noviembre	809,8	15,0

NMP: Número más probable

En el informe de Calidad de Agua de la Cuenca del Canal se indica que el índice de calidad del agua es alto (calidad excelente) para los meses de enero a abril, coincidiendo con la estación seca. Sin embargo, en los meses posteriores (mayo y junio), estos valores presentan una leve disminución (calidad buena), lo que concuerda con el inicio de la temporada lluviosa, incremento de escorrentías y arrastres del material acumulado en los suelos durante la estación seca. Para el mes de noviembre se registran los valores más bajos (calidad media). [3].

3.3. Legislación para el agua de salida

Mediante el Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 21-2019 sobre tecnología de los alimentos, agua potable, definiciones y requisitos generales, se establecen reglamentaciones referidas a la calidad del agua potable y sobre vigilar la calidad de agua potable abastecida a la población [4]. En las Tablas 5 y 6 se muestran los valores permitidos para cada parámetro después del proceso de potabilización.

Tabla 5. Valor límite de los parámetros biológicos del agua abastecida a la población

Parámetro	Unidades	Valor permitido
Coliformes totales	NMP/100 mL	< 1,1
<i>Escherichia Coli</i>	NMP/100 mL	< 1,1
<i>Giardia sp</i>	Nº quistes/1000 L	< 1
<i>Cryptosporidium sp</i>	Nº oocistos/1000 L	< 1

NMP: Número más probable

UFC: Unidades formadoras de colonias

Oocistos: Forma infectante del parásito *Cryptosporidium*

Tabla 6. Valor límite de los parámetros físicos y químicos del agua abastecida a la población

Parámetro	Unidades	Valor permitido
Olor y Sabor	NA	Aceptable
Color	UC	15
Turbidez	NTU	1
pH	-	6,5-8,5
Cloro residual libre	mg/L	0,3-0,8

NA: No aplica

UC: Unidad de color

NTU: Unidad nefelométrica de turbidez

Por otro lado, cabe indicar que en el agua existen muchas clases de elementos disueltos en ella. Esto podría conducir a reacciones que conllevarían a una situación desfavorable para la salud. Los valores permitidos de los parámetros químicos inorgánicos para el agua potable se indican en la Tabla 7 mientras en la Tabla 8 se muestran los valores permitidos para los parámetros químicos orgánicos.

Tabla 7. Valor límite de los parámetros químicos inorgánicos del agua abastecida a la población

Parámetro	Valor permitido (mg/L)	Observaciones
Aluminio	0,20	
Antimonio	0,02	
Arsénico total	0,01	
Bario	0,70	
Cadmio	0,003	
Cloruros	250	
Cobre	1	
Cianuro	0,07	
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	850	Como carbonato de calcio
Cromo total	0,05	
Dureza total	200	
Flúor	0,80	
Hierro	0,30	
Manganeso total	0,10	
Mercurio	0,006	

Tabla 7 (continuación). Valor límite de los parámetros químicos inorgánicos del agua abastecida a la población

Parámetro	Valor permitido (mg/L)	Observaciones
Molibdeno	0,07	
Níquel	10	
Nitrato	1	Como nitrógeno
Nitrito	0,01	Como nitrógeno
Plomo	0,04	
Selenio	200	
Sodio	500	
Solidos Totales Disueltos	250	
Sulfato	5	
Zinc		

Tabla 8. Valor límite de los parámetros químicos orgánicos del agua abastecida a la población

Parámetros	Valor permitido (mg/L)
TRIHALOMETANOS	0,1
HIDROCARBUROS	
• Benceno	0,01
• Benzo (a) pireno	0,0007
• Tolueno	0,70
• Xileno	0,50
PLAGUICIDAS	
• Aldicarb	0,01
• Atrazina y sus metabolitos	0,1
• Hidroxiatrazina	0,2
• Clorpirifos	0,03
• DDT y metabolitos	0,001
• Dimetoato	0,006
• Pendimetalina	0,02

Por último, cabe indicar que, por razones meteorológicas o de la naturaleza y estructura del terreno, en el área donde se obtiene el agua, se concede una autorización para variar las concentraciones de ciertos parámetros, siempre y cuando esto no ponga en riesgo la salud. En la Tabla 9 se muestran los valores aceptados en situaciones de emergencia nacional.

Tabla 9. Valores máximos permitidos para el agua abastecida a la población en situaciones de emergencia nacional

Parámetro	Unidades	Valor máximo en situaciones de emergencia nacional
Turbidez	NTU	5
Conductividad	μS/cm	1.000
Cloro residual libre	mg/L	1,2
Dureza	mg/L	400
Flúor	mg/L	1,5

NTU: Unidad nefelométrica de turbidez

Conocidos los valores de los parámetros del agua cruda de entrada a la potabilizadora y los valores límite permitidos según legislación, se pueden comparar. En la Tabla 10 se muestra dicha comparación, observándose que el agua cruda cumple todos los valores de legislación excepto la turbidez y los parámetros biológicos, por lo que se tratará en la potabilizadora para reducir dichos parámetros.

Tabla 10. Comparación del agua cruda con valores límite de la legislación

Parámetro	Agua cruda	Valor límite
Coliformes totales (NMP/100 mL)	828,08*	< 1,1
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 mL)	8,95*	< 1,1
Turbidez (NTU)	8-10	1
Conductividad (μS/cm)	255,9	850
pH	7,4	6,5-8,5
Cloruros (mg/L)	32	250
Dureza (mg/L)	59,8	200

*Media de los valores tomados por mes

NMP: Número más probable

3.4. Procesos susceptibles de mejoras y propuestas de modificación

Actualmente, en la potabilizadora de Miraflores existe una gestión deficiente de los residuos generados tanto líquidos como sólidos, además de la posibilidad de generación de compuestos químicos cancerígenos.

En la desinfección primaria, que actualmente se realiza con cloro, se generan subproductos tóxicos y potencialmente cancerígenos, conocidos como trihalometanos (THM), los cuales representan un riesgo para la población. Gracias a los avances tecnológicos hoy en día, es posible desinfectar el agua con un generador de ozono el cual no produce estos subproductos nocivos.

Las aguas residuales y los fangos generados en el retrolavado de los filtros y en los procesos de sedimentación, respectivamente, son vertidos a ríos y lagos próximos. En lugar de esto, es posible la implementación de un espesador de fangos el cual es capaz de clarificar esta agua y recircularla a cabecera de planta o donde más interese, evitando la contaminación de fuentes naturales y reduciendo el consumo de agua cruda del lago. Al mismo tiempo, este equipo permite concentrar los fangos y aprovecharlos en su mayoría en aplicaciones agrícolas.

Por otro lado, los filtros de arena, grava y antracita utilizados en la etapa de filtración, cuando cumplen su ciclo de vida, se llevan a vertederos. La valorización de estos residuos dirigiéndolos a un gestor externo contribuirá a una economía circular, reduciendo la dependencia de vertederos y promoviendo el reciclaje y la reutilización de materiales.

Por último, la potabilizadora utiliza una combinación de fuentes de energía renovables y no renovables; en concreto, hidroeléctrica y termoeléctrica. Sin embargo, debido a las sequías y teniendo en cuenta el clima tropical de Panamá, el cual recibe una intensa radiación solar incluso en la temporada de lluvias, se considera que el uso de paneles solares resultaría beneficioso. Esto permitiría disminuir el uso de fuentes no renovables, promoviendo energías limpias y aprovechando los recursos naturales del país.

4. DESCRIPCIÓN DE LAS MODIFICACIONES PROPUESTAS

4.1. Desinfección con ozono

4.1.1. Antecedentes

El uso del ozono como desinfectante y oxidante en el tratamiento de aguas ha existido desde hace varios años atrás. La primera planta en la cual se utilizó el ozono se fundó en el año 1893 en Países Bajos. A partir de ahí su uso en potabilizadoras se fue expandiendo rápidamente en países como Alemania, Rusia, Francia y España antes del 1914 y para 1915 ya existían 49 plantas que utilizaban generadores de ozono.

Este crecimiento se detuvo cuando se descubrió el cloro, el cual resultaba mucho más económico. Esto estimuló su uso como desinfectante en varias partes del mundo, por lo que el uso del ozono se vio drásticamente reducido [5]. Sin embargo, el interés en volver a utilizar ozono se retomó en los años 1990 al descubrir las propiedades carcinógenas de los trihalometanos (THM), compuestos generados por la reacción del cloro con la materia orgánica natural presente en el agua. Debido a la expansión del uso del ozono en los últimos años, hoy en día existe una disponibilidad de equipos de ozonización con mejor rendimiento, mayor compactación y menor consumo de energía, lo cual posiciona el ozono en condiciones de competencia con el cloro y otros agentes desinfectantes.

Según la norma UNE-EN 1278, el ozono se utiliza en el tratamiento del agua para la desinfección, la mejora de la calidad organoléptica general del agua, la eliminación del hierro y el manganeso, la eliminación del color, la oxidación avanzada de contaminantes persistentes y como reactivo para favorecer la coagulación.

El ozono, al igual que el cloro, actúa como desinfectante y oxidante. Sin embargo, el ozono es de 600 a 3.000 veces más rápido como desinfectante que el cloro [6] y es más efectivo en la inactivación de *Giardia* y *Cryptosporidium* (organismos que causan enfermedades gastrointestinales), virus y ciertas formas de algas, y además no genera compuestos tóxicos ni imparte un sabor al agua, a diferencia del cloro. Por otro lado, al tener un potencial de oxidación mayor que el cloro, también es un oxidante más potente y cuando se descompone en agua genera radicales intermedios que tienen un poder oxidante incluso mayores al propio ozono lo que permite oxidar compuestos que producen sabores u olores desagradables como MIB (metilisoborneol) y geosmina, difíciles de remover por el cloro y otros agentes oxidantes.

Un estudio llevado a cabo en Suiza informa que el ozono en concentraciones de 1mg/L reduce el contenido en bacterias totales desde 190/mL a menos de 1/mL en un tiempo de contacto de 1 minuto, mientras que el cloro a igual concentración reduce el número de bacterias a 40/mL en cinco minutos y a 2/mL en 40 minutos.

Por otro lado, si la materia orgánica natural (consistente en ácidos húmicos y fúlvicos, microorganismos como bacterias, virus, algas) no se elimina correctamente, no solo genera THM sino que también puede interferir en el rendimiento de otros procesos en la planta, al igual que en los costes operativos de la misma.

El uso del ozono, además de no generar subproductos cancerígenos al oxidar la materia orgánica y otras sustancias, mejora la calidad organoléptica del agua y optimiza otras etapas del proceso de potabilización, como se detallará más adelante.

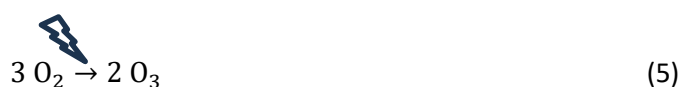
Los factores a tener en cuenta a la hora de incorporar un proceso de ozonización en la planta incluyen considerar la elevada inversión inicial y los costes operativos; sin embargo, la eficaz oxidación de la materia orgánica presente en el agua en el inicio de la potabilización conllevaría a reducir los costos de etapas posteriores como la coagulación y la filtración, así como a mejorar el rendimiento de las mismas [7]. También es importante considerar la formación de bromatos, un subproducto de desinfección que se generará si hay presencia de ion bromuro en el agua. Además, el lugar de aplicación del ozono en la potabilizadora se debe seleccionar según los objetivos que se persigan. Es posible la aplicación del ozono al inicio, en un punto intermedio o al final de la etapa de la potabilización; se trataría de una pre-ozonización, una ozonización intermedia y una post-ozonización, respectivamente. Por último, es importante resaltar que, aunque el ozono se utilice como desinfectante u oxidante en la planta, es necesario realizar una desinfección final con cloro. A diferencia del ozono y otros desinfectantes, el cloro tiene un poder remanente que permite dejar una concentración residual en el agua el cual previene la recontaminación de esta durante su distribución.

La aplicación del ozono en aguas con elevada cantidad de materia orgánica natural o contaminantes difíciles de oxidar que causan mal olor y sabor como MIB y geosmina se ve muy favorecida; sin embargo, en aguas que no contienen elevada cantidad de materia orgánica natural también se recomienda su uso debido a los beneficios secundarios que este aporta.

En el caso de la potabilizadora de Miraflores, aunque la cantidad de materia orgánica presente en el agua cruda no es elevada, interesa el uso de ozono por varias razones. Además de mejorar la calidad del agua, el ozono es una alternativa más limpia, ya que no genera subproductos tóxicos, como ocurre con otros desinfectantes. También optimiza el rendimiento de otras etapas del proceso de potabilización y, debido a su mayor poder oxidante y desinfectante, tiene la capacidad de responder ante desastres naturales de una manera más eficiente. Por ello, se concluye que el uso de ozono en la planta supondrá un efecto positivo.

4.1.2. Fundamentos

El ozono (O_3) es un gas muy reactivo e inestable que se genera *in situ* mediante la aplicación de una descarga eléctrica al oxígeno (O_2), como se muestra en la Ecuación 5. Durante este proceso, las moléculas de oxígeno (O_2) se combinan para formar moléculas de ozono (O_3). Cuando el ozono entra en contacto con el agua, reacciona y posteriormente se descompone nuevamente en oxígeno, como se muestra en la Ecuación 6.





Es importante considerar que se requieren cantidades sustanciales de energía para separar el enlace covalente estable oxígeno-oxígeno.

Existen varios tipos de generadores de ozono; sin embargo, el más común en el tratamiento de aguas es el de descarga de corona debido a su alta eficiencia y su capacidad para generar ozono a partir de oxígeno puro o aire, siendo la generación con oxígeno puro más efectiva debido a la mayor pureza de este permitiendo generar más ozono con menos energía.

Para obtener el ozono, se hace pasar una corriente de oxígeno puro o aire entre dos electrodos de un material conductor como acero inoxidable separados por un material dieléctrico como vidrio o cerámica. Se aplica un alto voltaje sobre los electrodos de modo que el electrodo conductor permite la creación de un campo eléctrico mientras el dieléctrico ayuda a mantenerlo. Al hacer pasar esta corriente gaseosa por el campo eléctrico, una parte del oxígeno de esta se descompone en oxígeno atómico ($\text{O}\cdot$). Estos iones positivos reaccionan con moléculas de oxígeno (O_2) que aún no han sido ionizadas para formar ozono (O_3) en una concentración de entre 1% y 12% como se muestra en la Figura 19. A esta mezcla se la llama gas ozonizado. El gas ozonizado se inyecta a través de un difusor en un contactor, donde se encuentra el agua a tratar. El contactor permite establecer un tiempo de contacto entre el ozono y el agua a tratar, de manera que se puedan dar las reacciones necesarias para la desinfección y oxidación [5]. Después de este tiempo de contacto es posible que quede ozono sin reaccionar, por lo que el contactor sirve además para proporcionar un espacio donde capturarlo; a continuación, este ozono sin reaccionar será destruido por un destructor de ozono para evitar su liberación a la atmósfera ya que puede poner en riesgo la salud de los operarios al tratarse de un gas tóxico.

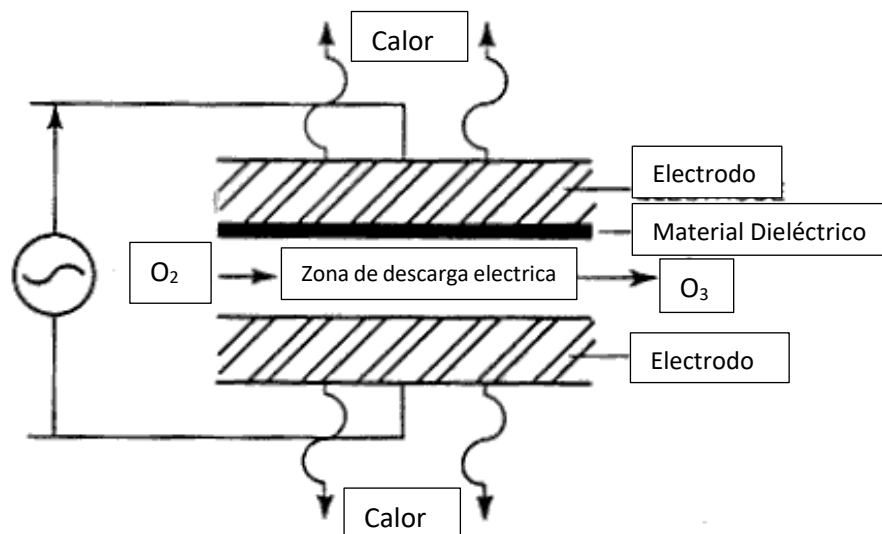


Figura 19. Generación de ozono por descarga de corona

Fuente: *Water Treatment Plant Design*, American Water Works Association (AWWA) [2]

Cuando el ozono entra en contacto con el agua, sigue dos mecanismos de reacción. El primero se basa en la reacción directa del ozono con los compuestos. Este proceso es lento y selectivo, y se da a pH bajo o neutro. El segundo consiste en la reacción indirecta de los compuestos con radicales hidroxilo (OH[·]), radicales que se forman naturalmente cuando el ozono se descompone en el agua. Estos radicales oxidan de manera muy rápida y poco selectiva a los compuestos orgánicos [8]. Además, como se puede ver en la Tabla 11, tienen un potencial de oxidación mayor al del ozono por lo que pueden oxidar fácilmente sustancias difíciles de oxidar por el resto de agentes oxidantes; entre estas sustancias se encuentran pesticidas, disolventes y compuestos que causan mal olor y sabor como 2-metilisoborneol (MIB) y geosmina, que son subproductos derivados del crecimiento de algas y su descomposición.

Tabla 11. Potenciales de oxidación para distintos agentes oxidantes

Agente Oxidante	Potencial de oxidación (V)
Cloro (Cl ₂)	1,36
Dióxido de Cloro (ClO ₂)	0,95
Ozono (O ₃)	2,07
Radical hidroxilo (OH [·])	2,42
Iones permanganato	1,55

Fuente: *Eficiencia y Sostenibilidad del Empleo del Ozono en la gestión de los recursos hídricos* [7]

Normalmente la concentración de radicales hidroxilo en el agua suele ser suficiente para oxidar los compuestos más difíciles de oxidar, pero en caso de ser necesario se puede aumentar su concentración aumentando el pH del agua o haciendo uso de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) [7].

En la Tabla 12 se muestran los principales compuestos orgánicos e inorgánicos tratados con ozono.

Tabla 12. Compuestos orgánicos e inorgánicos tratados con ozono

Inorgánicos	Orgánicos	
	Patógenos	Otros
Hierro		
Manganeso	Bacteria	Disolventes*
Sulfuro de hidrógeno	Virus	Pesticidas*
Bromuro	<i>Giardia</i>	Color
	<i>Cryptosporidium</i>	Sabor y olor*
*Con ayuda de los radicales libre hidroxilo formados naturalmente a partir del ozono, promovidos con elevado pH (>8) o con la adición de peróxido de hidrógeno		

Fuente: *Ozone in Drinking Water Treatment: Process Design, Operation, and Optimization*. American Water Works Association [5]

4.1.3. Ubicación de la ozonización en la potabilizadora

Como se ha mencionado anteriormente, el ozono se puede aplicar en distintas etapas del tratamiento de potabilización, dependiendo de los objetivos que se persigan y la calidad del agua cruda. Es posible una pre-ozonización, una ozonización intermedia y una post-ozonización, respectivamente, como se indica en la Figura 20. Se pueden emplear tanto una como todas ellas, necesitando tantos generadores de ozono como número de etapas en las que se implemente.

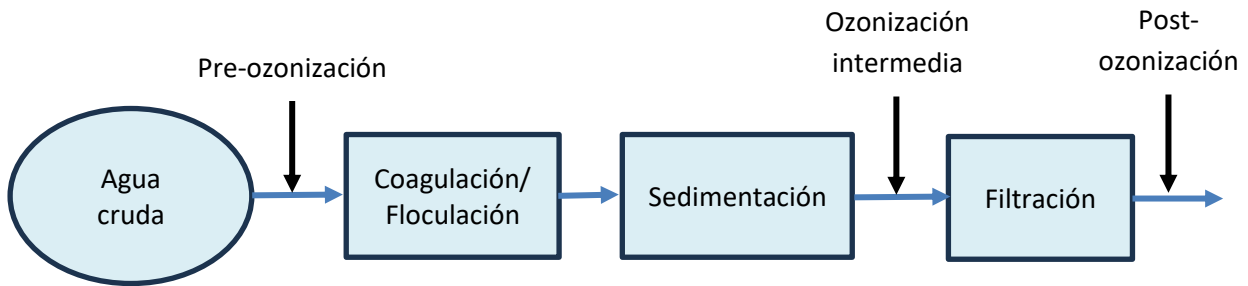


Figura 20. Puntos habituales para la aplicación de ozono en una potabilizadora

Fuente: Drinking-water treatment with ozone. Journal of the American Water Works Association [8]

Para la potabilizadora de Miraflores se optará por una pre-ozonización ya que se consiguen beneficios a lo largo de todo el proceso de potabilización. Estos se mencionan a continuación:

- Control de subproductos de desinfección

En la desinfección primaria, al reemplazar el cloro por el ozono se elimina la formación de los trihalometanos (THM), reduciendo el riesgo a largo plazo de algunos tipos de cáncer en la población que consume el agua.

- Mejora de la coagulación/floculación

El ozono, al oxidar, es capaz de alterar la carga superficial de los coloides en suspensión, reduciendo su repulsión y facilitando la posterior aglomeración. Por tanto, la aplicación de ozono antes de la etapa de coagulación/floculación puede reducir la cantidad de coagulante necesario en un 25% [7].

- Prevención de formación de biofilm

En la etapa de filtración, actualmente se crea una capa de biofilm en los medios filtrantes debido a que las bacterias presentes en el agua se alimentan de la materia orgánica no eliminada en etapas anteriores. Esto implica un aumento en la frecuencia de retrolavado de los filtros para que estos operen de manera adecuada y, por lo tanto, una disminución en el ciclo de vida de los mismos ya que en cada retrolavado se deteriora el medio filtrante debido a la elevada presión de agua utilizada. Con una pre-ozonización, la materia orgánica se reduce

casi en su totalidad, lo que evita significativamente la llegada de esta a los medios filtrantes. Esto puede aumentar el ciclo de vida de los filtros, así como disminuir la frecuencia de retrolavado de los mismos, generando ahorros en material de medio filtrante y de agua.

En resumen, la pre-ozonización es una etapa efectiva para mejorar la calidad del agua cruda mediante la desinfección de microorganismos y la oxidación de compuestos orgánicos e inorgánicos. Esto no solo mejora la calidad del agua tratada, sino que también optimiza la eficacia de las etapas posteriores del tratamiento de agua a diferencia de la ozonización intermedia y la post-ozonización.

4.1.4. Subproductos de desinfección generados

A pesar de que el ozono no genera subproductos tóxicos durante la desinfección, existe la posibilidad de formación del ion bromato (BrO_3^-) si el agua a tratar contiene iones bromuro (Br^-). El bromato es tóxico y puede ser perjudicial para la salud si se encuentra en concentraciones elevadas en el agua potable. Por ello, organismos como la Unión Europea, Estados Unidos y la Organización Mundial de la Salud (OMS) han establecido un límite máximo de 0,010 mg/L [2].

Para evaluar la posible formación de bromato en la potabilizadora se ha consultado la Tabla 7, que detalla los parámetros inorgánicos a controlar. Sin embargo, en esta tabla no se reporta la presencia de iones bromuro (Br^-), por lo que se asume que no están presentes en el agua potabilizada. Esto refuerza la viabilidad del ozono en la planta, ya que permite desinfectar sin generar productos tóxicos.

4.1.5. Parámetros de diseño

En este apartado se van a describir los parámetros a tener en cuenta a la hora de diseñar un equipo de ozonización. Se trata tanto de los parámetros del equipo como del agua a tratar.

4.1.5.1. Parámetros del equipo

El sistema de ozonización se divide en 4 subsistemas. En la Figura 21 se observa el esquema de un generador de ozono que utiliza oxígeno líquido como fuente de alimentación, donde se han agrupado los diferentes subsistemas; y en la Figura 22 se muestra una imagen de un generador de ozono, con un tanque de oxígeno líquido.

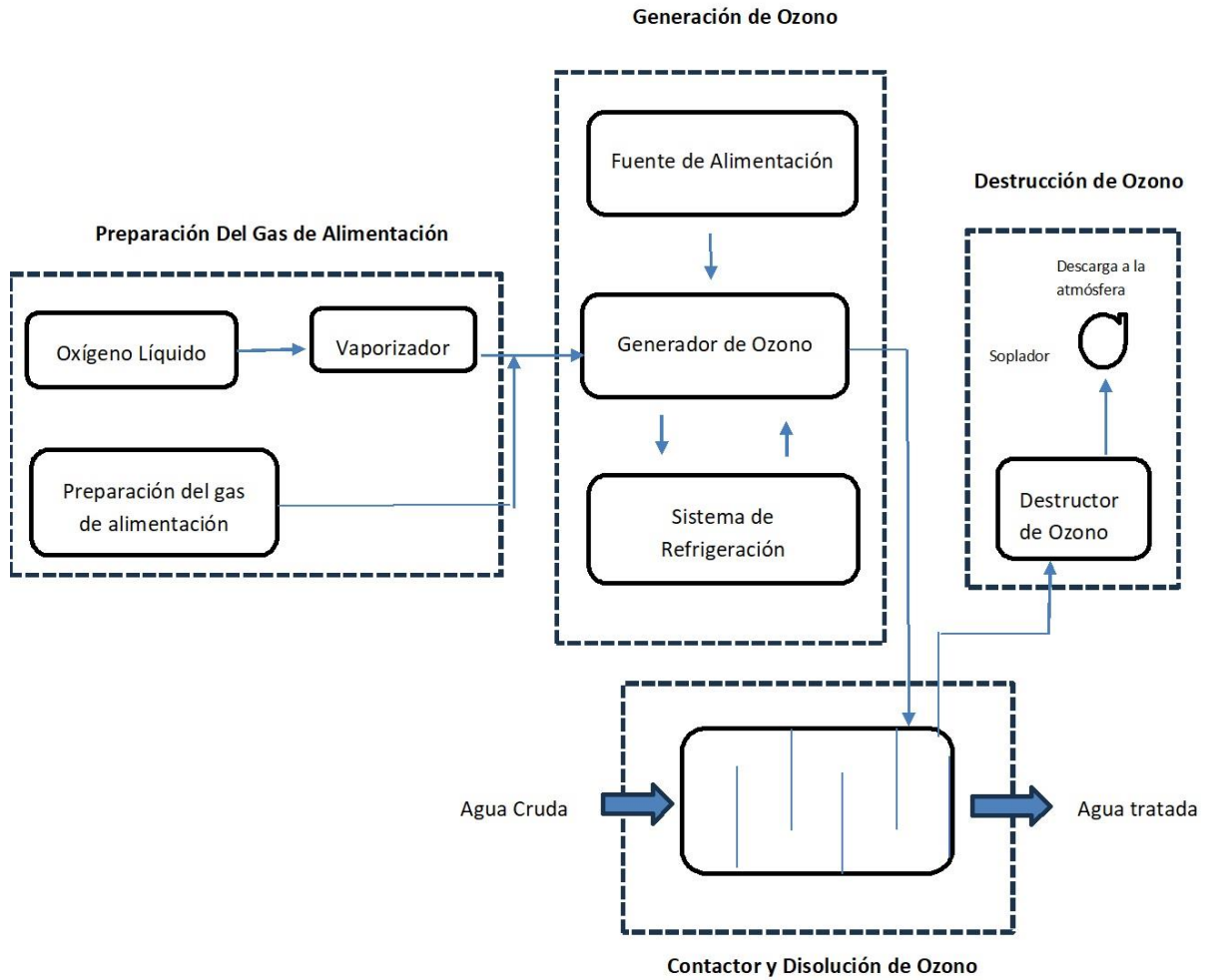


Figura 21. Esquema típico de un sistema de generación de ozono
Fuente: Water Treatment Plant Design, American Water Works Association (AWWA) [2]



Figura 22. Sistema de ozonización
Fuente: ZonoSistem [9]

A continuación, se procede a describir los elementos que constituyen cada uno de los cuatro subsistemas de un generador de ozono, así como los principales parámetros a tener en cuenta:

A. Subsistema 1: preparación del gas de alimentación

- Gas de alimentación

Cuando se utilizan sistemas de preparación de aire *in situ* para suministrar el oxígeno necesario, se obtienen bajas concentraciones de ozono debido a que solo se dispone aproximadamente de un 21% en volumen de oxígeno en el gas de alimentación. Hoy en día lo más común es almacenar oxígeno líquido en tanques ya que este permite alcanzar concentraciones más elevadas de ozono, debido a la pureza del oxígeno líquido empleado. Para los generadores que utilizan oxígeno líquido como gas de alimentación, la concentración en ozono del gas ozonizado alcanza valores del 1-12% en volumen mientras que los que utilizan aire ambiente, solo alcanzan un 1-4% en volumen de ozono [10]. Un mayor porcentaje en volumen de ozono expresa que una mayor proporción del gas generado es ozono, lo que resulta en una menor dosis necesaria a introducir al agua a tratar para alcanzar los objetivos de desinfección y oxidación deseados.

La energía específica se define como la cantidad de energía requerida para producir ozono y se expresa en kWh/(kg O₃). Para sistemas que utilizan oxígeno puro, la energía específica está en el rango de 7,7–12 kWh/(kg O₃), mientras que para sistemas que utilizan aire ambiente, al requerir el uso de filtros, secadores y post-enfriadores para limpiar y secar el aire de entrada, se requiere un mayor uso de energía específica, entre 13–20 kWh/(kg O₃).

En resumen, al emplear oxígeno líquido como fuente de gas de alimentación, se pueden alcanzar mayores concentraciones de ozono en el gas ozonizado requiriendo menores cantidades de oxígeno y, al ser este puro, se utiliza menor energía para generar el ozono. Además de ahorrar en costes energéticos, se ahorra en costes de mantenimiento al solo necesitar un tanque de oxígeno líquido, a diferencia de los equipos necesarios para generar oxígeno a partir de aire (filtros, secadores, post-enfriadores, compresores). Por todo ello, se prefiere esta opción.

Es importante destacar que, si el agua a tratar es de buena calidad, no será necesario utilizar concentraciones tan elevadas de ozono. Si se utilizara una concentración más elevada de lo necesario, se elevarían los costes de energía innecesariamente.

- Preparación del gas de alimentación

En caso de emplear aire como gas de alimentación, se debe distribuir una cantidad suficiente del mismo al generador de ozono en unas condiciones específicas, independientemente de la estación del año. El gas tiene que estar libre de partículas, muy seco y con baja concentración de hidrocarburos [10]. Para acondicionarlo, se utiliza un filtro y un secador de aire. Por otro lado, la temperatura debe ser inferior a 33 °C, ya que si es muy elevada se acelera la velocidad de descomposición del ozono. En cuanto al flujo de gas de alimentación, este se debe diseñar para conseguir la cantidad de ozono deseada a una concentración determinada.

- Vaporizador

En caso de utilizar oxígeno líquido como fuente de oxígeno, el vaporizador se encarga de pasar a fase gaseosa el oxígeno líquido almacenado. Existen distintos tipos, siendo el más común el vaporizador tipo ambiente que usa el calor del ambiente para vaporizar el oxígeno líquido [2]; sin embargo, en países con alta humedad relativa como es el caso de Panamá su eficiencia disminuye por la formación de escarcha en los tubos. En este caso se prefiere el uso de un vaporizador eléctrico ya que no depende de las condiciones ambientales para su funcionamiento y permiten un control preciso de la temperatura y del flujo de gas vaporizado.

B. Subsistema 2: generación de ozono

- Generador de ozono y fuente de alimentación

Existen varios tamaños de generadores de ozono. Para aplicaciones de tratamiento de aguas se utilizan grandes generadores de ozono de tubo vertical u horizontal. La capacidad de generación

(kg O₃/h) dependerá de la cantidad de ozono que necesite producirse, lo cual es función de la calidad del agua a tratar [2].

La fuente de alimentación se suele colocar al lado del generador de ozono. La conexión eléctrica necesaria para dicha fuente generalmente es de 480 V, trifásica y 60 Hz. En cuanto a la demanda de energía, esta está relacionada con la capacidad del generador de ozono y la energía específica requerida para producirlo. Para la generación de ozono, la fuente de alimentación sube el voltaje de 480 V a 6.000-20.000 V y la frecuencia de 60 Hz a más de 6.000 Hz [2].

- Sistema de refrigeración

Aproximadamente el 90% de la energía aplicada se debe remover en forma de calor. A mayor cantidad de energía específica, se requiere un mayor flujo de refrigeración. Generalmente se requiere un flujo de refrigeración entre 2.100-2.900 L/(kg O₃), produciéndose un aumento de la temperatura del agua de refrigeración de 2,8 °C [2].

Existen tres tipos comunes de sistemas de refrigeración: sistema de circuito cerrado con enfriadores, intercambiadores de calor agua-agua en circuito cerrado y sistemas de paso único de bucle abierto. El primero es favorable ya que utiliza una cantidad fija de agua en un circuito cerrado, por lo que requiere un menor consumo de agua a largo plazo, y al igual que los otros es capaz de proporcionar un enfriamiento eficiente y controlado.

C. Subsistema 3: contactor y disolución de ozono

El oxígeno/aire resultante enriquecido en ozono se introduce mediante un difusor directamente en el agua a tratar, la cual se encuentra en un contactor.

- Difusor

El difusor se encarga de distribuir controladamente el ozono gaseoso generado en el agua a tratar. Existen dos métodos: difusión e inyección lateral. La diferencia entre ellos está en el tamaño de las burbujas generadas. Mediante una inyección lateral se producen burbujas grandes, mientras que con un difusor se producen burbujas más finas. Un difusor de burbuja fina proporciona una eficiencia de transferencia de más del 90% y además proporciona una mezcla uniforme y efectiva del ozono en el agua.

- Contactor

El contactor de ozono más común es un tanque de hormigón con deflectores por su menor costo y huella de carbono. Se suelen utilizar deflectores de entrada perforados, deflectores intrabasínicos serpenteantes o canales de salida perforados para maximizar la desinfección.

Los contactores son usualmente de 5 m de profundidad y proporcionan un tiempo de contacto aproximado de 10-20 minutos.

D. Subsistema 4: destrucción de ozono

- Destrucción de ozono

Hay varias razones por las que puede existir una concentración de ozono residual; entre ellas se tienen: un tiempo de contacto insuficiente, un exceso de ozono aplicado y condiciones no óptimas de temperatura o pH. Este ozono residual se debe destruir antes de su liberación a la atmósfera ya que al ser un gas tóxico pone en riesgo la salud de los operarios cercanos. El destructor de ozono se encargará de transformar el ozono en oxígeno para su posterior liberación a la atmósfera.

Existen varios métodos de destrucción; entre ellos están: la reducción térmica, la reducción química, la dilución y unidades de destrucción de ozono termocatalíticas.

4.1.5.2. Parámetros del agua a tratar

Para el diseño de los parámetros del generador de ozono se tendrá en cuenta el volumen diario de agua a tratar en la planta al igual que su calidad y condiciones.

A. Calidad del agua cruda

Es necesario estudiar previamente la calidad del agua a tratar para determinar la dosis necesaria de ozono

- Demanda química de oxígeno

La demanda química de oxígeno (DQO) sirve para medir la cantidad de materia orgánica presente en el agua. A mayor DQO, mayor contenido de materia orgánica.

Se consideran valores bajos de DQO cuando está por debajo de 50 mg/L, medios cuando está entre 50-200 mg/L y altos para más de 200 mg/L.

Según la Tabla 3, la DQO del agua de entrada a la potabilizadora de Miraflores tiene un valor de 5,1 mg/L por lo que se considera que hay poca cantidad de materia orgánica en el agua, lo cual es beneficioso.

- Carga microbiana

Se evalúan los valores de coliformes totales y *Escherichia coli*, los cuales indican la presencia de microorganismos patógenos. Para coliformes totales se consideran los siguientes valores:

- ✓ Bajo: 0-100 NMP/100 mL.
- ✓ Medio 100-1000 NMP/100 mL.
- ✓ Alto: Mas de 1000 NMP/100mL.

Mientras que para *Escherichia coli*:

- ✓ Bajo: menos de 1 NMP/100 mL.
- ✓ Medio: entre 1 y 10 NMP/100 mL.
- ✓ Alto: más de 10 NMP/100 mL.

En el caso del agua cruda de la potabilizadora de Miraflores, los valores de coliformes totales y *Escherichia coli* están ambos en un rango medio-alto de acuerdo con los valores de la Tabla 4.

- Cloruros

Los cloruros pueden formar subproductos indeseados como cloraminas en el agua si la dosis de ozono no es adecuada o si hay un exceso de cloruros. Se consideran los siguientes valores:

- ✓ Bajo: menos de 250 mg/L.
- ✓ Medio: entre 250-500 mg/L.
- ✓ Alto: más de 500 mg/L.

En la Tabla 3 se observa que el agua cruda de la potabilizadora de Miraflores tiene una concentración de cloruros de 32,0 mg/L, por lo que se considera un valor bajo.

B. Condiciones del agua

Las condiciones del agua cruda tales como pH y temperatura pueden afectar también a la eficacia del tratamiento, por lo que es importante asegurarse de que estén en condiciones favorables para la aplicación de ozono.

- pH

El ozono se descompone más rápidamente a pH más altos. En la Tabla 3 se observa que el pH del agua cruda de la potabilizadora de Miraflores es de 7,4 aunque, tras pasar por la aireación, el pH puede variar ligeramente. El pH recomendado para tratar el agua con ozono está entre 6,5 y 8,5, por lo que se considera que el pH del agua cruda es apropiado para tratarla con ozono.

- Temperatura

La temperatura del agua afectará a la solubilidad del ozono en el agua y a la velocidad con la que ocurren las reacciones en el tratamiento. Es importante considerar que, a temperaturas más altas, aumenta la reactividad, pero a la vez aumenta la tasa de descomposición del ozono y disminuye su solubilidad. Las temperaturas consideradas óptimas para favorecer el tratamiento con ozono se encuentran entre 15-25 °C. La temperatura media del agua cruda de la potabilizadora de Miraflores está entre 24-26 °C. Sin embargo, al ser el primer tratamiento en la planta una aireación, la circulación del aire en el agua provoca un intercambio de calor entre este y el agua. El aire, al estar a una menor temperatura que el agua, provoca una leve disminución de la

temperatura de esta, lo que puede permitir ajustarse un poco más a los rangos óptimos para la ozonización.

Debido a que el ozono sirve para desinfectar y oxidar, la dosis de este se determina en función de la carga microbiana y la cantidad de materia orgánica presente en el agua. Como ya se ha comentado, el agua que se trata en la potabilizadora de Miraflores presenta una baja cantidad de materia orgánica pero media-alta de carga microbiana, por lo que la dosis de ozono se ajustará principalmente en función de la carga microbiana para asegurar una desinfección eficaz. En cuanto al pH y la temperatura del agua cruda, se llega a la conclusión de que son favorables para tratar el agua con ozono ya que se encuentran dentro de los rangos considerados como óptimos.

Una vez estudiados estos parámetros en función de las condiciones óptimas del agua cruda para trabajar con ozono, se considera que el uso de este en la planta de Miraflores es compatible con el agua a tratar, generando a la vez una concentración muy baja o nula de subproductos de desinfección.

4.2. Espesador de fangos

4.2.1. Fundamentos

Los espesadores de fangos son equipos utilizados para concentrar los lodos generados durante el proceso de potabilización mediante la eliminación de parte de la fracción líquida que contienen. Esto permite reutilizar el fango para otros fines útiles o efectuar su descarga controlada en vertederos en lugar de descargarlos en fuentes de agua superficiales; a su vez, también permite recircular el agua clarificada a cabecera de planta o donde sea más conveniente, ahorrando una cantidad importante de agua.

En la potabilizadora los lodos se generan en las etapas de sedimentación y retrolavado de los medios filtrantes. A la mezcla de ambos lodos se le denomina lodo mixto. Se puede concentrar tanto el lodo procedente de la sedimentación, como el procedente del retrolavado de los filtros, así como el lodo mixto; sin embargo, resulta favorable concentrar el lodo mixto ya que se reducen las corrientes de rechazo en la planta, lo cual evita la contaminación de fuentes de agua cercanas. Los lodos contienen los sólidos en suspensión removidos del agua cruda y los precipitados químicos de los coagulantes y floculantes utilizados.

Los tipos de espesadores más comunes para espesar lodos en plantas de mediano a gran tamaño son el espesador por gravedad, el espesador por flotación, el espesador mecánico y el espesador por centrifugación.

Dado que el objetivo al implementar este equipo es espesar los lodos procedentes de la sedimentación y del retrolavado para eliminar las corrientes de rechazo, se opta por utilizar un espesador de gravedad ya que, a diferencia de los demás, este es más eficaz para concentrar fangos mixtos por su forma de operación y su mayor tiempo de retención, logrando concentraciones iguales o superiores a los otros espesadores. Además, requiere un bajo coste de operación y mantenimiento, así como un menor uso de energía. Sin embargo, requiere de un mayor espacio.

Este espesador tiene forma cilíndrica con fondo cónico, lo que permite que los fangos sedimenten por gravedad debido a la mayor densidad de estos. Existen espesadores por gravedad estáticos y dinámicos. Los dinámicos son los más utilizados ya que utilizan mecanismos giratorios llamados rasquetas que permiten una sedimentación uniforme en el fondo del tanque desde donde se extraerán los fangos en un menor tiempo; en cambio, los espesadores estáticos, al solo depender de la gravedad para la sedimentación, para un mismo caudal de fango a tratar ocupan un mayor espacio ya que cuanto mayor es la superficie, más efectiva es la sedimentación, lo que requiere tanques de grandes diámetros. Además, para mejorar la sedimentación se suelen utilizar polímeros como coagulantes.

En la parte superior del espesador se encuentra el agua clarificada mientras que en la parte inferior se encuentra el fango espesado. Este se retira mediante mecanismos de arrastre como dispositivos dotados de rascadores profundos que remueven el fango recolectado lentamente hacia la salida del espesador. Posteriormente, el fango espesado puede pasar por etapas adicionales como una deshidratación para reducir aún más su contenido en agua y, en caso de ser necesario, una estabilización para minimizar olores y riesgos biológicos. Dependiendo de la calidad del fango, este puede ser reutilizado de varias maneras, entre ellas uso agrícola, producción de compost, recuperación de energía y como relleno para construcción.

Los tanques empleados como espesadores varían de 6 a 20 m de diámetro y la profundidad de agua lateral puede variar de 3 a 4 m [11]. La concentración alcanzada de los fangos depende de los tipos de lodos que se espesen. Para lodos mixtos, la concentración inicial suele estar entre 0,5% y 2%, y se concentra hasta 4% y 6% con la ayuda de un espesador por gravedad. Esto supone que el grado de espesamiento logrado suele aumentar de 2 a 5 veces la concentración de sólidos del lodo entrante, alcanzándose así uno de los objetivos del tratamiento de fangos [12].

En la Figura 23 se observa un esquema de un espesador de fangos por gravedad dinámico con rasqueta, y en la Figura 24 se muestra una imagen de este tipo de espesadores.

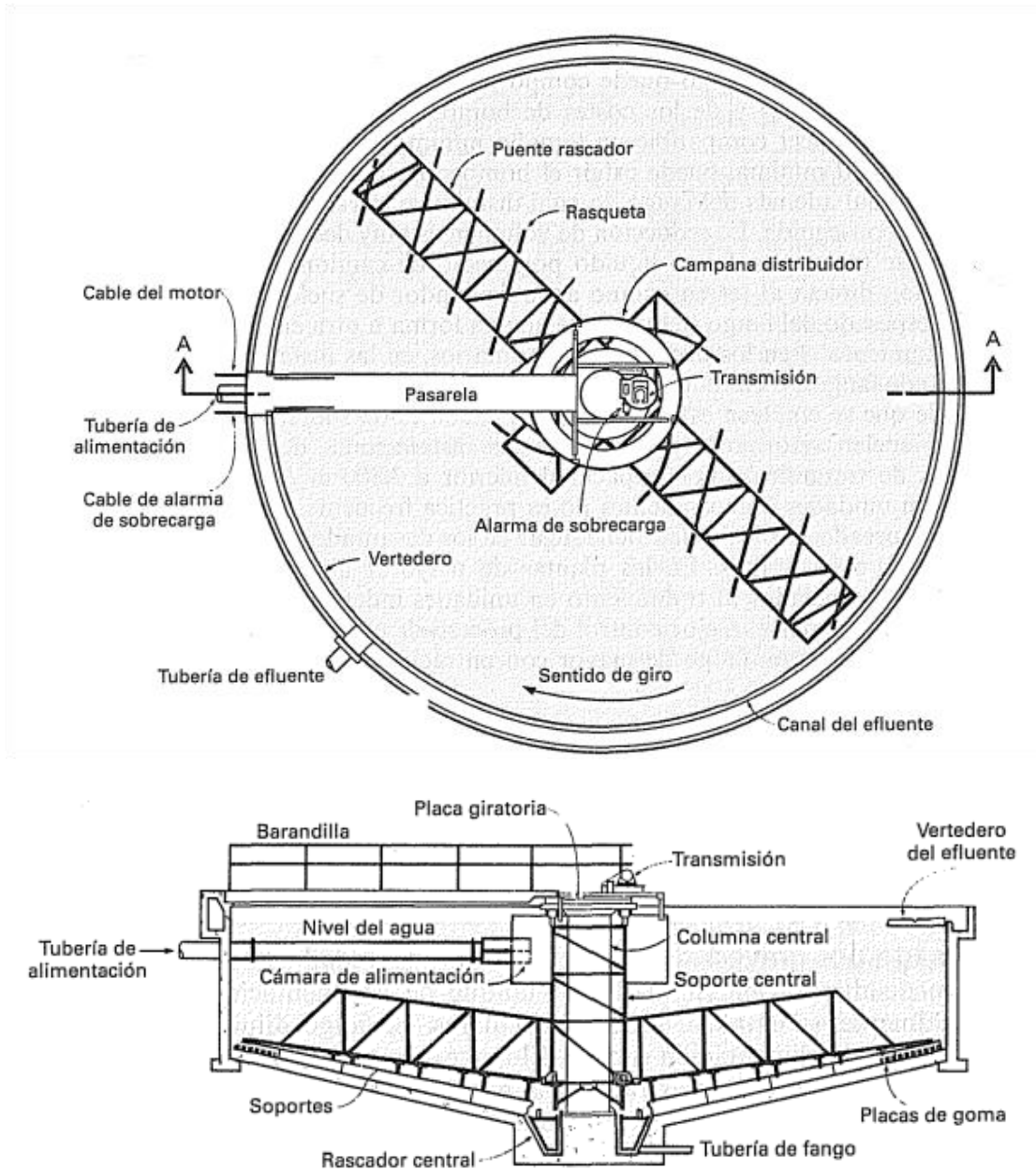


Figura 23. Esquema de un espesador de fangos por gravedad dinámico con rasqueta
Fuente: Hidrometálica [13]

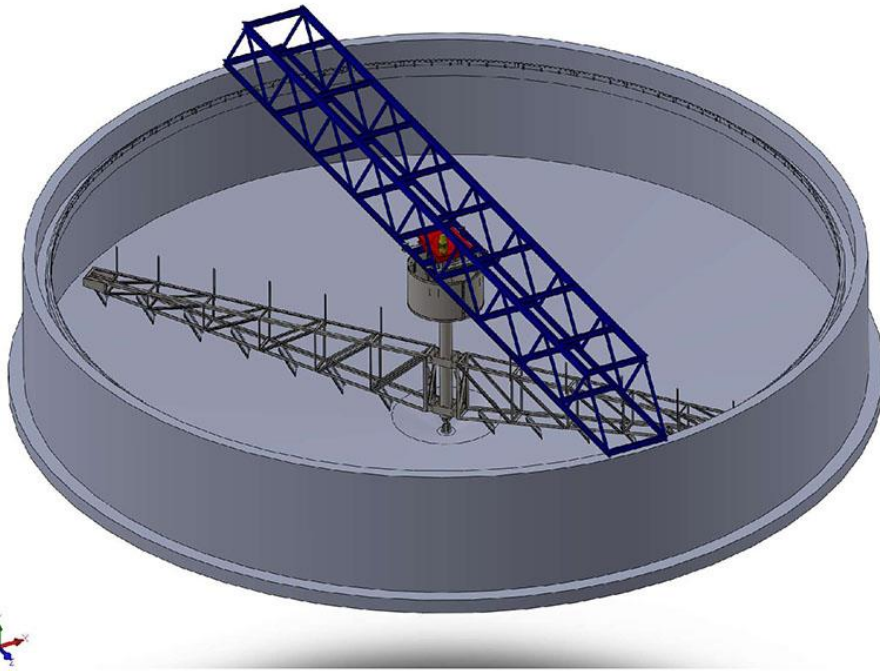


Figura 24. Espesador de fangos por gravedad dinámica

Fuente: Deyma La Mancha [14]

4.2.2. Parámetros de diseño

Los espesadores de gravedad se dimensionan en función de la carga de sólidos, la concentración de sólidos en suspensión, el caudal a tratar, la carga superficial y el calado. A continuación, se define cada uno de estos parámetros:

- Carga de sólidos ($\text{kg}/\text{m}^2\text{d}$)

Este parámetro se define como la cantidad de sólidos que se introducen al espesador diariamente por unidad de superficie (sección del espesador). Para el fango mixto, se toman valores entre 25-80 $\text{kg}/\text{m}^2\text{d}$ [12]. Si la concentración inicial de sólidos a concentrar es baja, generalmente se selecciona un valor de carga de sólidos bajo-medio ya que en este caso hay una mayor cantidad de agua y una carga de sólidos alta podría llevar a una sobrecarga del espesador, dificultando la sedimentación. En cambio, si la concentración inicial de sólidos es alta, se selecciona un valor de carga de sólidos más alto para que el espesador pueda manejar una mayor cantidad de sólidos sin llevar a sobrecargas.

- Calado (m)

El calado es la distancia vertical desde el fondo del tanque hasta la superficie del líquido y representa la profundidad hasta la cual un espesador puede llenarse de agua y lodo sin rebosar. Un valor adecuado optimizará la sedimentación y determinará el momento adecuado para retirar los lodos acumulados en el fondo, de manera que no disminuya la eficiencia del espesador. Los espesadores que tratan fangos mixtos suelen tener calados entre 3 y 4 m [12].

- Carga superficial (m³/m²h)

Este parámetro determina el volumen de lodo que puede procesar el espesador por unidad de área en un tiempo específico, generalmente expresado en horas. Una carga superficial alta puede causar un arrastre excesivo de sólidos, mientras una carga superficial baja puede crear condiciones sépticas. Para lodos mixtos el valor suele estar entre 6-12 m³/m²d [12].

- Caudal a tratar (m³/d)

Se trata del caudal de fangos que entra al espesador y en la potabilizadora será la suma del caudal de fango sedimentado y del caudal de fango procedente del retrolavado de los filtros. El fango generado en el proceso de sedimentación está formado por los lodos procedentes del coagulante precipitado, del precipitado de hierro y manganeso y de los sólidos en suspensión existentes en el agua cruda. El fango generado en el retrolavado de los filtros contiene los sólidos no removidos en la etapa de sedimentación.

El caudal de fango sedimentado se calculará a partir de la ecuación del rendimiento (η) de las tinajas de sedimentación (decantadores):

$$\eta (\%) = \frac{\text{Concentración de sólidos en lodo } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \times Q_{\text{fango}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)}{\text{Concentración de sólidos en agua entrada } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \times Q_{\text{agua_entrada}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)} \times 100 \quad (7)$$

Despejando el caudal de fango de la Ecuación 7, se tiene:

$$Q_{\text{fango_sedimentado}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right) = \frac{\eta \times \text{Concentración de sólidos en agua entrada } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \times Q_{\text{agua_entrada}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)}{\text{Concentración de sólidos en lodo } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)} \quad (8)$$

En primer lugar, se procede a calcular la concentración de sólidos en suspensión del agua de entrada a las tinajas de sedimentación, los cuales estarán constituidos por el coagulante, los sólidos en suspensión del agua cruda y los productos insolubles formados a partir del hierro y del manganeso.

Los sólidos formados por el coagulante de sulfato de aluminio son compuestos inorgánicos de hidróxido de aluminio (generado al reaccionar el sulfato de aluminio con el agua mediante un proceso de hidrólisis), junto con arcilla y materia orgánica e inorgánica precipitada por el coagulante. Para determinar estos sólidos se partirá de que por cada mg/L de coagulante añadido, se forman 0,44 mg/L de sólidos sedimentables [15]. En la potabilizadora de Miraflores, al utilizar 30 mg/L de coagulante, se estima una producción de 13,2 mg/L de sólidos sedimentables que contienen hidróxido de aluminio.

Para estimar los sólidos en suspensión presentes en el agua cruda que van a precipitar gracias al coagulante, se utiliza el valor de la turbidez del agua cruda ya que existe una correlación entre esta y la cantidad de sólidos en suspensión presentes en el agua. Esta relación es lineal, de forma que 1 NTU equivale a 1,5 mg/L de sólidos en suspensión [15]. Para el cálculo se va a utilizar un valor de turbidez medio de 9 NTU ya que el agua cruda de entrada a la planta potabilizadora de Miraflores suele tener entre 8-10 NTU (Tabla 2); por tanto, se estima una concentración de 13,5 mg/L de sólidos en suspensión.

El hierro y el manganeso presentes en el agua cruda se eliminan en la etapa de aireación mediante oxidación, por lo que se van a generar precipitados de formas insolubles de estos dos elementos, concretamente hidróxido de hierro (III) y dióxido de manganeso tal y como ya se ha mostrado en las Ecuaciones 1 y 2. Por cada mg/L de hierro o manganeso en disolución, se estima una producción de 1,5 a 2 mg/L de sólidos sedimentables [15]. Como solo se conoce el valor límite permitido de hierro y manganeso en el agua potable, siendo 0,3 y 0,1 mg/L (Tabla 7), respectivamente, para estimar la concentración inicial de ambos se partirá de estos valores. Asumiendo que el proceso de aireación tiene una eficiencia de remoción del 90%, el 10% del hierro y manganeso permanece en el agua a tratar. Teniendo en cuenta esto, se determinan las concentraciones de hierro y manganeso en el agua cruda del siguiente modo:

$$\text{Concentración de Fe en agua cruda } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) = \frac{0,3 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{0,1} = 3 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \quad (9)$$

$$\text{Concentración de Mn en agua cruda } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) = \frac{0,1 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{0,1} = 1 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \quad (10)$$

Para determinar los sólidos sedimentables constituidos por las formas insolubles de estos metales, se multiplica su concentración por la cantidad de sólidos formados, tomando un valor medio de 1,75 mg/L de sólidos sedimentables por cada mg/L de hierro o manganeso:

$$\text{Concentración de insolubles de Fe } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) = 3 \frac{\text{mgFe}}{\text{L}} \times 1,75 \frac{\text{mg} \text{ lodo/L}}{\text{mgFe/L}} = 5,25 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \quad (11)$$

$$\text{Concentración de insolubles de Mn } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) = 1 \frac{\text{mgMn}}{\text{L}} \times 1,75 \frac{\text{mg} \text{ lodo/L}}{\text{mgMn/L}} = 1,75 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \quad (12)$$

Por tanto, el agua de entrada a las tinas de sedimentación tiene una media de sólidos de hierro de 5,25 mg/L y una media de sólidos de manganeso de 1,75 mg/L, resultando un total de 7 mg/L de sólidos sedimentables de hierro y manganeso.

La concentración de sólidos en suspensión del agua entrante a la sedimentación será la suma de los sólidos de coagulante, de hierro y manganeso, y los presentes en el agua cruda:

$$\begin{aligned} \text{Concentración sólidos}_{\text{agua_entrada_sedimentador}} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) &= 13,2 \frac{\text{mg}}{\text{L}} + 13,5 \frac{\text{mg}}{\text{L}} + 7 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \\ &= 33,7 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cong 0,0337 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{aligned} \quad (13)$$

En cuanto a la concentración de sólidos en el lodo, los lodos originados en la sedimentación y el retrolavado de los filtros se consideran lodos poco concentrados. En concreto, se considerará que los fangos procedentes de la sedimentación contienen alrededor de 5 kg/m³ de materia seca [16].

Teniendo en cuenta que el caudal de agua de entrada a la potabilizadora es de 166.558 m³/d y suponiendo un rendimiento de eliminación de sólidos en las tinas de sedimentación del 75%, ya se puede calcular el caudal de fango sedimentado sustituyendo los valores en la Ecuación 8:

$$Q_{\text{fango_sedimentado}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right) = \frac{0,75 \times 0,0337 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 166.558 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 842 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \quad (14)$$

Las tinas de sedimentación se vacían y se lavan una vez a la semana para retirar los restos de lodos que se acumulan en el fondo, generándose un lodo adicional cuya concentración se supone igual a la de los fangos procedentes de la sedimentación (5 kg/m³) y cuyo caudal hay que determinar. Para ello, se sabe que se utilizan 110 m³ de agua en total en cada lavado de las tres tinas de sedimentación. Para evitar la parada completa de la planta potabilizadora, las tres tinas no se lavan al mismo tiempo, sino una después de otra, de forma que se tarda aproximadamente 1 hora para efectuar el lavado de cada tina. Esto implica que el caudal procedente del lavado de las tinas será:

$$Q_{\text{lavado_tinas}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right) = \frac{(110/3) \text{m}^3}{1 \text{h}} \times \frac{24 \text{h}}{1 \text{d}} = 880 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \quad (15)$$

A diferencia del caudal de fango sedimentado que es continuo, el caudal de fango procedente del lavado de las tinas únicamente se generará durante 3 horas a la semana.

Por último, queda por calcular el caudal de fango resultante del retrolavado de los filtros. El retrolavado se efectúa 15 veces al mes (cada 2 días), utilizándose un total de 757 m³ de agua cada vez que se lavan los 20 filtros de la planta. Para evitar la parada completa de la potabilizadora, los filtros no se lavan al mismo tiempo, sino uno después de otro, de forma que se tarda unos 15

minutos en efectuar el lavado de cada uno de ellos. Esto supone que se necesitan 5 horas para completar el retrolavado de todos los filtros. Teniendo en cuenta todo esto, el caudal de retrolavado vendrá dado por:

$$Q_{\text{retrolavado_filtros}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right) = \frac{(757/20) \text{ m}^3}{15 \text{ min}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} = 3.634 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \quad (16)$$

A diferencia del caudal de fango sedimentado que es continuo, el caudal de fango procedente del retrolavado de los filtros únicamente se generará durante 5 horas cada 2 días.

A continuación, se procede a calcular la concentración de sólidos del caudal de retrolavado. Para ello, como se ha supuesto un rendimiento de eliminación de sólidos en las tinajas de sedimentación del 75%, el 25% restante de los sólidos son los que entran a los filtros y su valor será:

$$\text{Sólidos}_{\text{entrada_filtros}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{d}} \right) = 0,25 \times 0,0337 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 166.558 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 1.403,25 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \quad (17)$$

Se supondrá que los sólidos se retienen por completo, es decir, se supondrá un rendimiento de filtración del 100%. Dado que cada filtro se lava cada 2 días, la masa de sólidos acumulada en cada filtro al cabo de 2 días será:

$$\text{Sólidos}_{\text{acumulados en cada filtro}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{filtro}} \right) = \frac{1.403,25 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \times 2 \text{ d}}{20 \text{ filtros}} = 140,325 \frac{\text{kg}}{\text{filtro}} \quad (18)$$

Suponiendo un lavado completo, la concentración de sólidos en el lodo procedente del retrolavado vendrá dada por:

$$\text{Concentración sólidos}_{\text{retrolavado_filtros}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{140,325 \text{ kg}}{(757/20) \text{ m}^3} = 3,74 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (19)$$

En la Tabla 13 se resumen las características de los tres caudales de lodo que hay que tratar en el espesador de fangos.

Tabla 13. Características de los lodos generados en la potabilizadora de Miraflores

Lodo	Caudal (m ³ /d)	Concentración (kg/m ³)	Observaciones
Sedimentación	842	5	Continuo
Lavado tinas sedimentación	880	5	3 horas/semana
Retrolavado filtros	3.634	3,74	5 horas cada 2 días

Fuente: Elaboración propia

Si se diseña el espesador de fangos para tratar la suma de los tres caudales de lodo (5.356 m³/d) se estará sobredimensionando en exceso, ya que la mayor parte del tiempo solo tratará un caudal de 842 m³/d correspondiente a los lodos de sedimentación. Por ello, se decide construir un espesador de fangos para tratar en continuo los lodos de sedimentación y una tina con capacidad para almacenar los 757 m³ de lodo generados en el retrolavado, la cual funcionará como espesador de fangos trabajando en discontinuo. Esta tina se vaciará antes de 2 días, para proceder a la nueva carga de lodo de retrolavado. El lavado de las tinas de sedimentación no se efectuará al mismo tiempo que el retrolavado de los filtros. De este modo, los 110 m³ de lodo generados en el lavado de las tinas de sedimentación se podrán llevar al espesador que trabaja en discontinuo en un día que no esté ocupado por los lodos de retrolavado.

- Concentración de sólidos en suspensión (X_{SST})

Este parámetro hace referencia a la concentración de sólidos en suspensión que entran al espesador. Los fangos mixtos suelen tener valores entre 0,5-2% en peso (5-20 kg/m³) [12].

Como puede verse en la Tabla 13, se ha considerado que la concentración de los lodos de sedimentación y del lavado de las tinas es de 5 kg/m³, y la concentración calculada para los lodos de retrolavado es de 3,7 kg/m³, siendo ambas del mismo orden de magnitud que los valores encontrados en bibliografía indicados anteriormente. Esta última concentración podría verse incrementada debido a que, al efectuar el retrolavado, se pueden arrastrar partículas de antracita y arenas de los filtros.

- Número de espesadores

Es recomendable el uso de 2 espesadores pequeños-medianos en lugar de uno muy grande por varias razones. Primero, es posible ajustarse mejor a las variaciones de carga, sobre todo en épocas lluviosas. Segundo, si un espesador falla o requiere mantenimiento, el otro puede seguir operando reduciendo el tiempo de inactividad. Por último, aunque un espesador grande podría tener un costo inicial menor, los costos operativos y de mantenimiento pueden ser más altos a largo plazo debido a la complejidad y tamaño del equipo.

Sin embargo, debido a que el caudal de fango a tratar en continuo en la potabilizadora de Miraflores no es muy grande y el espacio disponible en planta es reducido, se utilizará solamente un espesador dinámico para trata dicho fango.

4.3. Producción de energía con paneles solares

Las plantas de tratamiento de agua potable y aguas residuales consumen mucha energía, representando hasta el 35% del uso de la energía municipal [2]. Una reducción de la energía de red utilizada puede ayudar a disminuir costos y aumentar la sostenibilidad de este tipo de plantas, y el uso de paneles solares puede ayudar a alcanzar ambos objetivos.

El clima tropical de Panamá favorece el uso de fuentes de energía alternativas como paneles solares o módulos fotovoltaicos. Esto se demuestra en la Figura 25, donde se observa que en la ciudad de Panamá el potencial eléctrico fotovoltaico presenta un valor de 4 kWh/kWp. Esto implica que un sistema fotovoltaico con una capacidad de 1 kWp será capaz de generar en promedio 4 kWh al día; o lo que es lo mismo, por cada kilovatio pico de capacidad instalada, el sistema puede generar aproximadamente 4 kWh de electricidad al día. Este valor se considera bueno, ya que permitirá a los módulos funcionar de manera eficiente.

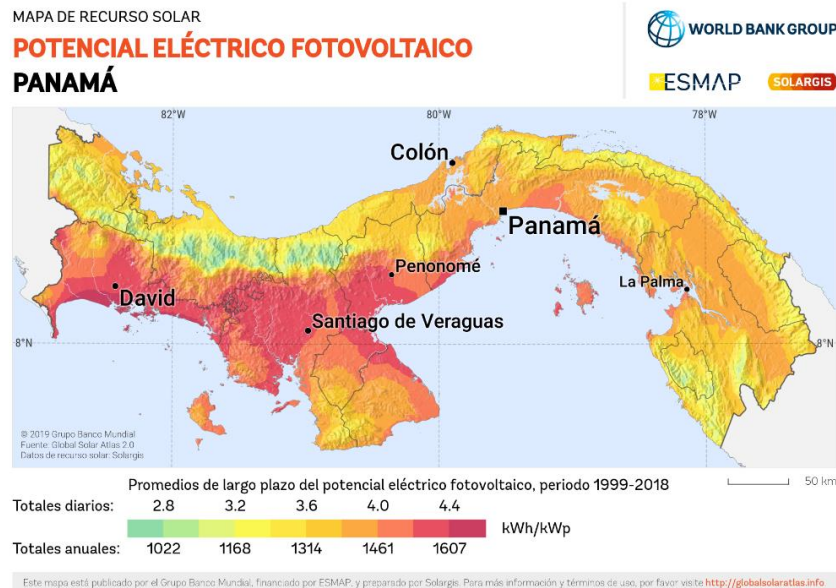


Figura 25. Potencial eléctrico fotovoltaico

Fuente: © 2017 The World Bank, Solar resource data: Solargis [17]

4.3.1. Fundamentos

Los paneles solares fotovoltaicos son dispositivos electrónicos que convierten la radiación solar en electricidad. Están hechos de un material semiconductor, usualmente silicio o cadmio. Funcionan de manera que, al incidir la luz solar sobre los paneles, los fotones de la misma excitan los electrones del material semiconductor logrando crear un flujo de corriente eléctrica, llamada corriente directa (DC). Posteriormente, para poder utilizar la corriente en la planta, es necesario utilizar un inversor para convertir la corriente directa (DC) en corriente alterna (AC) ya que es el tipo de corriente utilizada en la red eléctrica. Se utiliza un cableado con un grosor o calibre específico para transportar la corriente. La corriente alterna se dirige a un cuadro de baja tensión (CBT), el cual se encarga de distribuir la energía generada hacia los diferentes equipos de la instalación.

En algunos casos, se utiliza un transformador para ajustar el voltaje de salida del inversor y asegurarse de que este coincida con los requisitos del sistema eléctrico del edificio. Este se ubica a la salida del cuadro de baja tensión.

4.3.2. Parámetros de diseño

Para el dimensionamiento de los paneles solares en la planta potabilizadora, se utilizarán los techos existentes en las instalaciones para su implementación. Se ha optado por esta opción debido a la falta de un espacio considerable para la instalación en tierra y debido a que la tala de árboles no es una práctica sostenible. Además, el área forma parte de la cuenca del Canal de Panamá, la cual es un área protegida, por lo que esta práctica no está permitida.

Para implementar paneles solares en la potabilizadora, se determinarán los siguientes parámetros: espacio disponible (m^2), módulos a instalar por techo, potencia disponible en cada techo (kW) y demanda a cubrir (kWh/año).

- Espacio disponible







La planta potabilizadora cuenta con seis superficies disponibles para la instalación de paneles solares, las cuales se observan bordeadas en amarillo en la Figura 26.



Figura 26. Techos existentes en la potabilizadora de Miraflores para la implementación de paneles solares

Para determinar cuántos paneles pueden instalarse en cada techo, se ha medido el área fotovoltaica disponible en cada una de ellas. Para ello, se mide el área total del techo y se resta el espacio necesario para el mantenimiento y separación entre filas de paneles, áreas afectadas por sombras y el espacio ocupado por obstáculos o debido a la geometría del techo. El área total de cada techo se ha medido con el programa Google Earth y, en este caso, se considera que solo el 70% de la superficie de cada uno será utilizado por los paneles solares debido a la geometría y sombras ocasionadas por árboles. En la Tabla 14 se observan las áreas para cada techo y se determina el área fotovoltaica de cada uno. Como puede observarse, se cuenta con un área fotovoltaica total de 2.463 m².

Tabla 14. Área total y fotovoltaica de cada techo de la potabilizadora de Miraflores

Techo		Área total	Área fotovoltaica
Techo 1		1.772 m ²	1.772 m ² x 0,7 = 1.240,4 m ²
Techo 2		273 m ²	273 m ² x 0,7 = 191,1 m ²
Techo 3		823 m ²	823 m ² x 0,7 = 576 m ²
Techo 4		197 m ²	197 m ² x 0,7 = 137,9 m ²
Techo 5		151 m ²	151 m ² x 0,7 = 105,7 m ²
Techo 6		303 m ²	303 m ² x 0,7 = 212,1 m ²
TOTAL		3.519 m²	2.463 m²

Fuente: Elaboración propia

- Módulos a instalar por techo

Para determinar cuántos módulos se pueden instalar por techo, se necesita saber el tamaño que ocupa cada panel.

Para este proyecto se han escogido los módulos fotovoltaicos JKM-615N-66HL4M-BDV de Jinkosolar ya que se comercializan en Panamá lo cual facilita la implementación de los mismos. Estos módulos tienen un tamaño de panel de 2,46 m x 1,13 m, por lo que su área es de 2,78 m²/módulo.

Por tanto, los módulos a instalar por techo se determinan de la siguiente forma:

$$\text{Módulos}_{\text{techo}} = \frac{\text{Área del techo (m}^2\text{)}}{\text{Área del panel (m}^2\text{)}} \quad (20)$$

En la Tabla 15 se muestran los módulos que se pueden instalar por techo en la potabilizadora, que como puede verse son un total de 887.

Tabla 15. Módulos a instalar por techo

Techo	Módulos por techo	Cantidad
Techo 1	$\text{Módulos}_{\text{techo}_1} = \frac{1.240,4 \text{ m}^2}{2,78 \text{ m}^2}$	447 módulos
Techo 2	$\text{Módulos}_{\text{techo}_2} = \frac{191,1 \text{ m}^2}{2,78 \text{ m}^2}$	69 módulos
Techo 3	$\text{Módulos}_{\text{techo}_3} = \frac{576 \text{ m}^2}{2,78 \text{ m}^2}$	207 módulos
Techo 4	$\text{Módulos}_{\text{techo}_4} = \frac{137,9 \text{ m}^2}{2,78 \text{ m}^2}$	50 módulos
Techo 5	$\text{Módulos}_{\text{techo}_5} = \frac{105,7 \text{ m}^2}{2,78 \text{ m}^2}$	38 módulos
Techo 6	$\text{Módulos}_{\text{techo}_6} = \frac{212,1 \text{ m}^2}{2,78 \text{ m}^2}$	76 módulos
TOTAL		887 módulos

Fuente: Elaboración propia

- Potencia disponible en cada techo

Para determinar cuánta potencia hay en cada techo, se necesita definir la potencia nominal de los paneles a utilizar. Se fija una potencia nominal de 615 Wp, por lo que la potencia se determina de la siguiente forma:

$$Pot_{disp_{techo}} = Módulos_{techo} \times Potencia_{nominal}(Wp) \quad (21)$$

En la Tabla 16 se muestra la potencia disponible en cada techo de la potabilizadora, obteniéndose un total de 545,51 kWp.

Tabla 16. Potencia disponible en cada techo

Techo	Potencia por techo (Wp)	Potencia (kWp)
Techo 1	$Pot_{disp_{techo_1}} = 447 \times 615 \text{ Wp}$	274.905 Wp = 274,91 kWp
Techo 2	$Pot_{disp_{techo_2}} = 69 \times 615 \text{ Wp}$	42.435 Wp = 42,44 kWp
Techo 3	$Pot_{disp_{techo_3}} = 207 \times 615 \text{ Wp}$	127.305 Wp = 127,31 kWp
Techo 4	$Pot_{disp_{techo_4}} = 50 \times 615 \text{ Wp}$	30.750 Wp = 30,75 kWp
Techo 5	$Pot_{disp_{techo_5}} = 38 \times 615 \text{ Wp}$	23.370 Wp = 23,37 kWp
Techo 6	$Pot_{disp_{techo_6}} = 76 \times 615 \text{ Wp}$	46.740 Wp = 46,74 kWp
TOTAL		545,51 kWp

Fuente: Elaboración propia

- Demanda a cubrir

Los paneles solares pueden cubrir total o parcialmente la demanda energética de la potabilizadora. Actualmente la planta tiene una demanda energética mensual de 2.614 kWh/mes y una demanda anual de aproximadamente 31.368 kWh/año.

Sin embargo, los paneles solares se quieren diseñar para el funcionamiento de la potabilizadora incluyendo los nuevos equipos implementados, siendo estos el generador de ozono y el espesador de fangos.

En cuanto al proceso de espesamiento de fangos, este consume una media de 605 kWh/MG [2] que equivale a 0,1598 kWh/m³. Por tanto, para determinar el consumo energético del espesador de fangos, se realiza el producto de los kWh/m³ consumidos por el espesador por el caudal de fango que ingresa a este equipo que es de 842 m³/d. De este modo, el consumo energético diario del espesador será de 134,55 kWh/d; y teniendo en cuenta que funcionará los 30 días del mes, su consumo mensual asciende a 4.036,55 kWh/mes y su consumo anual es de aproximadamente 48.440 kWh/año.

El generador de ozono escogido consume 1.998,75 kWh/d, como se especifica en el apartado 5.1.1. *Elección e integración del generador de ozono en la planta*, siendo el consumo mensual de 59.962,5 kWh/mes y el anual de aproximadamente 719.550 kWh/año.

Además de los consumos por los equipos, se adicionará el consumo de las bombas a utilizar (un total de 5), siendo este de 15.495 kWh/año. En la Tabla 32 del *apartado 8. Estudio económico* se indica el consumo individual por bomba.

El consumo anual nuevo de la planta se determina sumando el consumo anual actual más el consumo anual del espesador de fangos, del generador de ozono y de las bombas adicionales, resultando en 814.853 kWh/año.

En el *apartado 5.3. Dimensionamiento de los paneles solares* se determina la energía anual producida por los paneles solares, lo que permitirá calcular el porcentaje de energía cubierto.

5. DISEÑO DE LOS EQUIPOS

5.1. Diseño del generador de ozono

El sistema de ozonización que se implementará en la potabilizadora de Miraflores constará de los siguientes elementos: un generador de ozono de tubo vertical con oxígeno líquido como fuente de alimentación a una temperatura inferior a 33 °C; un vaporizador eléctrico, el cual permite un control preciso de la temperatura y flujo de gas vaporizado; y un sistema de refrigeración de circuito cerrado con enfriadores con una media de flujo de 2.500 L/kg ozono.

Los parámetros a definir son los siguientes:

- Dosis de ozono necesaria (mg/L).
- Capacidad de generación de ozono (kg/d).
- Concentración de ozono (% en volumen) en el gas de alimentación.
- Energía específica (kWh/kg O₃).
- Oxígeno líquido requerido (m³/d).
- Energía total consumida (kWh/d).

- Dosis de ozono necesaria

Para aguas crudas con baja carga de contaminantes, es decir, de buena calidad, se recomienda una concentración de ozono de 1,6 -2 mg/L según la EPA "Environmental Protection Agency" para lograr los objetivos de tratamiento [18]. Se ha comprobado anteriormente que la cantidad de materia orgánica en el agua cruda de la potabilizadora de Miraflores es baja, mientras que la carga microbiana se encuentra en valores medios-altos. Por otro lado, según los parámetros medidos del agua cruda, esta no cuenta con contaminantes específicos, y el pH y la temperatura son adecuados para tratarla con ozono. Debido a esto se fija una dosis de ozono de 1,6 mg/L.

- Capacidad de generación de ozono

Para calcular la cantidad total de ozono requerida, se hace el producto de la dosis de ozono y la cantidad de agua a tratar, tal como se indica en la siguiente ecuación:

$$\text{Ozono requerido} \left(\frac{\text{kg}}{\text{d}} \right) = \text{Dosis de ozono} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \times \text{Caudal de agua} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right) \quad (22)$$

Teniendo en cuenta que al día en la potabilizadora se tratan 166.558 m³/d de agua cruda y se utilizará una dosis de ozono de 1,6 mg/L, se sustituyen estos datos en la Ecuación 22:

$$\text{Ozono requerido } \left(\frac{\text{kg}}{\text{d}}\right) = 1,6 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 166.558 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times 1000 \frac{\text{L}}{\text{m}^3} \times \frac{1\text{g}}{1000 \text{ mg}} \times \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} = 266,5 \frac{\text{kgO}_3}{\text{d}} \quad (23)$$

Así pues, la cantidad de ozono que hay que generar son 366,5 kg/d.

- Concentración de ozono en el gas de alimentación

Un mayor porcentaje de ozono requiere un menor flujo de gas de alimentación. Como la calidad del agua cruda es buena, se considera que no es necesaria una concentración de ozono muy elevada para alcanzar los objetivos de desinfección y oxidación, ya que esto aumentaría el consumo energético innecesariamente. Por tanto, se fija una concentración de ozono en el gas de alimentación del 8% en volumen.

- Energía específica y oxígeno líquido necesarios

La energía específica indica la cantidad de energía que se requiere para generar una cantidad determinada de ozono. Sabiendo que se utilizará oxígeno líquido como gas de alimentación, la energía específica necesaria está en el rango de 3,5–5,5 kWh/lbO₃ ó 7,7-12 kWh/kgO₃. En el gráfico de la Figura 27 se muestra la energía específica y el oxígeno líquido requeridos para obtener distintas concentraciones de ozono en el gas ozonizado.

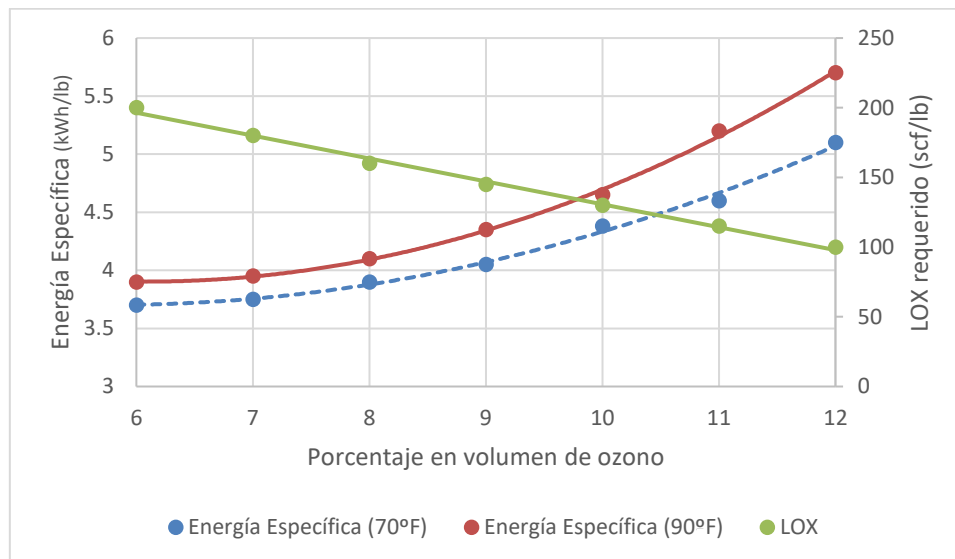


Figura 27. Energía específica y oxígeno líquido (LOX) requeridos según el porcentaje de ozono deseado en el gas de alimentación

Fuente: *Water Treatment Plant Design (5th ed.) American Water Works Association (AWWA) [2]*

De acuerdo con la Figura 27, para el porcentaje en volumen de ozono fijado del 8%, se requiere una energía específica de 4,2 kWh/lbO₃ que es equivalente a 9,24 kWh/kgO₃. Este valor se ha obtenido utilizando la curva de 90 °F (32 °C) ya que corresponde aproximadamente a la temperatura a la que se lleva a cabo el proceso.

En cuanto al oxígeno líquido necesario para generar dicha concentración de ozono, se requiere una cantidad de 160 scf/lbO₃, lo que equivale a 10 m³/kgO₃. Esto implica que se requieren 10 m³ de oxígeno líquido para producir 1 kg de ozono.

Como se requieren 266,5 kgO₃/d, la cantidad de oxígeno líquido (LOX) requerido se determina de acuerdo con el siguiente cálculo:

$$Q_{\text{LOX}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right) = 266,5 \frac{\text{kg O}_3}{\text{d}} \times 10 \frac{\text{m}^3 \text{O}_2}{\text{kg O}_3} = 2.665 \frac{\text{m}^3 \text{O}_2}{\text{d}} \quad (24)$$

- Energía total consumida

La energía total consumida se calcula del siguiente modo:

$$\text{Energía total} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{d}} \right) = \text{Ozono requerido} \left(\frac{\text{kg O}_3}{\text{d}} \right) \times \text{Energía específica} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{kgO}_3} \right) \quad (25)$$

Sustituyendo por los valores determinados anteriormente se tiene:

$$\text{Energía total} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{d}} \right) = 266,5 \frac{\text{kgO}_3}{\text{d}} \times 9,24 \frac{\text{kWh}}{\text{kgO}_3} = 2.462 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \quad (26)$$

Por lo tanto, el generador de ozono consumirá aproximadamente 2.462 kWh de energía por día para producir 266,5 kg de ozono diarios con un porcentaje en volumen del 8%.

En resumen, se necesitan 2.665 m³/d de oxígeno líquido para producir 266,5 kg O₃/d y la cantidad de energía consumida es de aproximadamente 2.462 kWh/d.

5.1.1 Elección e integración del generador de ozono en la planta

Se ha analizado la distribución en planta de la potabilizadora de Miraflores con el objetivo de integrar el generador de ozono de una manera eficiente y viable. En el apartado 4.1.5.1 *Parámetros del equipo* se han detallado las partes y equipos con los que debe contar un generador de ozono para su correcto funcionamiento; sin embargo, la adaptación del generador de ozono a la potabilizadora ha resultado

en la eliminación de ciertos equipos debido a la misma funcionalidad que tienen otras instalaciones ya existentes en la planta.

Se ha llegado a la conclusión que el ozono generado se introducirá en la etapa de aireación, la cual realiza la misma función que un contactor. Al introducir el ozono generado en la tina de aireación, se garantiza una disolución efectiva de este debido a los aireadores de aspersión los cuales aumentan la superficie de contacto entre el agua y el ozono. Además, al ocurrir este proceso al aire libre, no es necesario un destructor de ozono ya que en caso de que exista una concentración de ozono remanente en el agua, este se dispersará y diluirá en la atmósfera en concentraciones muy bajas. En la etapa de aireación, el agua a tratar permanece un tiempo promedio de 15 minutos, considerando adecuado este tiempo de contacto para la disolución del ozono en el agua debido a las características estudiadas.

- Elección del generador de ozono

Se utilizará el generador de ozono industrial GRV-13EP, el cual se ha mostrado en la Figura 22. Este equipo tiene las siguientes características:

- ✓ Capacidad de producción: 312 kgO₃/d = 13 kgO₃/h.
- ✓ Concentración de ozono generada: 6,99-9,33% en volumen.
- ✓ Flujo de oxígeno líquido requerido: 1.048 m³O₂/d a 2 bar, 15-25 °C y 95-99% de pureza.
- ✓ Energía consumida: 97,5 kW.
- ✓ Refrigerante utilizado: agua de ósmosis + glicol 31,2 m³/h.
- ✓ Dimensiones del generador de ozono: 4,1m x 1m.
- ✓ Dimensiones de la fuente de alimentación: 3,6m x 0,8m.
- ✓ Suministro de energía: 380-460V, trifásico, 50-60Hz.
- ✓ Condiciones de trabajo: humedad < 85%, temperatura 5-35 °C.
- ✓ Material: acero inoxidable 316L, juntas de Viton y teflón.

El generador incluye los siguientes equipos:

- ✓ Sistema de generación de ozono con dieléctricos de borosilicato enfriados con glicol.
- ✓ Control mediante pantalla táctil SIEMENS, gestor de alarmas y mantenimiento, regulación de potencia y caudal mediante PID.
- ✓ Sensor de caudal, presión y temperatura del gas de ozono resultante.
- ✓ Sensor de caudal y temperatura del flujo de refrigeración.
- ✓ Concentrador de oxígeno.
- ✓ Válvula motorizada de entrada de oxígeno, válvula proporcional para ajuste automático de flujo, válvula motorizada de salida de ozono y reductor manual con filtro de entrada.

Una capacidad de producción de ozono ligeramente superior a la necesaria permitirá afrontar mejor los posibles desastres naturales. El generador de ozono seleccionado cuenta con una capacidad adicional de generación de 45,5 kgO₃/d; sin embargo, para no aumentar los costes

operativos, solo se utilizará la demanda requerida en condiciones operativas normales. El difusor de oxígeno líquido (LOX) y refrigerante no están incluidos, por lo que se incluirán aparte.

Para determinar el tiempo en el que el generador tiene que estar en funcionamiento, se dividirá la demanda total diaria (266,5 kgO₃/d) entre la capacidad de producción del generador (13 kgO₃/h) dando como resultado 20,5 horas. Por tanto, el generador de ozono tendrá que estar en funcionamiento aproximadamente 20 horas y 30 minutos al día para cumplir con la demanda requerida.

Debido a que el generador seleccionado consume 97,5 kW, la demanda energética diaria será el producto de la energía consumida y las horas de operación, en este caso 20,5 horas, dando como resultado 1.998,75 kWh/d.

- Transporte del ozono a la tina de aireación

Para la difusión del ozono generado a la tina de aireación se utilizarán los siguientes equipos:

- ✓ Tuberías.
- ✓ *Manifold* o colector con tres salidas para distribución de flujo.
- ✓ Inyectores Venturi.

El generador de ozono se ubicará antes de la tina de aireación. De esta manera, el ozono producido será transportado a través de una tubería de acero inoxidable hacia un *manifold* o colector de tres salidas, que lo distribuirá a través de tres tuberías de acero inoxidable hacia tres inyectores Venturi ubicados estratégicamente a lo largo de la tina de aireación: uno en cada extremo y otro en el centro, asegurando una distribución homogénea del ozono en el agua.

Se utilizan inyectores Venturi como difusores ya que, a diferencia de los difusores de burbujas finas, pueden funcionar directamente en la línea de flujo facilitando la operación. Además, permiten una transferencia eficiente con un bajo coste operativo y de mantenimiento, comparados con otros sistemas de difusión.

5.1.2 Precauciones a tener en cuenta

Al utilizar ozono en lugar de cloro como desinfectante y oxidante, se reducen transportes por carretera y almacenamiento de compuestos tóxicos, como es el caso del cloro. Sin embargo, con el ozono hay que tener ciertas precauciones ya que también es un gas tóxico y, si se inhala incluso en concentraciones muy pequeñas, puede poner en riesgo la salud de las personas.

Es necesario contar con medidores de concentración de ozono disuelto en el agua y sensores de ozono ambientales para el aire atmosférico para determinar las concentraciones residuales en ambos escenarios.

Los medidores de concentración de ozono disuelto permiten optimizar la dosis de ozono añadida al agua y aseguran la efectividad del tratamiento. En cuanto a los sensores de ozono para el aire, estos

garantizan la salud de los operarios y, en caso de que hubiera un fallo en el sistema de dosificación del ozono, logran identificarlo de una manera más rápida y segura.

Si se detecta una concentración residual alta de ozono en ambos sensores, esto es indicativo de que se debe disminuir la dosis de ozono y la zona no es apta para los operarios sin los equipos de protección adecuados. Por contra, si se detecta una concentración residual baja de ozono en ambos sensores, esto puede indicar que la dosis utilizada es insuficiente para cubrir la demanda de oxidantes y lograr la desinfección del agua cruda. Se debe ajustar la dosis de ozono hasta conseguir una concentración residual adecuada de ozono en el agua y en el aire que cumpla con los límites permitidos.

La EPA estadounidense (Environmental Protection Agency) fija en la norma nacional de calidad del aire ambiental de 2015 una concentración máxima de 0,07 ppm de ozono en el aire para proteger la salud pública y ambiental. Según la OMS (Organización Mundial de la Salud), se recomienda una concentración no mayor de 0,05 ppm para un periodo de exposición de 8 horas, 0,12 ppm para 1 hora de exposición y 0,2 ppm para periodos inferiores a 2 horas. Además, la normativa emitida por la OMS recomienda una concentración residual de ozono en el agua que no supere 0,2 ppm.

En la potabilizadora de Miraflores se utilizarán 2 sensores para medir la concentración de ozono en el aire a lo largo de la tina de aireación. El primero se ubicará al inicio de la tina, el cual se espera que marque concentraciones muy bajas, lo cual indicará una correcta difusión del ozono en el agua a tratar. El segundo se ubicará al final de la tina de aireación para asegurar que la concentración de ozono en el aire está por debajo de lo permitido. La alarma de estos sensores se activará cuando detecten niveles de concentración de 0,1 ppm y si la concentración llega a 0,3 ppm estarán configurados para apagar el sistema de ozono.

Para medir la concentración de ozono residual en el agua, se utilizarán otros 2 sensores. El primero, se ubicará en la mitad de la tina para evaluar si el ozono está alcanzando las concentraciones adecuadas. En caso de que se detecte una concentración muy alta o muy baja, se puede ajustar la dosificación logrando corregir la concentración de ozono en el agua antes de que llegue a la parte final de la tina. El segundo se ubicará al final de esta para asegurar que se cumplen los límites máximos permitidos de ozono en el agua.

A continuación, se describen las características de los sensores escogidos:

- Sensor de concentración de ozono en agua

Se utilizará el sensor amperométrico de ozono 9185sc de la marca HACH mostrado en la Figura 28. Este sensor está libre de interferencias de oxidantes como bromo, cloraminas, cloro, dióxido de cloro y peróxido de hidrógeno, al igual que del pH y agua de baja conductividad. Sus características son las siguientes:

- ✓ Rango de medición: 0-2 ppm.
- ✓ Límite mínimo de detección: 0,005 ppm.
- ✓ Tiempo de respuesta: 90 segundos.
- ✓ Intervalo de medida: continuo.
- ✓ Vida útil: aproximadamente 2 años.

- ✓ Mantenimiento de la celda de medición: cada 6 meses.
- ✓ Rango de temperatura de funcionamiento: 0-45 °C.
- ✓ Humedad de trabajo: 0-90% HR.

El sensor incluye lo necesario para conectarse directamente al sistema SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) existente en la planta, facilitando así su integración al proceso de monitoreo y control de la planta.

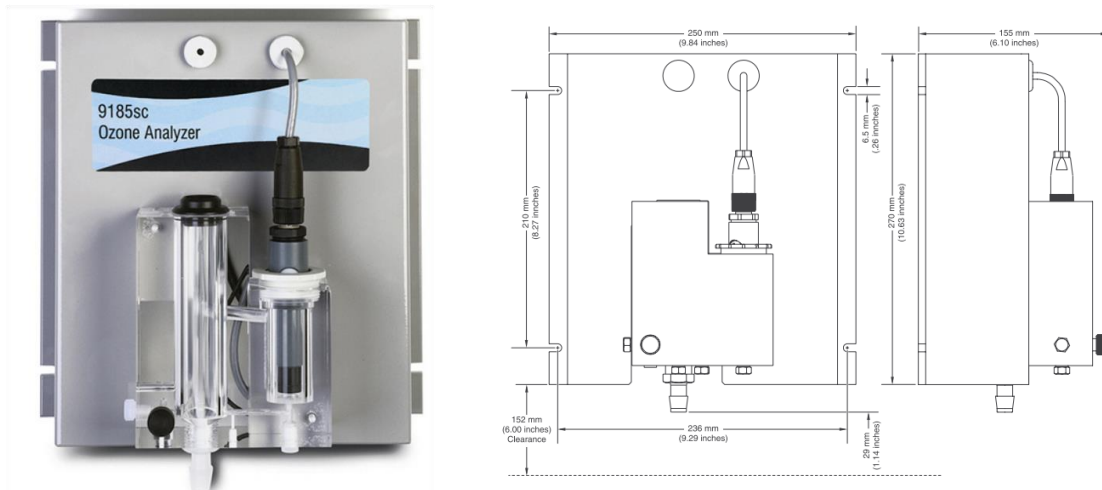


Figura 28. Sensor de medición de concentración de ozono en el agua

Fuente: HACH [19]

La concentración de ozono disuelto en el agua será el producto de la concentración de ozono generada por la eficiencia de transferencia. En este caso se asume una eficiencia de transferencia del 95% ya que la aireación aumenta significativamente la superficie de contacto entre el agua y el ozono, lo que facilita la mezcla y disolución del ozono en el agua. Por tanto, la concentración de ozono disuelto en el agua será:

$$\text{Concentración } O_3 \text{ disuelto} = 1,6 \frac{mg}{L} \times 0,95 = 1,52 \frac{mg}{L} \quad (27)$$

Para determinar la concentración que debe marcar el sensor en la parte intermedia de la tina, se asume que para el momento que llegue el ozono a esta área, habrá pasado la mitad del tiempo de contacto definido por lo que la concentración de ozono disminuirá un 50%, siendo:

$$\text{Concentración } O_3 \text{ intermedia} = 1,52 \frac{mg}{L} \times (1 - 0,5) = 0,76 \frac{mg}{L} \quad (28)$$

La concentración final, asumiendo que se consume un 98% de ozono, será:

$$\text{Concentración } O_3 \text{ final} = 1,52 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times (1 - 0,98) = 0,03 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \quad (29)$$

Si en el sensor se observan concentraciones de ozono superiores a 0,76 ppm en el punto intermedio de la tina de aireación, esto indica que puede haber una dosis excesiva de ozono o que hay baja demanda oxidativa en el agua. En tal caso, será necesario disminuir la dosis de ozono para evitar que la concentración final de ozono en el agua sea superior a la permitida. En cambio, si se observan concentraciones inferiores a 0,76 ppm, esto es indicativo de que hay más carga de materia orgánica y contaminantes, por lo que el ozono se está consumiendo más rápido, necesitando aumentar la dosis de ozono. Esto suele ocurrir cuando hay desastres naturales.

Si en el sensor se observan concentraciones finales mayores a 0,2 ppm, lo cual es poco probable pero posible, la solución sería disminuir la dosis de ozono hasta que la concentración final baje a 0,2 ppm o menos.

- Sensor para medir concentración de ozono en el aire

Se utilizará el sensor de ozono de la marca Prana Air mostrado en la Figura 29, el cual tiene las siguientes características:

- ✓ Rango de medición: 0-50 ppm.
- ✓ Límite mínimo de detección: 0,005 ppm.
- ✓ Tiempo de respuesta: menor de 15 segundos.
- ✓ Vida útil: aproximadamente 10 años.
- ✓ Rango de temperatura de funcionamiento: 30-50 °C.
- ✓ Humedad de trabajo: 0-100% HR.

Este sensor estará conectado al sistema SCADA existente en la planta mediante un microcontrolador USB y una placa digital, incluidos con el sensor.



Figura 29. Sensor de medición de concentración de ozono en el aire

Fuente: Prana air [20]

5.2. Diseño del espesador de fangos

Como se ha visto en el apartado 4.2.2. *Parámetros de diseño*, se utilizará un espesador de fangos que trabajará de forma continua para tratar los lodos de la tina de sedimentación y para los lodos procedentes del retrolavado de filtros y del lavado de la tina de sedimentación, se utilizará un tanque de hormigón con capacidad para 757m^3 de fango que operará de manera discontinua y sin que coincidan ambos lodos en el tanque.

Los lodos procedentes del retrolavado de los filtros y del lavado de las tinis de sedimentación son más difíciles de sedimentar debido a su baja densidad. Se ha considerado el uso de un tanque de hormigón con fondo cónico ya que facilita la extracción y minimiza las áreas donde los sólidos puedan acumularse; sin embargo, debido al elevado volumen de lodo a tratar, se opta por un tanque rectangular con fondo inclinado ya que este permite un diseño más flexible en cuanto a volumen y dimensiones.

- Dimensionamiento del espesador y del tanque de hormigón

Para el diseño del espesador se ha utilizado el laboratorio virtual de simulación 'Espesador por gravedad' [21]. En la Figura 30 se muestran los parámetros de diseño y los resultados obtenidos.

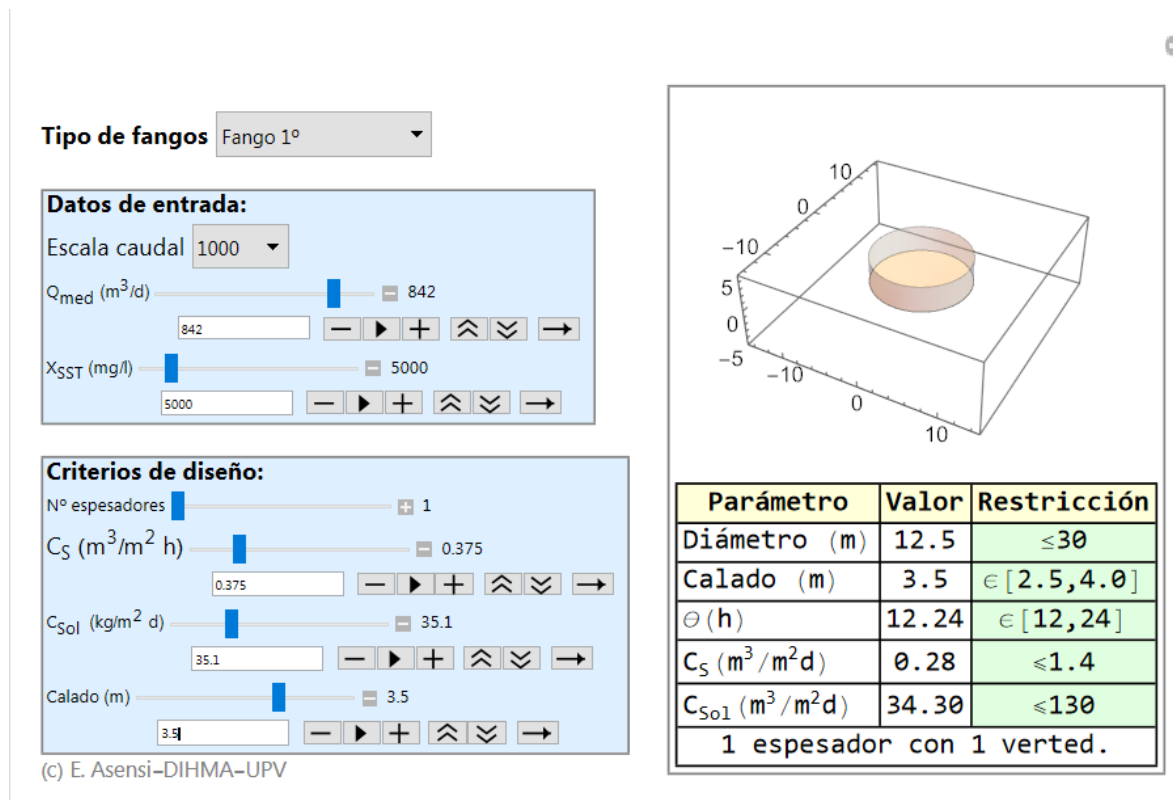


Figura 30. Diseño del espesador mediante simulador

Los parámetros de diseño introducidos en el simulador son los siguientes:

- ✓ Caudal medio ($m^3/día$): se ha determinado previamente en el apartado correspondiente a los parámetros de diseño del espesador de fangos, siendo el caudal a tratar de $842 m^3/d$.
- ✓ Concentración de sólidos en suspensión (X_{sst} , mg/L): la concentración de sólidos en suspensión en los lodos tras la sedimentación es de $5.000 mg/L$.
- ✓ Nº espesadores: 1 espesador.
- ✓ Carga superficial (m^3/m^2h): se define un valor medio de $9 m^3/m^2d$ que, expresado en horas, equivale a $0,375 m^3/m^2h$. Un valor inferior aumenta el diámetro del espesador y un valor superior no aporta ningún cambio.
- ✓ Carga de sólidos (kg/m^2d): se define un valor medio de $35,1 kg/m^2d$.
- ✓ Calado (m): se define un valor medio de $3,5 m$. Un valor más alto aumenta el tiempo de retención innecesariamente y un valor inferior no permite llevar a cabo la simulación.

Como puede verse en la Figura 30, en el resultado de la simulación se obtiene un espesador con un diámetro de $12,5 m$ y un tiempo de retención de $12,24$ horas.

En cuanto al diseño del tanque de hormigón para los lodos del lavado de las tinas de sedimentación y los del retrolavado de los filtros, las dimensiones del tanque rectangular con fondo inclinado se determinan del siguiente modo:

$$V(m^3) = L(m) \times A(m) \times H(m) \quad (30)$$

donde V es el volumen del tanque, y L , A y H son su longitud, anchura y altura, respectivamente.

El volumen máximo de lodo que ha de albergar el tanque es el correspondiente a los lodos del retrolavado de los filtros, es decir, $757 m^3$. Por seguridad, se sobredimensionará un 10% , por lo que el volumen del tanque será de $832,7 m^3$.

Se hace una aproximación asumiendo que la longitud del tanque será el doble de su ancho y tendrá una profundidad de 5 metros, por lo que sustituyendo en la Ecuación 30 se tiene:

$$832,7m^3 = 2A \times A \times 5m \quad (31)$$

Despejando el ancho A :

$$A = \sqrt{\frac{832,7m^3}{10}} = 9,1 m \quad (32)$$

Por lo que la longitud L será:

$$L = 2 * 9,1m = 18,2 m \quad (33)$$

Por tanto, el tanque tendrá unas dimensiones de 18,2m x 9,1m x 5m.

Para determinar la altura de inclinación, que reflejará el volumen útil disponible para la sedimentación, se realiza el siguiente cálculo:

$$H_{\text{inclinación}}(\text{m}) = H(\text{m}) \times \cos(\theta) \quad (34)$$

Para una sedimentación adecuada y dirigir los lodos hacia el centro del tanque se suelen utilizar ángulos de 30° y 45°. Se decide utilizar un ángulo de 30° ya que los lodos tendrán un mayor tiempo para asentarse debido a la menor inclinación, obteniéndose la altura de inclinación:

$$H_{\text{inclinación}}(\text{m}) = 5\text{m} \times \cos(30^\circ) = 4,33 \text{ m} \quad (35)$$

- Cálculo del caudal y concentración del fango de salida

A la salida del espesador, la concentración del fango aumenta y su caudal disminuye. El espesador tendrá un caudal y concentración de fango a la salida relativamente constante mientras que, en el tanque de hormigón, el caudal y concentración de salida variarán dependiendo de la procedencia de los lodos a tratar (lavado de tinajas de sedimentación o retrolavado de filtros).

Una vez espesados los lodos, estos se transportarán a un tanque rectangular de hormigón donde se almacenarán temporalmente para su recogida.

Para el cálculo de caudales y concentraciones a la salida del espesador, se tendrá en cuenta el siguiente balance de materia:

$$Q_e * C_e = Q_s * C_s + Q_w * C_w \quad (36)$$

donde:

Q_e : Caudal de entrada (m^3/d).

C_e : Concentración de sólidos en la entrada (kg/m^3).

Q_s : Caudal de salida de fangos espesados (m^3/d).

C_s : Concentración de sólidos en la salida como fangos espesados (kg/m^3).

Q_w : Caudal de agua clarificada (m^3/d).

C_w : Concentración de sólidos en el agua clarificada (kg/m^3).

Para determinar el caudal de salida de fangos espesados, se asume un aumento de la concentración del lodo al pasar por el espesador de 5 veces la inicial; es decir, la concentración en

sólidos del lodo espesado será cinco veces superior a la concentración del caudal del lodo a la entrada del espesador. Por tanto:

$$C_s = C_e \times 5 = 5 \frac{kg}{m^3} \times 5 = 25 \frac{kg}{m^3} \quad (37)$$

Teniendo en cuenta la concentración del fango espesado y asumiendo que el espesador tiene una eficiencia del 95%, se obtiene el caudal de salida del espesador del siguiente modo:

$$Q_s \left(\frac{m^3}{d} \right) = \frac{Q_e \left(\frac{m^3}{d} \right) \times C_e \left(\frac{kg}{m^3} \right) \times \eta}{C_s \left(\frac{kg}{m^3} \right)} = \frac{842 \frac{m^3}{d} \times 5 \frac{kg}{m^3} \times 0,95}{25 \frac{m^3}{d}} = 160 \frac{m^3}{d} \quad (38)$$

Se utilizará el mismo procedimiento para determinar de manera aproximada el caudal y concentración de salida del tanque de hormigón para cada lodo entrante, considerando el mismo tiempo de retención determinado para el espesador. Así, para los lodos del retrolavado de los filtros se tendrá:

$$C_s = C_e \times 5 = 3,74 \frac{kg}{m^3} \times 5 = 18,7 \frac{kg}{m^3} \quad (39)$$

$$Q_s \left(\frac{m^3}{d} \right) = \frac{Q_e \left(\frac{m^3}{d} \right) \times C_e \left(\frac{kg}{m^3} \right) \times \eta}{C_s \left(\frac{kg}{m^3} \right)} = \frac{3.634 \frac{m^3}{d} \times 3,74 \frac{kg}{m^3} \times 0,95}{18,7 \frac{m^3}{d}} = 690,5 \frac{m^3}{d} \quad (40)$$

Para los lodos del lavado de las tinas de sedimentación, como su concentración de entrada es la misma que la de los fangos del espesador, su concentración de salida será la misma que la de salida del espesador, es decir, 25 kg/m³. En cuanto al caudal de salida de lodos, este será:

$$Q_s \left(\frac{m^3}{d} \right) = \frac{Q_e \left(\frac{m^3}{d} \right) \times C_e \left(\frac{kg}{m^3} \right) \times \eta}{C_s \left(\frac{kg}{m^3} \right)} = \frac{880 \frac{m^3}{d} \times 5 \frac{kg}{m^3} \times 0,95}{25 \frac{m^3}{d}} = 167,2 \frac{m^3}{d} \quad (41)$$

En la Tabla 17 se resumen los caudales y concentraciones de los fangos a la salida del espesador y del tanque de hormigón.

Tabla 17. Caudal y concentración de fangos a la salida del espesador y del tanque

Equipo	Procedencia del lodo	Qs (m ³ /d)	Cs (kg/m ³)
Espesador	Tinas sedimentación	$Q_{S1} = 160 \frac{m^3}{d}$	$C_{S1} = 25 \frac{kg}{m^3}$
Tanque de hormigón con fondo inclinado	Lavado tinas sedimentación	$Q_{S2} = 167,2 \frac{m^3}{d}$	$C_{S2} = 25 \frac{kg}{m^3}$
	Retrolavado filtros	$Q_{S3} = 690,5 \frac{m^3}{d}$	$C_{S3} = 18,7 \frac{kg}{m^3}$

Fuente: Elaboración propia

- Dimensionamiento de tuberías y bombas para el transporte de fangos

Se necesitan 6 tuberías para el transporte de lodos hacia y desde el espesador y el tanque.

Tuberías a la entrada del espesador:

- ✓ Tubería 1: transporte continuo de lodo desde las tinas de sedimentación.

Tuberías a la entrada del tanque con fondo inclinado:

- ✓ Tubería 2: transporte de lodos del lavado de las tinas de sedimentación.
- ✓ Tubería 3: transporte de lodos del retrolavado de los filtros.

Tuberías a la salida del espesador:

- ✓ Tubería 4: transporte de fango de tinas de sedimentación espesado a tanque de hormigón para almacenamiento temporal.

Tuberías a la salida del tanque con fondo inclinado:

- ✓ Tubería 5: transporte del lodo de lavado de tinas espesado a tanque de hormigón para almacenamiento temporal.
- ✓ Tubería 6: transporte del lodo de retrolavado de filtros espesado a tanque de hormigón para almacenamiento temporal.

El diámetro de las tuberías utilizadas para el transporte de lodos debe ser adecuado para el manejo eficiente de fangos. En caso de que el diámetro de la tubería sea muy pequeño, provocará un aumento en la velocidad del fluido, lo cual genera pérdidas de presión y mayor fricción en las paredes de la tubería reduciendo la efectividad del transporte. Por otro lado, si el diámetro es muy grande se requiere mayor energía por parte de la bomba para evitar que los sólidos sedimenten, lo que elevaría los costes de operación.

Se procede a determinar el diámetro necesario de cada tubería en función del caudal y velocidad a utilizar, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$D \text{ (m)} = \sqrt{\frac{Q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) \times 4}{v \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \times \pi}} \quad (42)$$

La velocidad debe de estar entre 0,6 m/s y 2,4 m/s [16]. Se decide utilizar una velocidad media de 1,5 m/s para determinar el diámetro de todas las tuberías. De este modo:

$$D_{\text{Tubería1}} \text{ (m)} = \sqrt{\frac{Q_{\text{fangos sedimentado}} \times 4}{v \times \pi}} = \sqrt{\frac{\frac{842 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)}{24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 3.600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} \times 4}{1,5 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \times \pi}} = 0,091 \text{ m} = 9,1 \text{ cm} \quad (43)$$

$$D_{\text{Tubería2}} \text{ (m)} = \sqrt{\frac{Q_{\text{lavado tinas}} \times 4}{v \times \pi}} = \sqrt{\frac{\frac{880 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)}{24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 3.600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} \times 4}{1,5 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \times \pi}} = 0,093 \text{ m} = 9,3 \text{ cm} \quad (44)$$

$$D_{\text{Tubería3}} \text{ (m)} = \sqrt{\frac{Q_{\text{retrolavado filtros}} \times 4}{v \times \pi}} = \sqrt{\frac{\frac{3.634 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)}{24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 3.600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} \times 4}{1,5 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \times \pi}} = 0,189 \text{ m} = 18,9 \text{ cm} \quad (45)$$

$$D_{\text{Tubería4}} \text{ (m)} = \sqrt{\frac{Q_{S1} \times 4}{v \times \pi}} = \sqrt{\frac{\frac{160 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)}{24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 3.600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} \times 4}{1,5 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \times \pi}} = 0,040 \text{ m} = 4,0 \text{ cm} \quad (46)$$

$$D_{\text{Tubería5}} \text{ (m)} = \sqrt{\frac{Q_{S2} \times 4}{v \times \pi}} = \sqrt{\frac{\frac{167,2 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)}{24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 3.600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} \times 4}{1,5 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \times \pi}} = 0,041 \text{ m} = 4,1 \text{ cm} \quad (47)$$

$$D_{\text{Tubería6}} \text{ (m)} = \sqrt{\frac{Q_{S3} \times 4}{v \times \pi}} = \sqrt{\frac{\frac{690,5 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)}{24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 3.600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} \times 4}{1,5 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \times \pi}} = 0,082 \text{ m} = 8,2 \text{ cm} \quad (48)$$

En la Tabla 18 se resumen los diámetros para el transporte de fangos.

Tabla 18. Diámetros para tuberías a la entrada y salida del espesador y del tanque

Equipo	Tuberías a la entrada	Tuberías a la salida
Espesador	Tubería 1 D = 9,1 cm	Tubería 4 D = 4,0 cm
Tanque de hormigón con fondo inclinado	Tubería 2 D = 9,3 cm	Tubería 5 D = 4,1 cm
	Tubería 3 D = 18,9 cm	Tubería 6 D = 8,2 cm

Fuente: Elaboración propia

Se utilizarán tuberías de PVC (policloruro de vinilo) ya que es un material resistente a la corrosión, al calor y de bajo costo.

Se hará uso de las bombas existentes en la planta, que actualmente se utilizan para dirigir los lodos a fuentes superficiales cercanas, para bombear los lodos de la tina de sedimentación y del retrolavado de filtros al espesador.

Para la salida de los fangos espesados y lodos sedimentados, se utilizarán bombas de cavidad progresiva, ya que proporcionan un flujo estable sin perder efectividad. Además, tienen mayor compactación por lo que se adaptarán mejor a la potabilizadora debido a su espacio reducido. En la Figura 31 se muestra una bomba de cavidad progresiva.

SEEPEX.



Figura 31. Bomba de cavidad progresiva

Fuente: ProdetecS [22]

- Cálculo del caudal y concentración del agua reintroducida a cabecera de planta

Si la concentración de sólidos en suspensión del agua clarificada de los espesadores no altera la concentración de sólidos en suspensión del agua de entrada a la potabilizadora, es decir, esta sigue siendo del mismo orden de magnitud, se optará por recircularla a cabecera de planta. En caso contrario, se podría aprovechar para la limpieza de las tinas de sedimentación.

El caudal de agua clarificada y su concentración de sólidos en suspensión se calcularán de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$Q_w = Q_e - Q_s \quad (49)$$

$$C_w = \frac{Q_e * C_e * (1-\eta)}{Q_w} \quad (50)$$

Sustituyendo los valores correspondientes, para el espesador se tiene:

$$Q_{w1} = 842 \frac{m^3}{d} - 160 \frac{m^3}{d} = 682 \frac{m^3}{d} \quad (51)$$

$$C_{w1} = \frac{842 \frac{m^3}{d} \times 5 \frac{kg}{m^3} \times (1-0,95)}{682 \frac{m^3}{d}} = 0,309 \frac{kg}{m^3} \cong 309 \frac{mg}{L} \quad (52)$$

En el tanque con fondo inclinado, cuando trata los lodos del lavado de tinas de sedimentación, el agua clarificada tendrá las siguientes características:

$$Q_{w2} = 880 \frac{m^3}{d} - 167,2 \frac{m^3}{d} = 712,8 \frac{m^3}{d} \quad (53)$$

$$C_{w2} = \frac{880 \frac{m^3}{d} \times 5 \frac{kg}{m^3} \times (1-0,95)}{712,8 \frac{m^3}{d}} = 0,309 \frac{kg}{m^3} \cong 309 \frac{mg}{L} \quad (54)$$

Y cuando el tanque con fondo inclinado trata los lodos del retrolavado de los filtros, se tiene:

$$Q_{w3} = 3.634 \frac{m^3}{d} - 690,5 \frac{m^3}{d} = 2.943,5 \frac{m^3}{d} \quad (55)$$

$$C_{w3} = \frac{3.634 \frac{m^3}{d} \times 3,74 \frac{kg}{m^3} \times (1-0,95)}{2.943,5 \frac{m^3}{d}} = 0,231 \frac{kg}{m^3} \cong 231 \frac{mg}{L} \quad (56)$$

En la Tabla 19 se resumen los caudales y concentraciones del agua clarificada a la salida del espesador y del tanque de hormigón con fondo inclinado.

Tabla 19. Caudal y concentración del agua clarificada a la salida del espesador y del tanque

Equipo	Procedencia del lodo	Qw (m ³ /d)	Cw (kg/m ³)
Espesador	Tinas sedimentación	$Q_{w1} = 682 \frac{m^3}{d}$	$C_{w1} = 0,309 \frac{kg}{m^3}$
Tanque de hormigón con fondo inclinado	Lavado tinas sedimentación	$Q_{w2} = 712,8 \frac{m^3}{d}$	$C_{w2} = 0,309 \frac{kg}{m^3}$
	Retrolavado filtros	$Q_{w3} = 2.943,5 \frac{m^3}{d}$	$C_{w3} = 0,231 \frac{kg}{m^3}$

Fuente: Elaboración propia

Para comprobar si se puede recircular el agua clarificada a cabecera de planta, se procede a realizar el balance de materia correspondiente teniendo en cuenta el ahorro de agua cruda que supondría en cada caso. En el caso del agua recirculada desde el espesador, se tendría:

$$C_{entrada_nueva1} \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{\left(166.558 \frac{m^3}{d} - 682 \frac{m^3}{d} \right) \times 13,2 \frac{mg}{L} + 682 \frac{m^3}{d} \times 309 \frac{mg}{L}}{166.558 \frac{m^3}{d}} = 14,4 \frac{mg}{L} \quad (57)$$

Cuando se esté recirculando el agua del tanque de hormigón tras tratar los lodos del lavado de las tinas de sedimentación, se tendrá:

$$C_{entrada_nueva2} \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{\left(166.558 \frac{m^3}{d} - 712,8 \frac{m^3}{d} \right) \times 13,2 \frac{mg}{L} + 712,8 \frac{m^3}{d} \times 309 \frac{mg}{L}}{166.558 \frac{m^3}{d}} = 14,5 \frac{mg}{L} \quad (58)$$

Por último, cuando al recircular el agua clarificada del tanque de hormigón tras tratar los lodos del retrolavado de los filtros, se tendrá:

$$C_{entrada_nueva3} \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{\left(166.558 \frac{m^3}{d} - 2.943,5 \frac{m^3}{d} \right) \times 13,2 \frac{mg}{L} + 2.943,5 \frac{m^3}{d} \times 231 \frac{mg}{L}}{166.558 \frac{m^3}{d}} = 17,0 \frac{mg}{L} \quad (59)$$

Como puede observarse, la nueva concentración de sólidos en suspensión a la entrada de la potabilizadora en todos los casos seguiría siendo del mismo orden de magnitud que la del agua cruda. Por tanto, se procederá a recircular el agua clarificada a cabecera de planta.

Se dispondrá de dos tuberías encargadas de recircular el agua clarificada a cabecera de planta, una para el espesador y otra para el tanque de fondo inclinado. La tubería de recirculación de agua clarificada del tanque de fondo inclinado se dimensionará para el mayor caudal para que ambos flujos puedan transportarse correctamente.

El diámetro necesario para estas tuberías se determina del siguiente modo:

$$D_{\text{Tubería7}}(\text{m}) = \sqrt{\frac{Qw1 \times 4}{v \times \pi}} = \sqrt{\frac{\frac{682 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)}{24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 3.600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} \times 4}{1,5 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \times \pi}} = 0,082 \text{ m} = 8,2 \text{ cm} \quad (60)$$

$$D_{\text{Tubería8}}(\text{m}) = \sqrt{\frac{Qw3 \times 4}{v \times \pi}} = \sqrt{\frac{\frac{2.943,5 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)}{24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 3.600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} \times 4}{1,5 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \times \pi}} = 0,170 \text{ m} = 17,0 \text{ cm} \quad (61)$$

Para el transporte de agua clarificada se utilizarán bombas centrífugas ya que son adecuadas para el transporte de líquidos que no tienen grandes cargas de sólidos.

Cabe indicar que el espesador está diseñado para funcionar en condiciones meteorológicas normales; en caso de que ocurran desastres naturales y el caudal de fangos que entre al espesador sea mayor, se debe ajustar el flujo de entrada para evitar el desbordamiento y la disminución del tiempo de retención en el mismo.

- Dimensionamiento del tanque de almacenamiento de fangos

Para almacenar los fangos espesados se utilizará un tanque cilíndrico de hormigón con capacidad para almacenar 10.000 m³, el cual tendrá las siguientes dimensiones: D = 46,12 m, h = 6 m.

Estas dimensiones se han calculado en base al espacio disponible para ubicar el tanque, especificado en el apartado 6. *Situación y emplazamiento*, con un margen de seguridad del 15% para el acceso y mantenimiento en la zona.

Para su recogida, un camión cisterna se encargará de la recolección del fango espesado en el tanque de almacenamiento cada 16 días.

Este fango no tendrá coste alguno, a cambio de la recolección gratuita del mismo. En el apartado 7. *Gestión de residuos propuesta* se detalla su uso final.

5.3. Dimensionamiento de los paneles solares

El dimensionamiento de los paneles solares se ha realizado con el programa PVsyst. Este es un *software* que permite el estudio, simulación y análisis de datos completo de los sistemas fotovoltaicos. Permite seleccionar la región precisa donde se diseñarán los paneles e importar los datos climáticos de esta zona a la vez que fijar la energía necesaria de producción o el espacio donde se quieren implementar los paneles. Contiene a su vez una gran base de datos de modelos de paneles solares e inversores para el desarrollo. Por tanto, se llevará a cabo un estudio para determinar qué porcentaje de la demanda energética podrá cubrirse y el periodo de recuperación de la inversión.

A continuación, se detalla el procedimiento seguido para la introducción de los datos en PVsyst.

En primer lugar, se ha definido que el sistema se diseña para ser conectado a la red.

A continuación, se continúa definiendo la ubicación de la potabilizadora de Miraflores a partir de sus coordenadas geográficas como se muestra en la Figura 32. Entre las bases de datos disponibles, se selecciona Meteororm ya que esta permite estimar variables climáticas mediante el uso de datos meteorológicos históricos y modelados, lo que permite tener en cuenta parámetros esenciales como la temperatura, irradiancia solar, velocidad del viento y precipitación en la potabilizadora con una mayor resolución que las otras opciones.

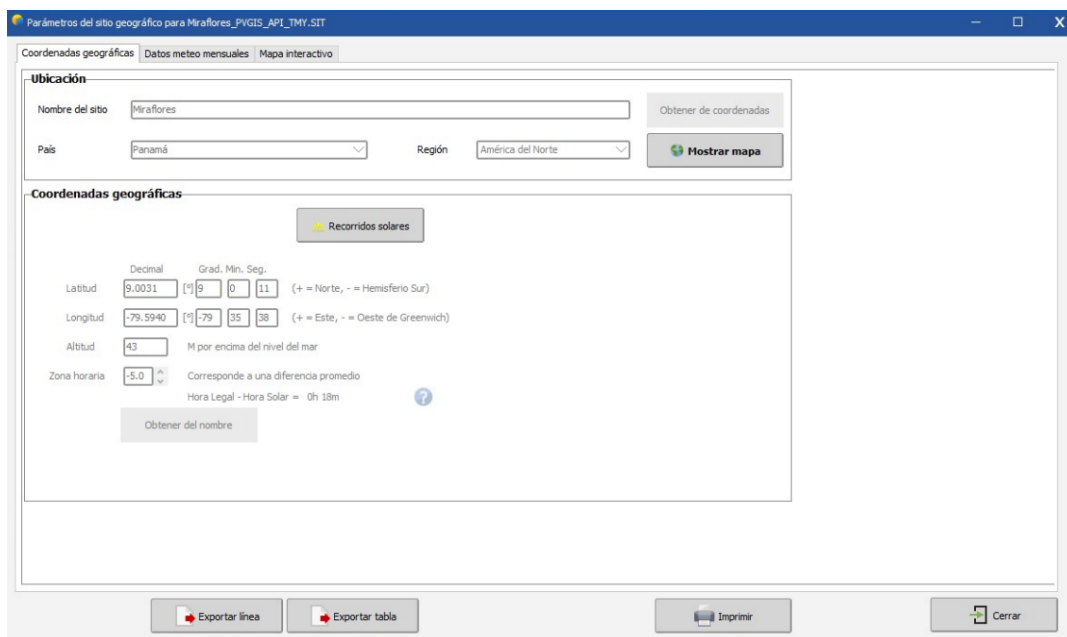


Figura 32. Definición de coordenadas geográficas de la potabilizadora de Miraflores en PVsyst

Una vez definida la ubicación de la potabilizadora, se procede a definir la orientación de los módulos fotovoltaicos como se muestra en la Figura 33.

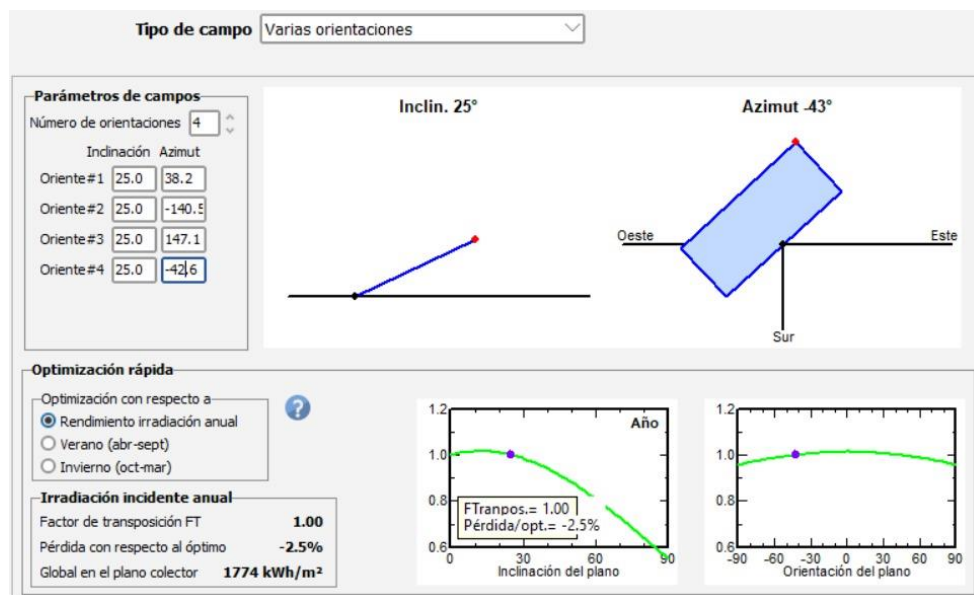


Figura 33. Definición de la orientación de los módulos fotovoltaicos en PVsyst

En “Tipo de campo” se seleccionan varias orientaciones debido a la diferente ubicación y disposición de cada techo. Se definen 4 orientaciones para optimizar la captación de la energía solar. Cada orientación tiene una inclinación de 25° ya que, debido a la ubicación de la planta, esta es la orientación óptima según se indica en los gráficos ubicados en la parte inferior derecha de la Figura 33. El azimut está relacionado con la cantidad de irradiación solar que reciben los paneles a lo largo del día y año, siendo el óptimo el que orienta a los módulos hacia el punto cardinal donde recibirán una mayor cantidad de esta. El azimut se define como el ángulo de orientación de una superficie en relación al norte geográfico.

El azimut observado en la Figura 33 correspondiente a -43° fue determinado en función de la orientación real del Techo 2, la cual fue analizada con la herramienta Google Maps. A pesar de que hay 6 techos disponibles, algunos comparten una orientación muy similar, como los Techos 3 y 4 que utilizan un azimut de 147° , por lo que fueron agrupados bajo una sola orientación en el modelo para simplificar la simulación sin afectar significativamente el resultado. Además, es posible que un mismo techo tenga varios azimuts debido a su forma.

A continuación, se procede a definir el sistema, es decir, definir los equipos a utilizar en la planta como se muestra en la Figura 34. Se puede seleccionar entre las marcas y modelos disponibles de módulo e inversor, ya que el *software* proporciona todos sus datos. En esta etapa es posible el predimensionamiento utilizando los valores de potencia planeada (kW) y el área disponible para los paneles solares (m^2). Sin embargo, se selecciona la opción sin predimensionamiento ya que PVsyst definirá de una manera más precisa los parámetros (número de paneles, configuración, inversores) en función de los modelos de inversores que se seleccionen, así como las características del proyecto ya definidas: irradiación, temperatura, inclinación y orientación.

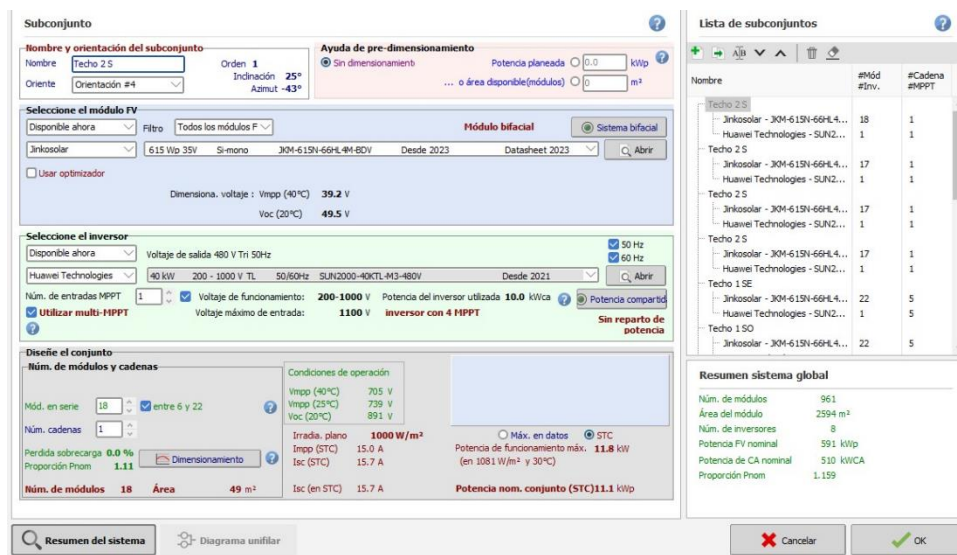


Figura 34. Definición del sistema en PVsyst

En la sección “Lista de subconjuntos” se crea uno o varios subconjuntos para cada techo. A modo de ejemplo, en la Figura 34 se observa que para el Techo 2 se ha definido la orientación 4 ya que es la que corresponde con este techo. Se procede a definir el modelo de módulo fotovoltaico a utilizar ya descrito anteriormente, JKM-615N-66HL4M-BDV de Jinkosolar con una potencia nominal de 615 Wp. Además, se selecciona la opción de sistema bifacial ya que, al captar la luz solar por ambas caras, aumenta la producción total de energía.

Para la selección del inversor o inversores necesarios para cada techo, se busca que la potencia del inversor sea igual o ligeramente menor que la potencia disponible en el techo debido a que la potencia nominal de los paneles solares no se suele alcanzar, por lo que un inversor con la misma potencia o ligeramente menor puede manejar toda la energía producida evitando el uso de inversores más grandes que conllevan mayores costos. Siguiendo con el ejemplo del Techo 2, se selecciona el modelo de inversor SUN2000-40KTL-M3-480V de Huawei Technologies con una potencia de 40 kW, siendo la potencia disponible en el techo de 42,44 kW como se ha determinado anteriormente (Tabla 16). Se selecciona, además, la opción de utilizar entrada MPPT. La entrada MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) es una tecnología que permite al inversor encontrar el punto de máxima potencia en los paneles solares para maximizar la producción de energía. En este caso, se fija 1 entrada MPPT.

Se ha realizado el mismo procedimiento para todos los techos, obteniendo en total 8 inversores con una potencia nominal total de 510 kWca. Algunos techos tienen varias orientaciones, por lo que es necesario utilizar más de un inversor para optimizar la generación en cada sección.

Por último, en la sección “Número de módulos y cadenas” se ha seleccionado la cantidad de módulos en serie por cadenas. Dependiendo de la potencia disponible en el techo, el programa define la cantidad recomendada de módulos. En la Figura 34 se observa que para el Techo 2 se pueden implementar entre 6 y 22 módulos por cadena. Sin embargo, anteriormente se ha determinado que para el Techo 2 se pueden instalar aproximadamente 69 módulos, por lo que se selecciona 1 cadena de 18 módulos en serie y para el resto de los módulos se ha seguido el mismo procedimiento creando

3 subconjuntos más en los que habrá 1 cadena con 17 módulos conectados en serie para cada subconjunto. La suma de estas 4 cadenas resulta en un total de 69 módulos en el Techo 2.

A continuación, se han definido las pérdidas térmicas del sistema como se observa en la Figura 35. Se ha definido un valor de disipación de calor de 29 W/m²K ya que es un dato estándar a utilizar cuando los módulos se instalan sobre techo.

Factor de pérdidas térmicas del campo

Factor de pérdida térmica $U = U_c + U_v * \text{Vel. viento}$

Factor de pérdida constante U_c 29.0 W/m²K

Factor de pérdida del viento U_v 0.0 W/m²K m/s

Valor predeterminado según montaje

Módulos montados "libres" con circulación de aire

Cúpulas

Semi-integrado con conducto de aire detrás

Integración con respaldo totalmente aislado

Factor TNCO equivalente

TNCO (Temperatura Nominal de Célula Operativa) está especificada a menudo por los fabricantes para el módulo mismo. Esta es una información alternativa a la definición del valor U que no tiene sentido cuando se aplica al conjunto operativo.

No use el enfoque TNCO. Esto es bastante confuso cuando se aplica a un conjunto !

Ver el TNCO de todos modos

Figura 35. Definición de pérdidas térmicas

Con estos parámetros definidos, se procede a simular el proyecto dando como resultado una potencia de diseño de 591 kWp, 961 paneles solares de 615 Wp conectados a 8 inversores con potencia nominal de 510 kWca, una generación anual de 756.597 kWh/año.

Se obtuvieron también valores de proporción de rendimiento (PR) de 76,1% y una tasa de rendimiento interno (TIR) de 51,4%. La proporción de rendimiento es una medida de cuánta energía útil se genera realmente en el sistema teniendo en cuenta diversas pérdidas como temperatura, sombras, cableado e inversores. Los sistemas típicos suelen tener una PR entre 70% y 85%, por lo que un valor del 76,1% indica que el sistema está funcionando de manera eficiente, considerando las pérdidas típicas que se pueden esperar en la instalación como por degradación de módulos, nivel de irradiancia y temperatura. La tasa de rendimiento interno (TIR) indica el retorno esperado de la inversión. Un valor de TIR de 51,4% se traduce en un retorno anual de capital invertido de esta magnitud, por lo que se considera muy rentable.

En la Tabla 20 se muestra la distribución de paneles e inversores por techo, observándose que se ha empleado el mismo modelo de panel para todos los módulos fotovoltaicos, pero se requieren 5 modelos diferentes de inversores.

Tabla 20. Distribución de módulos e inversores por techo de la potabilizadora de Miraflores

Subconjunto	Modelo de módulo	Nº de módulos	Modelo de inversor	Nº de inversores	Potencia techo (kWp)	Potencia inversor (kWp)
Techo 1	Jinko Solar JKM-615N-66HL4M-BDV	440 unidades	Huawei Techonologies SUN2000-115KTL-M0	2 unidades	271 kWp	Potencia ud.: 115 kWca Potencia total: 230kWca
Techo 2	Jinko Solar JKM-615N-66HL4M-BDV	69 unidades	Huawei Techonologies SUN2000-40 KTL-M3	1 unidad	89,2 kWp	40 kWca
Techo 3	Jinko Solar JKM-615N-66HL4M-BDV	240 unidades	Huawei Techonologies SUN2000-60KTL-M0	2 unidades	148 kWp	Potencia ud.: 60 kWca Potencia total: 120 kWca
Techo 4	Jinko Solar JKM-615N-66HL4M-BDV	52 unidades	Huawei Techonologies SUN2000-30KTL-M3	1 unidad	32 kWp	30 kWca
Techo 5	Jinko Solar JKM-615N-66HL4M-BDV	84 unidades	Huawei Techonologies SUN2000-50KTL-ZHM3	1 unidad	51,7 kWp	50 kWca
Techo 6	Jinko Solar JKM-615N-66HL4M-BDV	76 unidades	Huawei Techonologies SUN2000-40 KTL-M3	1 unidad	89,2 kWp	40 kWca
TOTAL		961 unidades	TOTAL	8 unidades	TOTAL	510 kWca

Fuente: Elaboración propia

Para la conexión entre módulos e inversores en cada techo, en las Tablas 21-26 se observa la integración de los mismos. Como puede verse, el Techo 1 cuenta con 2 inversores Huawei Techonologies SUN2000-115KTL-M0 con 10 MPPT cada uno; el Techo 2 cuenta con 1 inversor Huawei Techonologies SUN2000-40KTL-M0 con 4 MPPT; el Techo 3 cuenta con 2 inversores Huawei Techonologies SUN2000-60KTL-M0 con 6 MPPT cada uno; el Techo 4 cuenta con 1 inversor Huawei Techonologies SUN2000-30KTL-M3 con 4 MPPT; el Techo 5 cuenta con 1 inversor Huawei Techonologies SUN2000-50KTL-ZHM3 con 4 MPPT; y el Techo 6 cuenta con 1 inversor Huawei Techonologies SUN2000-40 KTL-M3 con 4 MPPT.

Tabla 21. Distribución de entrada de cadenas a cada MPPT de los inversores del Techo 1.

TECHO 1				
Inversor 1	MPPT	Entradas	Cadena	Módulos en serie
Huawei Techonologies SUN2000-115KTL-M0 115 kWca	Nº 1	2	1	22
	Nº 2	2	1	22
	Nº 3	2	1	22
	Nº 4	2	1	22
	Nº 5	2	1	22
	Nº 6	2	1	22
	Nº 7	2	1	22
	Nº 8	2	1	22
	Nº 9	2	1	22
	Nº 10	2	1	22
Inversor 2	MPPT	Entradas	Cadena	Módulos en serie
Huawei Techonologies SUN2000-115KTL-M0 115 kWca	Nº 1	2	1	22
	Nº 2	2	1	22
	Nº 3	2	1	22
	Nº 4	2	1	22
	Nº 5	2	1	22
	Nº 6	2	1	22
	Nº 7	2	1	22
	Nº 8	2	1	22
	Nº 9	2	1	22
	Nº 10	2	1	22

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22. Distribución de entrada de cadenas a cada MPPT del inversor del Techo 2

TECHO 2				
Inversor	MPPT	Entradas	Cadena	Módulos en serie
Huawei Techonologies SUN2000-40KTL-M0 40 kWca	Nº 1	2	1	18
	Nº 2	2	1	17
	Nº 3	2	1	17
	Nº 4	2	1	17

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Distribución de entrada de cadenas a cada MPPT de los inversores del Techo 3

TECHO 3				
Inversor 1	MPPT	Entradas	Cadena	Módulos en serie
Huawei Techonologies SUN2000-60KTL-M0 60kWca	Nº 1	2	1	20
	Nº 2	2	1	20
	Nº 3	2	1	20
	Nº 4	2	1	20
	Nº 5	2	1	20
	Nº 6	2	1	20
Inversor 2	MPPT	Entradas	Cadena	Módulos en serie
Huawei Techonologies SUN2000-60KTL-M0 60kWca	Nº 1	2	1	20
	Nº 2	2	1	20
	Nº 3	2	1	20
	Nº 4	2	1	20
	Nº 5	2	1	20
	Nº 6	2	1	20

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Distribución de entrada de cadenas a cada MPPT del inversor del Techo 4

TECHO 4				
Inversor	MPPT	Entradas	Cadena	Módulos en serie
Huawei Technologies SUN2000-30KTL-M0 30kWca	Nº 1	2	1	13
	Nº 2	2	1	13
	Nº 3	2	1	13
	Nº 4	2	1	13

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25. Distribución de entrada de cadenas a cada MPPT del inversor del Techo 5

TECHO 5				
Inversor	MPPT	Entradas	Cadena	Módulos en serie
Huawei Technologies SUN2000-50KTL-M0 50kWca	Nº 1	2	1	21
	Nº 2	2	1	21
	Nº 3	2	1	21
	Nº 4	2	1	21

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26. Distribución de entrada de cadenas a cada MPPT del inversor del Techo 6

TECHO 6				
Inversor	MPPT	Entradas	Cadena	Módulos en serie
Huawei Technologies SUN2000-40KTL-M0 40kWca	1	2	1	19
	2	2	1	19
	3	2	1	19
	4	2	1	19

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al porcentaje de energía real que será utilizada por los paneles teniendo en cuenta las pérdidas, en la Figura 36 se observa la cantidad de energía útil producida por mes a lo largo del año.

La gráfica superior de la Figura 36 muestra la cantidad de energía solar diaria en promedio que incide sobre los paneles durante cada mes, y la gráfica inferior muestra la energía que realmente está disponible después de todas las pérdidas.

Para la gráfica superior se observa que los meses con mayor incidencia solar son entre enero y abril, coincidiendo con los meses de verano, siendo marzo el que tiene mayor incidencia, con un valor de 5,7 kWh/m²/d. En cambio, los meses con menor incidencia solar son entre mayo y diciembre, siendo el mes con una menor incidencia solar noviembre, con 3,6 kWh/m²/d.

En la gráfica inferior se desglosan las pérdidas que habrá en el sistema. Se observa que las pérdidas de colección (relacionadas con sombras, suciedad y temperatura en paneles) representan el 19,2% mientras que las pérdidas del sistema (inversores, cableado) representan un 4,7%. Teniendo en cuenta las distintas pérdidas, mensualmente un 76,1% de la energía incidente se transformará en energía útil. Esto indica que la proporción de rendimiento (PR) del sistema es de 76,1%. Los sistemas eficientes suelen tener un PR entre 70% y 80%, por lo que un PR de 76,1% indica un buen rendimiento del sistema.

En cuanto al porcentaje de energía que podrán cubrir los paneles en la potabilizadora de Miraflores, incluyendo el consumo de los equipos implementados, se calculará del siguiente modo:

$$\% \text{ Energía cubierta} = \left(\frac{E_{\text{generada paneles}} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right)}{E_{\text{consumida planta}} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right)} \right) \times 100 \quad (62)$$

Sustituyendo los valores calculados anteriormente, se tiene:

$$\% \text{ Energía cubierta} = \left(\frac{756.597 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}}{814.853 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}} \right) \times 100 = 92,9 \% \quad (63)$$

Por tanto, con los paneles solares se podrá cubrir el 93% del consumo energético de la planta.

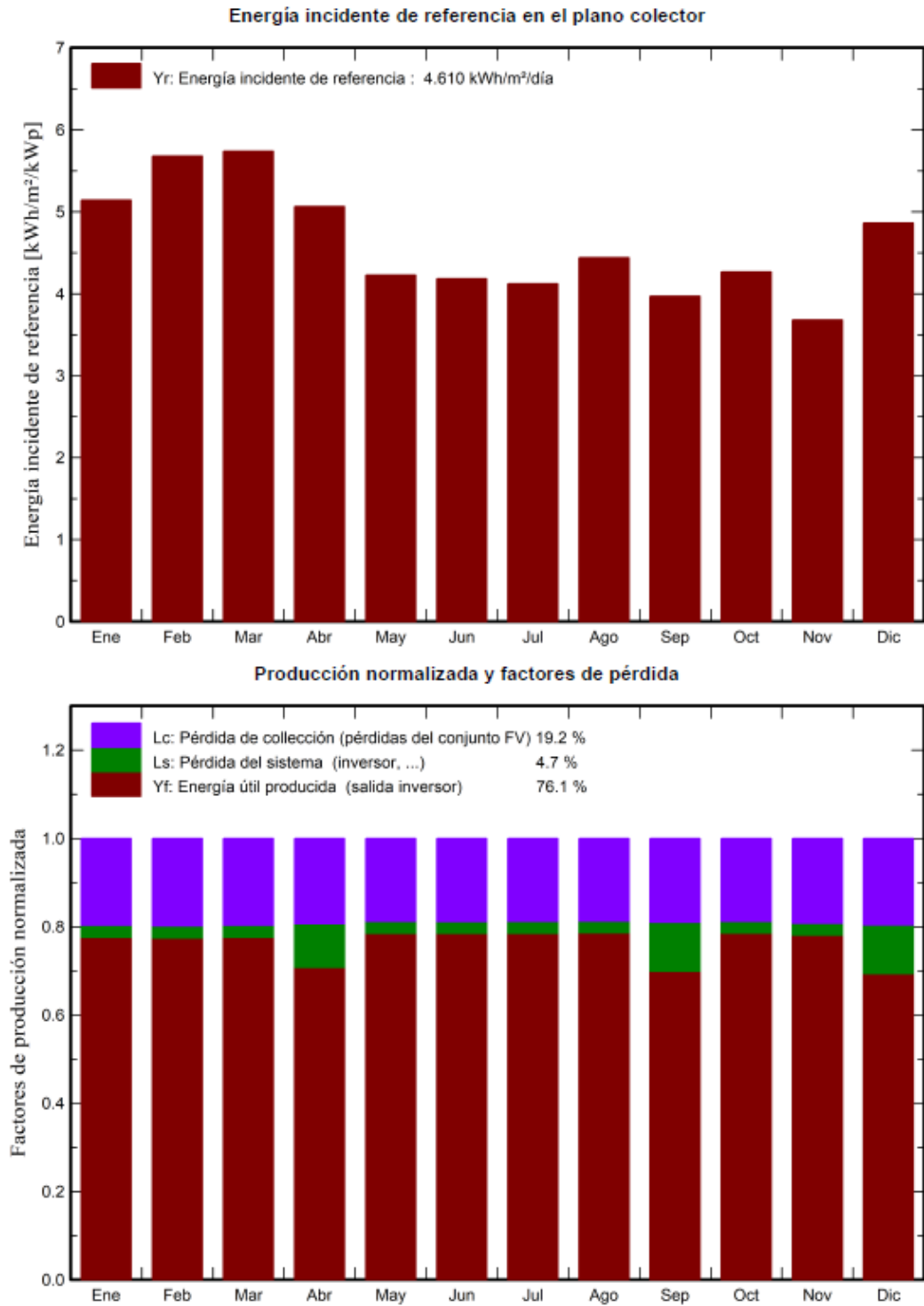


Figura 36. Gráficas mensuales sobre producción de energía del sistema

5.3.1. Descripción técnica de la instalación

A continuación, se describirá la estructura utilizada para instalar los paneles en el techo, así como el cableado y la puesta a tierra de la instalación.

- Estructura

Los paneles se instalarán sobre rieles, los cuales estarán fijados a una base especialmente diseñada para ello. Los rieles se colocan paralelos al techo y permiten distribuir el peso de los paneles sobre este. La base se asegura al techo mediante anclajes y tornillos.

Para fijar y asegurar los paneles a los rieles, se utilizan abrazaderas intermedias y finales las cuales evitan que los paneles se deslicen o muevan.

Se utilizará la estructura de la marca Falcat la cual permite instalar entre 1 y 5 módulos por estructura. Dependiendo de la cantidad de módulos a instalar por techo, se utilizará un modelo u otro. Los materiales utilizados en esta estructura son aluminio EN AW 6005A T6 y tornillería de acero inoxidable.

En la Figura 37 se observa una estructura diseñada para soportar 3 módulos.



Figura 37. Estructura para paneles sobre rieles en teja de barro

Fuente: AutoSolar [23]

- Conexión de módulos y cableado

Para conectar los paneles entre sí y transportar los distintos tipos de corriente generada a lo largo de todo el sistema, se utiliza un cableado de cobre ya que es buen conductor de la electricidad y es resistente a la exposición al Sol y a cambios de temperatura. Sin embargo, los cables de cobre

no se conectan al desnudo a cada panel, sino que se conectan mediante un conector MC4 el cual ya está incorporado en los módulos y se puede observar en la Figura 38.



Figura 38. Conector MC4

Fuente: AutoSolar [23]

- Cableado de corriente directa (DC)

Este cableado se utiliza para transportar la corriente directa generada por los paneles al inversor. La sección de cada cable se dimensionará en función de la corriente utilizada por techo.

Para el dimensionamiento de la corriente directa (DC) y alterna (AC) se utiliza la Tabla 27 extraída del NEC 2020 (National Electric Code), código utilizado en Panamá para garantizar el buen funcionamiento eléctrico y prevenir riesgos como incendios y descargas eléctricas. En esta tabla se utiliza la columna de 90 °C para dimensionar el cableado en condiciones de temperatura más críticas para prevenir cualquier fallo en la instalación. Se procede a escoger la sección del cableado en unidades AWG (American Wire Gauge) en función de la corriente necesaria para cada techo. Los valores de corriente se han obtenido en el informe de PVsyst.

Tabla 27. Dimensionamiento de cableado en función de la corriente para una temperatura de 90 °C

Size AWG or kcmil	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)
		Types TW, UF	Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, XHWN, USE, ZW
	COPPER		
18*	—	—	14
16*	—	—	18
14*	15	20	25
12*	20	25	30
10*	30	35	40
8	40	50	55
6	55	65	75
4	70	85	95
3	85	100	115
2	95	115	130
1	110	130	145
1/0	125	150	170
2/0	145	175	195
3/0	165	200	225
4/0	195	230	260
250	215	255	290
300	240	285	320
350	260	310	350
400	280	335	380
500	320	380	430
600	350	420	475
700	385	460	520
750	400	475	535
800	410	490	555
900	435	520	585
1000	455	545	615
1250	495	590	665
1500	525	625	705
1750	545	650	735
2000	555	665	750

Fuente: Parcialmente adaptado de National Electric Code (NEC) [24]

Por cada cadena de paneles en cada techo, habrá un par de cableado de cobre como se observa en la Tabla 28. Una cadena se refiere a un grupo de paneles conectados en serie. El cableado consta de un cable positivo y un cable negativo. El cable positivo es el encargado de transportar la corriente positiva de los paneles al inversor y estará conectado al terminal positivo de los paneles, mientras que el cable negativo es el encargado de transportar la corriente negativa y estará conectado al terminal negativo de los paneles.

Tabla 28. Cantidad y sección de cableado de corriente directa (DC) para cada techo

Techo	Cadenas	Cableado DC	Corriente (A)	Sección (AWG)	Sección (mm ²)
1	20 cadenas	20 pares	75	6	16
2	4 cadenas	4 pares	15	16	1.5
3	12 cadenas	12 pares	90	4	25
4	4 cadenas	4 pares	30	12	4
5	3 cadenas	3 pares	45	8	10
6	4 cadenas	4 pares	60	6	16

Fuente: Elaboración propia

El tipo de cable a utilizar es el USE-2 (*Underground Service Entrance, Type 2*), el cual se observa en la Figura 39. Se trata de un cable de cobre con un recubrimiento de XLPE (polietileno reticulado), que permite soportar temperaturas de hasta 90 °C en ambientes secos y húmedos; tiene resistencia al agua, rayos UV y productos químicos. Es un cable especialmente apto para instalaciones a la intemperie y cumple con los estándares del artículo 310 del Código Eléctrico Nacional (NEC) de Panamá para instalaciones seguras.



Figura 39. Cableado USE-2 para corriente directa (DC)

- Cableado de corriente alterna (AC)

Este cableado se encarga de transportar la corriente alterna generada al cuadro de baja tensión.

A la salida de cada inversor hay una salida de corriente AC, por lo que la cantidad de cableado AC necesario por techo dependerá de la cantidad de inversores instalados en cada uno. En la Tabla 29 se determina la cantidad de cableado AC necesario para cada techo, así como la sección requerida para cada uno en función de la corriente.

Tabla 29. Cantidad y sección de cableado de corriente alterna (AC) para cada techo

Techo	Inversores	Cableado AC	Corriente (A)	Sección (AWG)	Sección (mm ²)
1	2	2	75	6	16
2	1	1	15	16	1.5
3	2	2	90	4	25
4	1	1	30	12	4
5	1	1	45	8	10
6	1	1	60	6	16

Fuente: Elaboración propia

El tipo de cable a utilizar es el THHN (Termoplastic High Heat resistant Nylon), el cual se observa en la Figura 40. Se trata de un cable de cobre con recubrimiento de nylon y aislamiento interno de PVC, adecuado para soportar temperaturas extremas (90 °C). Este cable cumple con los estándares del artículo 310 del Código Eléctrico Nacional (NEC) de Panamá para instalaciones seguras.



Figura 40. Cableado THHN para corriente alterna

- Puesta a tierra

La puesta a tierra es necesaria para conducir posibles desvíos de la corriente hacia la tierra para evitar accidentes con el personal de operación en la potabilizadora.

En el artículo 250 del NEC 2020 se detallan los equipos necesarios para la puesta a tierra siendo los siguientes:

- ✓ *Electrodo de puesta a tierra*

Permite que las cargas eléctricas provocadas por rayos, sobretensiones o fallos en el sistema eléctrico se disipen de manera controlada hacia la tierra, evitando que se acumulen en los equipos o estructuras. El artículo 250.52 del Código Eléctrico Nacional (NEC) indica que los electrodos permitidos para puesta a tierra son tuberías metálicas de agua subterránea, estructura de soporte de metal en el suelo, electrodo revestido de

hormigón, anillo de tierra y electrodos de varilla y tubo. Se utilizará un electrodo revestido de hormigón debido a su durabilidad y bajo mantenimiento.

✓ *Conductor de puesta a tierra*

Se encarga de conectar el sistema eléctrico al electrodo de puesta a tierra. Según el NEC se pueden utilizar conductores de cobre, aluminio o aluminio recubierto de cobre, conductor metálico rígido, conductor metálico intermedio. Debido a la elevada humedad relativa de Panamá (75,7%), se optará por un conductor de aluminio recubierto de cobre.

✓ *Conductor de protección*

Conecta las partes no energizadas de los equipos eléctricos al conductor de puesta a tierra. El artículo 250.118 del NEC indica que los materiales que pueden ser utilizados para la protección son cobre, aluminio, y cobre recubierto de aluminio. Se utilizará cobre recubierto de aluminio por la misma razón indicada en el conductor de puesta a tierra.

✓ *Borne principal de tierra*

Es donde se conectan todos los conductores de puesta a tierra. El artículo 250.24 del NEC indica que el material de este debe ser cobre o acero galvanizado. Se utilizará cobre.

✓ *Toma de tierra*

Es donde se conectará el conductor de puesta a tierra al electrodo de puesta a tierra. El artículo 250.8 del NEC indica que se utilizan abrazaderas.

5.4. Esquema de la planta con las modificaciones propuestas

El nuevo esquema de la planta potabilizadora de Miraflores con las modificaciones propuestas se muestra en la Figura 41.

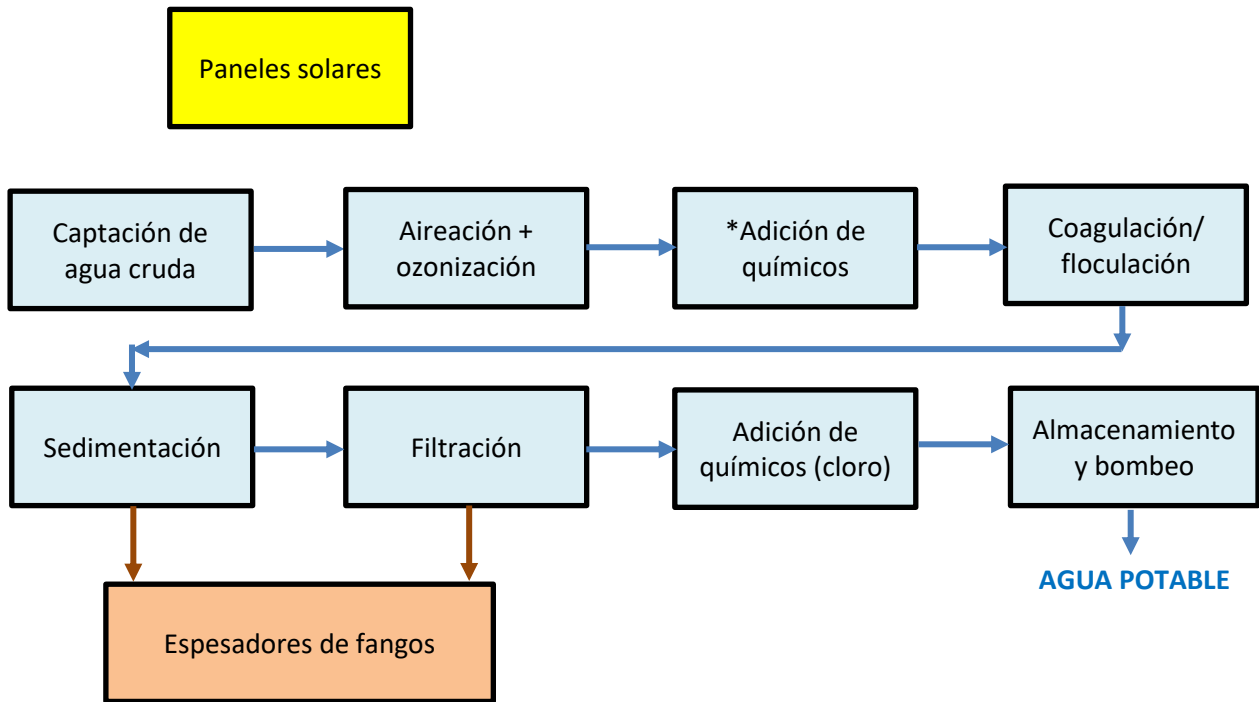


Figura 41. Diagrama de bloques modificado de la potabilizadora de Miraflores

**En esta etapa se elimina la adición de cloro por lo que solo se añade coagulante, flúor, carbón activo y floculante si es necesario.*

Fuente: Elaboración propia

El nuevo diagrama de bloques de la planta incluye la implementación de paneles solares, ozonización integrada en la etapa de aireación y espesadores de fango que estarán ubicados entre las tinajas de sedimentación y el edificio de filtración, contando con un total de 7 etapas excluyendo la captación y distribución del agua.

A diferencia del esquema de la planta actual mostrado en la Figura 4, se cuenta con una etapa más, siendo esta la del espesador de fangos que ayudará a mejorar la gestión de residuos tanto líquidos como sólidos.

Además, la implementación de paneles solares contribuye a la reducción de las emisiones de CO₂, que se verían considerablemente aumentadas si se utilizara solamente energía no renovable en la planta, especialmente debido al alto consumo energético del generador de ozono.

5.5. Estimación de la vida útil de los equipos

A continuación, se indica la vida útil estimada de los nuevos equipos incluidos en la potabilizadora:

- Generador de Ozono

- ✓ La vida útil del generador de ozono seleccionado está entre 5-10 años dependiendo del mantenimiento y condiciones de operación.
- ✓ Inyector Venturi: 10 años.
- ✓ Tubería Acero inoxidable 316L: >100 años.
- ✓ Sensor de concentración de ozono en el agua: 2 años.
- ✓ Sensor de concentración de ozono en el aire: 10 años.

- Espesador de fangos

- ✓ Espesador: entre 15 y 25 años dependiendo de las condiciones operativas y del mantenimiento.
- ✓ Tuberías de PVC: entre 25 y 100 años.

- Paneles solares

Los paneles solares tienen una vida útil de 20 años; sin embargo, esto no significa que no sigan realizando su función, sino que el rendimiento del sistema se ve reducido. Para obtener un sistema con el mismo rendimiento, se debe sustituir la instalación propuesta por una nueva.

6. EMPLAZAMIENTO DE LOS EQUIPOS EN LA PLANTA

En la planta existe una superficie libre de 5.967,74 m² aproximadamente. En este espacio se instalarán los equipos propuestos. En la Figura 42 se ha bordeado en amarillo el área prevista para la ubicación del espesador de fangos, contando con una superficie de 2.005,24 m²; en rojo se ha bordeado la ubicación prevista para el generador de ozono, contando con un área de 443,5 m²; y en azul se ha bordeado el área de techo disponible para los paneles solares, siendo esta de 3.519 m². En estos espacios no se realiza ninguna actividad en específico, por lo que no se altera la actividad en planta. Las mediciones de las áreas disponibles se han realizado con la herramienta Google Earth.



Figura 42. Espacios disponibles en planta para la ubicación de equipos

El terreno presenta una ligera variación en su elevación, pero es mayormente plano en las áreas donde están ubicadas las instalaciones de la planta y donde se prevé instalar los equipos implementados. Las áreas circundantes a la potabilizadora de Miraflores están en su mayoría cubiertas por árboles, los cuales crean una especie de barrera natural alrededor de la planta, lo que la hace una zona no residencial. Los suelos son relativamente firmes y están compuestos por arcillas y limos. Debido a las condiciones del suelo, no serán necesarios trabajos previos para la adecuación del terreno.

Para el almacenamiento y entrega de fangos generados en el espesador, se ha previsto utilizar la zona bordeada en la Figura 43 para facilitar la descarga en el camión de entrega. Se cuenta con un área de 1.965,25 m².



Figura 43. Espacio disponible para el almacenamiento y entrega de fangos

7. GESTIÓN DE RESIDUOS PROPUESTA

7.1. Filtros de arena, grava y antracita

Los medios filtrantes, al alcanzar su ciclo de vida de 10 años, actualmente se envían a un vertedero. Sin embargo, estos materiales pueden ser reutilizados si se dirigen a empresas del sector de la construcción.

El coste actual de cada filtro es de 68.469,58 \$, lo que equivale a 64.903,16 €. Al utilizar 20 filtros en la potabilizadora de Miraflores, el coste total de su reemplazo asciende a 1.369.391,60 \$ (1.298.063,04 €) cada 10 años. Este coste se ha determinado teniendo en cuenta los materiales indicados en la Figura 16 y los precios de la Figura 40, información que ha sido proporcionada por Marcos Odens, jefe actual de la potabilizadora, y teniendo en cuenta que 1MTn = 2.200 lb.

Antacita Graduada	1 Mtn	\$1,385.85
Arena Graduada	1 Mtn	\$ 604.92
Grava 1/16"-1/8"	1 Mtn	\$895.88
Grava 1/8"-1/4"	1 Mtn	\$878.10
Grava 1/4"-1/2"	1 Mtn	\$757.66
Grava 1/2"-1"	1 Mtn	\$735.00
Grava 1/2"-1"	1 Mtn	\$735.00
Grava 1"-2"	1 Mtn	\$1015.36

Figura 40. Precio por tonelada métrica (Mtn) de arena, grava y antracita

Fuente: Datos facilitados por Marcos Odens, jefe de la planta potabilizadora de Miraflores, 2024

Al cumplir los filtros su vida útil, se propone que los materiales de los medios filtrantes (arena, grava y antracita) sean destinados a empresas de construcción, donde se podrán reutilizar. Debido al desgaste y al tiempo de uso, se ha decidido ofrecer los materiales a un precio reducido: 50% inferior a su precio original.

El precio de venta se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Precio de venta} = 1.369.391,6 \$ \times (1 - 0,5) = 684.695,50 \$ \quad (64)$$

7.2. Lodos generados en los espesadores

Actualmente los lodos generados en la potabilizadora se descargan en fuentes superficiales cercanas, contaminando y causando daños a la vida acuática, además de contribuir indirectamente a emisiones de CO₂ (por la descomposición de materia orgánica en condiciones anaeróbicas se libera metano, gas de efecto invernadero más potente que el CO₂).

Los lodos generados en el espesador se clasifican como lodos líquidos debido a que contienen menos de un 25% de sólidos totales [25]. Según el reglamento técnico 'Agua, Usos y Disposición final de lodos' emitido por la Comisión Panameña de Normas Industriales y Técnicas (COPANIT), los lodos líquidos se pueden emplear para las siguientes finalidades en el país: fertilización de empastadas, estabilización de suelos y aditivos para mejorar las condiciones físicas de suelos.

Panamá cuenta con regiones como Herrera, Los Santos y Coclé en las que los suelos presentan problemas de inestabilidad debido a la sequía prolongada, erosión y falta de prácticas agrícolas sostenibles. Por esta razón, los fangos líquidos espesados se emplearán para la estabilización de suelos y aditivos, lo que contribuirá a mejorar la cohesión del suelo recuperando áreas degradadas.

7.3. Agua clarificada de los espesadores

El agua clarificada de los espesadores se recirculará a cabecera de planta. Cuando se esté efectuando la recirculación, esto permitirá reducir el consumo de agua cruda entre 0,4-1,8%, dependiendo del caudal de agua que se esté recirculando (Tabla 19). El ahorro de agua no es muy importante, pero con esta acción la potabilizadora contribuye a una economía circular.

8. ESTUDIO ECONÓMICO

El presente estudio económico tiene como objetivo evaluar la viabilidad financiera de la implementación simultánea de los equipos propuestos: generador de ozono, espesador de fangos y paneles solares.

8.1. Análisis de los beneficios/ahorros

A continuación, se analizan los posibles beneficios y ahorros que se pueden conseguir al implantar los nuevos equipos en la potabilizadora de Miraflores.

- Paneles solares

Actualmente la tarifa de electricidad en la planta es de 0,165 \$/kWh (0,155 €/kWh). Por tanto, el coste anual actual de electricidad en la planta potabilizadora sin la implementación de los equipos nuevos es el siguiente:

$$\text{Coste}_{\text{electricidad}} \left(\frac{\$}{\text{año}} \right) = 31.368 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \times 0,165 \frac{\$}{\text{kWh}} = 5.175,72 \frac{\$}{\text{año}} \quad (65)$$

Si no se utilizaran paneles solares, el coste anual de electricidad con la implementación de los nuevos equipos ascendería a:

$$\text{Coste}_{\text{sin paneles}} \left(\frac{\$}{\text{año}} \right) = 814.853 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \times 0,165 \frac{\$}{\text{kWh}} = 134.450,74 \frac{\$}{\text{año}} \quad (66)$$

Con el uso de paneles solares, la energía a pagar anualmente será la cantidad de energía no cubierta por los paneles solares. La cantidad de energía no cubierta se determina del siguiente modo:

$$\text{Energía no cubierta} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right) = \text{Energía consumida}_{\text{planta}} - \text{Energía generada}_{\text{paneles}} \quad (67)$$

Sustituyendo los valores, se tiene:

$$\text{Energía no cubierta} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right) = 814.853 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} - 756.597 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} = 58.256 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \quad (68)$$

Multiplicando por la tarifa de la red eléctrica actual (0,165\$/kWh), el coste anual de energía a pagar en la planta potabilizadora sería:

$$\text{Coste_con paneles} \left(\frac{\$}{\text{año}} \right) = 58.256 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \times 0,165 \frac{\$}{\text{kWh}} = 9.612,24 \frac{\$}{\text{año}} \quad (69)$$

El ahorro anual al utilizar paneles solares se calcula como la diferencia entre el costo sin paneles y el costo con paneles:

$$\text{Ahorro_con paneles} \left(\frac{\$}{\text{año}} \right) = 134.450,74 \frac{\$}{\text{año}} - 9.612,24 \frac{\$}{\text{año}} = 124.838,50 \frac{\$}{\text{año}} \quad (70)$$

En resumen, al implementar un espesador de fangos y un generador de ozono en planta, los costos de energía anuales ascenderían de 5.175,72 \$/año a 134.450,74 \$/año si no se utilizan paneles solares. Sin embargo, al utilizar estos, se ha detallado en el apartado 5.3 *Dimensionamiento de los paneles solares* que se cubre un 94,65% de la demanda energética en la planta, incluyendo los equipos implementados lo que implica que el importe energético anual a pagar en la planta descendería de 134.450,74 \$/año a 9.612,24 \$/año.

En la Tabla 30 se presenta un resumen de las posibles situaciones.

Tabla 30. Consumo energético anual y coste asociado para distintas situaciones

Situación	Consumo energético (kWh/año)	Coste anual de energía (\$/año)
Actual (sin implementaciones)	31.368	5.175,72
Implementación de equipos sin paneles solares	814.853	134.450,74
Implementación de equipos con paneles solares	814.853	9.612,24

Fuente: Elaboración propia

Si se plantea la tercera situación de la Tabla 30, habrá un **incremento de 4.436,52 \$/año** (4.170 €/año) con respecto a la situación actual. Sin embargo, al optar por implementar estos equipos, se contribuye a la sostenibilidad en la planta, generando además ahorros en otras áreas de la potabilizadora como se detallará a continuación.

Por otro lado, al decidir incorporar los nuevos equipos, es muy favorable implementar los paneles solares ya que para el mismo consumo energético anual se ahorran 124.838,50 \$/año.

- Generador de ozono

La implementación del generador de ozono tiene efectos beneficiosos en el pretratamiento del agua, en la etapa de coagulación y en la etapa de filtración. A continuación, se analizan estos procesos.

✓ *Pretratamiento*

En la potabilizadora de Miraflores se utilizan actualmente 20 tanques de cloro al mes, cada uno con una capacidad de 2.200 lb (1.000 kg). El precio del cloro es de 0,60 \$/lb, equivalente a aproximadamente 0,57 €/lb. Teniendo en cuenta esto, se calcula el coste mensual de cloro en la potabilizadora de la siguiente forma:

$$\text{Consumo cloro} \left(\frac{\text{lb}}{\text{mes}} \right) = 20 \frac{\text{tanques}}{\text{mes}} \times 2.200 \frac{\text{lb}}{\text{tanque}} = 44.000 \frac{\text{lb}}{\text{mes}} \quad (71)$$

$$\text{Coste cloro} \left(\frac{\$}{\text{mes}} \right) = 44.000 \frac{\text{lb}}{\text{mes}} \times 0,60 \frac{\$}{\text{lb}} = 26.400 \frac{\$}{\text{mes}} \quad (72)$$

El generador de ozono reemplaza el uso de cloro en el pretratamiento. En esta etapa, se utiliza una mayor cantidad de cloro que en la etapa final ya que el pretratamiento requiere desinfección y oxidación de materia orgánica y contaminantes, mientras que en la etapa final el cloro solo evita la recontaminación en la distribución, con concentraciones máximas de 0,5 ppm.

Se asumirá que el 60% del cloro se utiliza en el pretratamiento, mientras que el 40% restante se destina a la etapa final.

Si el cloro se emplea únicamente en la etapa final, la cantidad de cloro necesaria sería:

$$\text{Consumo cloro}_{\text{etapa final}} \left(\frac{\text{lb}}{\text{mes}} \right) = 44.000 \frac{\text{lb}}{\text{mes}} \times 0,4 = 17.600 \frac{\text{lb}}{\text{mes}} \quad (73)$$

Por lo que el nuevo costo mensual de cloro en la potabilizadora será:

$$\text{Nuevo coste cloro} \left(\frac{\$}{\text{mes}} \right) = 17.600 \frac{\text{lb}}{\text{mes}} \times 0,60 \frac{\$}{\text{lb}} = 10.560 \frac{\$}{\text{mes}} \quad (74)$$

Esto genera el siguiente ahorro mensual y anual:

$$\text{Ahorro cloro mensual } \left(\frac{\$}{\text{mes}} \right) = 26.400 \frac{\$}{\text{mes}} - 10.560 \frac{\$}{\text{mes}} = 15.840 \frac{\$}{\text{mes}} \quad (75)$$

$$\text{Ahorro cloro anual } \left(\frac{\$}{\text{año}} \right) = 15.840 \left(\frac{\$}{\text{mes}} \right) \times 12 \frac{\text{meses}}{\text{año}} = 190.080 \frac{\$}{\text{año}} \quad (76)$$

En resumen, la implementación del generador de ozono en el pretratamiento reduce significativamente el uso de cloro (60%), **ahorrando 190.080 \$/año** (180.023 €/año) mientras se mejora la sostenibilidad en la planta.

✓ *Coagulación*

Como se ha mencionado en el apartado 3.1.1. *Etapas del proceso*, en la etapa de coagulación se dosifican 4,81 L/min de coagulante sulfato de aluminio en cada rotámetro (3) para tratar la demanda de agua diaria en la potabilizadora (166.558 m³/día). El precio del coagulante es de 640 \$ por tonelada métrica (Tm) equivalente a 616 € por tonelada métrica aproximadamente. A continuación, se determina el coste mensual de coagulante actual en la potabilizadora.

Debido a que cada rotámetro inyecta 4,81 L/min, la cantidad de coagulante utilizada diariamente en la potabilizadora es:

$$\text{Consumo coagulante } \left(\frac{\text{L}}{\text{día}} \right) = 4,81 \frac{\text{L}}{\text{min}} \times 3 \times 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \times \frac{24 \text{ h}}{\text{día}} = 20.779,20 \frac{\text{L}}{\text{día}} \quad (77)$$

Utilizando como densidad del coagulante 1,33 kg/L, se tiene:

$$\text{Consumo coagulante } \left(\frac{\text{Tm}}{\text{día}} \right) = 20.779,2 \frac{\text{L}}{\text{día}} \times 1,33 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \times \frac{1 \text{ Tm}}{1000 \text{ kg}} = 27,64 \frac{\text{Tm}}{\text{día}} \quad (78)$$

$$\text{Consumo coagulante } \left(\frac{\text{Tm}}{\text{mes}} \right) = 27,64 \frac{\text{Tm}}{\text{día}} \times 30 \text{ días} = 829,20 \frac{\text{Tm}}{\text{mes}} \quad (79)$$

De esta manera, el coste mensual de coagulante se determina de la siguiente forma:

$$\text{Coste coagulante } \left(\frac{\$}{\text{mes}} \right) = 829,2 \frac{\text{Tm}}{\text{mes}} \times 640 \frac{\$}{\text{Tm}} = 530.688 \frac{\$}{\text{mes}} \quad (80)$$

En el apartado 4.1.3 *Ubicación de la ozonización en la potabilizadora*, se ha mencionado que al tratar el agua con ozono antes de la etapa de coagulación, es posible ahorrar hasta un 25% de coagulante. Debido a que el generador de ozono se ha ubicado en la etapa de aireación, previa a

la de coagulación, se procede a determinar el nuevo consumo de coagulante a utilizar en la potabilizadora:

$$\text{Nuevo consumo coagulante } \left(\frac{\text{Tm}}{\text{mes}}\right) = 829,2 \frac{\text{Tm}}{\text{mes}} \times (1 - 0,25) = 621,9 \frac{\text{Tm}}{\text{mes}} \quad (81)$$

$$\text{Nuevo coste coagulante } \left(\frac{\$}{\text{mes}}\right) = 621,9 \frac{\text{Tm}}{\text{mes}} \times 640 \frac{\$}{\text{mtn}} = 398.016 \frac{\$}{\text{mes}} \quad (82)$$

Con el nuevo coste de coagulante, se genera el siguiente ahorro mensual y anual:

$$\text{Ahorro coagulante mensual } \left(\frac{\$}{\text{mes}}\right) = \text{Coste coagulante } \left(\frac{\$}{\text{mes}}\right) - \text{Nuevo coste coagulante } \left(\frac{\$}{\text{mes}}\right) \quad (83)$$

Sustituyendo los valores,

$$\text{Ahorro coagulante mensual } \left(\frac{\$}{\text{mes}}\right) = 530.688 \frac{\$}{\text{mes}} - 398.016 \frac{\$}{\text{mes}} = 132.672 \frac{\$}{\text{mes}} \quad (84)$$

$$\text{Ahorro coagulante anual } \left(\frac{\$}{\text{año}}\right) = 132.672 \left(\frac{\$}{\text{mes}}\right) \times 12 \frac{\text{meses}}{\text{año}} = 1.592.064 \frac{\$}{\text{año}} \quad (85)$$

En resumen, al reducir el uso de coagulante un 25%, se consigue un significativo **ahorro anual de 1.592.064 \$/año** (aproximadamente 1.536.500 €/año).

✓ *Filtración*

En cuanto a la etapa de filtración, los filtros tienen una vida útil de 10 años y se lavan 15 veces al mes, utilizando un volumen de 757 m³ de agua por lavado para los 20 filtros. Esto implica un consumo mensual total de aproximadamente 11.355 m³ de agua para el retrolavado.

Con la implementación del generador de ozono, la frecuencia de los retrolavados se reduce debido a la mayor eficacia de oxidación de la materia orgánica en el pretratamiento, lo cual previene la formación de biofilm en los filtros. Se asume que el ozono reduce el número de lavados a la mitad por lo que, con el generador de ozono en funcionamiento en la planta, el retrolavado de filtros se llevará a cabo aproximadamente 7 veces al mes.

De esta manera, el consumo de agua mensual utilizado para el retrolavado de filtros sería 5.299 m³/mes, siendo el ahorro mensual y anual de agua el siguiente:

$$\text{Ahorro agua} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{mes}} \right) = 11.355 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}} - 5.299 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}} = 6.056 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}} \quad (86)$$

$$\text{Ahorro agua anual} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right) = 6.056 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}} \times 12 \frac{\text{meses}}{\text{año}} = 72.672 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \quad (87)$$

Debido a la reducción en la frecuencia de retrolavados, se espera un menor desgaste en los filtros y, por lo tanto, un aumento en su vida útil. Se asumirá un aumento del 40% en la vida útil de los filtros:

$$\text{Aumento}_{\text{vida útil filtros}}(\text{años}) = 10 \text{ años} \times 1,4 = 14 \text{ años} \quad (88)$$

Al finalizar la vida útil de los filtros, estos se destinan a la venta a empresas de construcción. Por lo tanto, se considera un ingreso proyectado cada 14 años de 684.695,50 \$ (649.070,79 €), como se ha detallado en el apartado 7. *Gestión de residuos propuesta*, asumiendo que la venta se realiza de manera efectiva. Este ingreso, si se repartiera entre 14 años, equivaldría a un **ingreso anual de 48.906,82 \$/año** (45.972,41 €/año).

Por otro lado, si la substitución de los filtros cuesta en total 1.369.391,60 \$, cuando se hacía cada 10 años equivalía a un coste anual de 136.939,16 \$/año; en cambio, si ahora se hace cada 14 años, el coste anual sería de 97.813,69 \$/año. Esto supone un **ahorro de 39.125,47 \$/año**.

En resumen, al implementar el generador de ozono en la planta, no solo se logra una mejor calidad del agua, sino también un ahorro anual significativo en la cantidad de cloro utilizado en planta, un considerable ahorro de agua para el retrolavado y una extensión de la vida útil de los filtros.

- Espesador de fangos

Con el espesador de fangos, se reintroduce agua clarificada a la planta, lo que puede generar un ahorro en la demanda de recursos hídricos naturales y, al mismo tiempo, reducir los costes operativos relacionados con la captación de agua cruda. Se ha detallado en el apartado 5.2 *Diseño del espesador de fangos* que el agua clarificada, proveniente del espesador y del tanque de hormigón con fondo inclinado, se puede recircular a cabecera de planta ya que, al mezclarse con el agua cruda, la concentración resultante es del mismo orden de magnitud que la concentración de entrada del agua cruda.

En la planta se tratan 166.558 m³/día, equivalente a 60.793.670 m³/año. Para determinar el coste de captación actual, se asumirá que el precio de captación es un 20% del precio de venta de agua tratada, el cual es de 0,281 \$/m³:

$$\text{Precio}_{\text{captación}} = 0,281 \frac{\$}{\text{m}^3} \times 0,20 = 0,06 \frac{\$}{\text{m}^3} \quad (89)$$

$$Coste_{captación\ actual} = 60.793.670 \frac{m^3}{año} \times 0.06 \frac{\$}{m^3} = 3.647.620,20 \frac{\$}{año} \quad (90)$$

Para determinar el coste de captación anual, recirculando el agua clarificada proveniente del espesador y del tanque con fondo inclinado, se utilizan los datos de la Tabla 31.

Tabla 31. Caudal de agua clarificada y días de operación de equipos

Equipo	Procedencia del lodo	Caudal agua clarificada	Días de operación al mes
Espesador	Tinas de sedimentación	Qw1 = 682,0 m ³ /d	30
Tanque de fondo inclinado	Lavado tinas de sedimentación	Qw2 = 712,8 m ³ /d	4
Tanque de fondo inclinado	Retrolavado de filtros	Qw3 = 2.943,5 m ³ /d	7

Fuente: Elaboración propia

El volumen de agua recirculada al mes se determina multiplicando el caudal de agua clarificada por los días de operación de cada equipo (espesador y tanque con fondo inclinado), resultando:

$$Q_{recirculado} \left(\frac{m^3}{mes} \right) = Q_{w1} \times t_1 (d) + Q_{w2} \times t_2 (d) + Q_{w3} \times t_3 (d) \quad (91)$$

$$Q_{recirculado} \left(\frac{m^3}{mes} \right) = 682 \frac{m^3}{d} \times 30d + 712,8 \frac{m^3}{d} \times 4d + 2.943,5 \frac{m^3}{d} \times 7d = 43.915,7 \frac{m^3}{mes} \quad (92)$$

Siendo el caudal de agua recirculado anual:

$$Q_{recirculado} \left(\frac{m^3}{año} \right) = 43.915,7 \frac{m^3}{mes} \times 12 \frac{meses}{año} = 526.988,4 \frac{m^3}{año} \quad (93)$$

Por lo que el nuevo caudal de agua cruda necesario es:

$$Q_{agua\ cruda_nuevo} \left(\frac{m^3}{año} \right) = Q_{agua\ cruda_actual} \left(\frac{m^3}{año} \right) - Q_{recirculado} \left(\frac{m^3}{año} \right) \quad (94)$$

$$Q_{agua\ cruda_nuevo} \left(\frac{m^3}{año} \right) = 60.793.670 \left(\frac{m^3}{año} \right) - 526.988,4 \left(\frac{m^3}{año} \right) = 60.266.681,6 \frac{m^3}{año} \quad (95)$$

El nuevo coste de la captación de agua cruda será:

$$Coste_{captación\ nuevo} = 60.266.681,6 \frac{m^3}{año} \times 0.06 \frac{\$}{m^3} = 3.616.620,90 \frac{\$}{año} \quad (96)$$

Por tanto, el ahorro anual en la captación del agua cruda vendrá dado por la diferencia entre el coste actual y el que se acaba de calcular:

$$\text{Ahorro agua cruda} \left(\frac{\$}{año} \right) = 3.647.620,20 \frac{\$}{año} - 3.616.000,90 \frac{\$}{año} = 31.619,30 \frac{\$}{año} \quad (97)$$

Se concluye que el uso de espesadores de fango en la potabilizadora que permiten recircular el agua clarificada a cabecera de planta supone un **ahorro de 31.619,30 \$/año**.

8.2. Análisis de los costes adicionales

A continuación, se detallan los costes adicionales que supone la implementación de los nuevos equipos en la potabilizadora de Miraflores.

- Costes energéticos

Los nuevos equipos a implementar generan unos costes energéticos, los cuales se especifican en la Tabla 32.

Tabla 32. Costes energéticos de los equipos nuevos

Equipo	Unidades	Consumo anual (kWh/año)	Coste anual (\$/año)
Generador de ozono	1	719.550	118.725,75
Espesador de fangos		48.440	7.992,60
Bomba de cavidad progresiva (Q = 160 m ³ /d)	1	1.435	236,78
Bomba de cavidad progresiva (Q = 167,4 m ³ /d)	1	1.454	239,91
Bomba de cavidad progresiva (Q = 690,5 m ³ /d)	1	3.917	664,31
Bomba centrífuga (Q = 682 m ³ /d)	1	2.376	392,04
Bomba centrífuga (Q = 2.943,5 m ³ /d)	1	6.313	1.041,65
TOTAL		783.485	129.275,03

Fuente: Elaboración propia

El dimensionamiento y cálculo del consumo de las bombas se han realizado utilizando la página web de Grundfos [26], una empresa especializada en soluciones de bombeo, que permite dimensionar bombas en función de parámetros como el caudal, altura y otros factores relevantes en función de la bomba escogida.

- Costes de reactivos

El generador de ozono consume reactivos que conllevan un coste.

Según las especificaciones del generador de ozono seleccionado, se necesitan 377.280 m³ LOX/año y 639,60 m³ refrigerante/d debido a que el equipo de ozono seleccionado requiere 31,2 m³/h y el generador de ozono está en funcionamiento 20,5 horas al día. Esta cantidad de refrigerante se recircula a lo largo del año, es decir, no es necesario utilizar esta cantidad de refrigerante diariamente, aunque se exprese la cantidad en m³/d.

En la Tabla 33 se detallan los costes de estos reactivos.

Tabla 33. Costes de reactivos de los equipos nuevos

Reactivos	Cantidad requerida	Tanques necesarios	Precio unitario (\$/m ³)	Coste anual (\$/año)
Oxígeno líquido (LOX)	377.280 (m ³ /año)	431	0,125	47.160
Refrigerante agua de ósmosis + glicol	639,60 (m ³ /día)	---	50	31.980
TOTAL				79.140

Fuente: Elaboración propia

- Costes de personal

La implementación y operación de los nuevos equipos requiere la contratación de un ingeniero químico, cuyos costes asociados se especifican en la Tabla 34.

Tabla 34. Costes de personal para los equipos nuevos

Personal	Nº personas	h/año	Salario base (\$/h)	Coste anual (\$/año)
Graduado en Ingeniería Química	1	1.920	20	38.400
TOTAL				38.400

Fuente: Elaboración propia

- Costes de mantenimiento

Por último, todos los equipos requieren un mantenimiento. Para determinar los costes asociados, se asume que el coste de mantenimiento es el 10% del coste total de cada equipo. En la Tabla 35 se resumen estos costes.

Tabla 35. Costes de mantenimiento para los equipos nuevos

Equipo	Coste equipo (\$)	Coste mantenimiento anual (\$/año)
Generador de ozono	66.923,20	6.692,32
Espesador de fangos	369.617,03	36.961,70
Paneles solares	285.097,10	28.509,71
TOTAL		72.163,73

Fuente: Elaboración propia

8.3. Balance económico

Los beneficios/ahorros que supone la implementación de los nuevos equipos, así como los costes adicionales asociados, se resumen en la Tabla 36.

Tabla 36. Balance económico de la implementación de los equipos nuevos

Concepto	Beneficio/ahorro (\$/año)	Coste adicional (\$/año)
Costes energéticos	124.838,50	129.275,03
Consumo de cloro	190.080,00	
Consumo de coagulante	1.592.064,00	
Venta materiales filtros	48.906,82	
Recambio filtros	39.125,47	
Captación de agua cruda	31.619,30	
Costes de reactivos		79.140,00
Costes de personal		38.400,00
Costes de mantenimiento		72.163,73
TOTAL	2.026.634,09	318.978,76

A partir de los datos de la Tabla 36 se calcula la diferencia entre los beneficios/ahorros y los costes adicionales que supone la implementación de los nuevos equipos en la potabilizadora de Miraflores, siendo esta diferencia el beneficio promedio actual:

$$\begin{aligned} \text{Beneficio promedio actual} \left(\frac{\$}{\text{año}} \right) &= \text{Beneficios/ahorros} \left(\frac{\$}{\text{año}} \right) - \text{Costes adicionales} \left(\frac{\$}{\text{año}} \right) = \\ &= 2.026.634,09 \frac{\$}{\text{año}} - 318.978,76 \frac{\$}{\text{año}} = 1.707.655,33 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned} \quad (98)$$

Como puede verse, la implementación de los nuevos equipos, además de contribuir a la sostenibilidad de la potabilizadora, conlleva un balance económico positivo suponiendo un ahorro de **1.707.655,33 \$/año** en los costes anuales de la planta.

Con este dato y conocido el coste del proyecto (ver *Documento II. Presupuesto*), se puede calcular el periodo de retorno de la inversión (PRI) o *payback*, suponiendo constante el beneficio promedio actual:

$$\text{PRI (años)} = \frac{\text{Inversión inicial} (\$)}{\text{Beneficio promedio actual} \left(\frac{\$}{\text{año}} \right)} = \frac{876.133,74 (\$)}{1.707.655,33 \left(\frac{\$}{\text{año}} \right)} = 0,51 \text{ años} \quad (99)$$

Así pues, se prevé que la recuperación de la inversión tendrá lugar en poco más de 6 meses, lo cual supone un gran incentivo para llevar a cabo este proyecto.

9. CONCLUSIONES

Debido a la preocupación existente por el acelerado cambio climático y considerando los avances tecnológicos desarrollados desde la última modificación llevada a cabo en la potabilizadora de Miraflores en 1942, hace más de 8 décadas, con este trabajo de fin de grado se proponen una serie de actualizaciones para una operación más sostenible en la planta, lo cual lleva a la reducción del uso de químicos tóxicos, la conservación del agua, el uso de energías renovables y una reutilización de residuos adecuada.

Para poder plantear las propuestas de mejora, se ha estudiado el proceso de potabilización, la calidad del agua a tratar y la infraestructura en la planta potabilizadora de Miraflores. Tras el análisis, se ha propuesto la instalación de un generador de ozono, un espesador de fangos y paneles solares.

- Para reducir el uso de cloro en la potabilizadora, causante de formación de subproductos cancerígenos, se ha diseñado un generador de ozono el cual opera con oxígeno líquido. Este equipo se ha integrado satisfactoriamente en la planta cercano a la etapa de aireación, donde realizará su función como oxidante y desinfectante. Además, se han implementado sensores que miden la concentración del ozono en el agua para asegurar el correcto funcionamiento del ozono y sensores que miden la concentración de ozono en el aire a lo largo de la tina de aireación para asegurar la seguridad de los operarios. Este equipo disminuye la frecuencia de lavado de los medios filtrantes y, por lo tanto, aumenta la vida útil de los mismos.
- Para evitar la contaminación de fuentes superficiales cercanas y conservar el agua se ha diseñado un espesador de fangos dinámico que operará en continuo para los fangos provenientes de las tinas de sedimentación, y un espesador de fangos estático para tratar el agua de retrolavado de los medios filtrantes y el agua de lavado de tinas de sedimentación. El agua clarificada se recirculará a cabecera de planta y los lodos generados se utilizarán para la estabilización de suelos, lo que mejorará la cohesión del suelo en ciertas regiones de Panamá.
- Para utilizar energías renovables se ha aprovechado toda la superficie de techos disponible en la planta para implementar paneles solares, los cuales cubren un 93% del consumo energético de la planta (teniendo en cuenta el incremento del consumo energético por parte de los nuevos equipos a implementar), lo que genera ahorros energéticos anuales importantes.
- Finalmente, para evitar la disposición de medios filtrantes de arena, grava y antracita en vertedero, se ha optado por su venta a empresas de construcción una vez cumplida su nueva vida útil, a la mitad de su importe original.

Con la implementación de todos estos equipos y la nueva gestión de los residuos de la planta, la potabilizadora generará unos beneficios anuales de 2.026.634,09 \$/año frente a unos costes adicionales de \$318.978,76, resultando en un beneficio neto de 1.707.655,33 \$/año. Esto permite recuperar la inversión en un plazo estimado de 6 meses, haciendo el proyecto muy atractivo a la vez que se mejora la sostenibilidad al evitar corrientes de rechazo, reutilizar materias primas y generar energía renovable, cumpliendo con los objetivos propuestos inicialmente.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). *Mwh's water treatment: Principles and design*. John Wiley & Sons, Incorporated.
- [2] Randtke, S. J., & Horsley, M. B. (2020). *Water treatment plant design* (5th ed.). American Water Works Association.
- [3] De La Cruz Cabrera, V., Taylor, F., & Farnum, F. (2020). *Calidad y disponibilidad del recurso hídrico del Lago Gatún*, Provincia de Colón, República de Panamá.
- [4] Ministerio de Comercio e Industrias. República de Panamá, Resolución No. 35 de 6 de mayo de 2019.
- [5] Rakness, K. L. (2005). *Ozone in Drinking Water Treatment: Process Design, Operation, and Optimization*. American Water Works Association.
- [6] Ozono en el tratamiento del agua. LinkedIn. (n.d.). Recuperado el 20 de junio de 2024 de <https://www.linkedin.com/pulse/ozono-en-el-tratamiento-del-agua-roberto-garcia-gracia/>
- [7] Bataller, M. O., Fernández, L. A., & Véliz, E. (2009). *Eficiencia y sostenibilidad del empleo del ozono en la gestión de los recursos hídricos*. Ingeniería, Investigación y Tecnología.
- [8] Glaze, W. H. (1987). *Drinking-water treatment with ozone*. Journal of the American Water Works Association.
- [9] Zono Sistem (n.d.) Ozone generators: Hydro plants. Zono system. Recuperado el 1 de julio de 2024 de: https://www.zonosistem.com/en_US/shop/category/ozone-generators-hydro-plants-8
- [10] World Health Organization. (2017). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed.). World Health Organization. Recuperado el 4 de julio de 2024 de: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>.
- [11] Membrane Chemicals (n.d.) *Espesamiento de lodos*. Recuperado el 10 de julio de 2024 desde: <https://www.membranechemicals.com/es/water-treatment/espesamiento-de-lodos/>
- [12] Qasim, S.R (2000). *Wastewater Treatment Plants: Planning, Design, and Operation* (2nd ed.) CRC Press
- [13] Hidrometalica. (n.d), *Espesador de fangos*. Recuperado el 20 de julio de 2024 de: <https://www.hidrometalica.com/espesador-de-fangos/>
- [14] Deyma La Mancha (n.d.) Recuperado el 29 de julio de 2024 de: <https://deymalamancha.es/deyma/>

- [15] American Water Works Association. (2012). *Water treatment plant design* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- [16] Pérez de la Cruz, F. J. (n.d.). *Tratamiento de fangos* [Archivo de PowerPoint]. Universidad Politécnica de Cartagena. Recuperado el 3 de septiembre de 2024 de: https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/12618/mod_resource/content/2/Tema%2007%20TRAT%20DE%20FANGOS.pdf
- [17] Solargis World Bank Group & International Solar Alliance (n.d). Global Solar Atlas. Recuperado el 5 de septiembre de 2024 de: <https://globalsolaratlas.info/map>
- [18] Robles Maldonado, S. F. *Generador de ozono para una planta de tratamiento de agua en piscinas recreativas y terapéuticas* Recuperado el 8 de septiembre de 2024 de: <https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/5637/8/ARTICULO.pdf>
- [19] Hach. Sensor de ozono amperométrico. Recuperado el 16 de septiembre de 2024 de: <https://es.hach.com/ozone/9185-sc-sensor-de-ozono-amperometrico/family?productCategoryId=24801568570>
- [20] Prana Air. Sensor de calidad del aire: Sensor de ozono (O₃). Recuperado el 16 de septiembre de 2024 de: <https://www.pranaair.com/es/air-quality-sensor/ozone-o3-sensor/>
- [21] Asensi Dasí, E. J. (2010). Espesador por gravedad. Recuperado el 28 de septiembre de: <http://hdl.handle.net/10251/7541>
- [22] ProdecetS. Bomba de cavidad progresiva Seepex. Recuperado el 5 de octubre de 2024 de: <https://www.pranaair.com/es/air-quality-sensor/ozone-o3-sensor/>
- [23] AutoSolar. Estructura Paneles Solares. Recuperado el 20 de octubre de 2024 de: <https://autosolar.es/estructura-paneles-solares>
- [24] Ministerio de Comercio e Industria de Panamá. Código Eléctrico Nacional (NEC). Recuperado el 16 de noviembre de 2024 de: <https://mici.gob.pa/>
- [25] Ministerio de Comercio e Industrias. (2000). Reglamento técnico DGNTI-COPANIT Resolución N°352, AGUA. USOS Y DISPOSICIÓN FINAL DE LODOS. República de Panamá. Recuperado el 25 de noviembre de: <https://www.cnpml.org.pa/images/nosotros/agua/r-t-47.pdf>
- [26] Grundfos. Soluciones de bombas y sistemas de bombeo. Recuperado el 2 de diciembre de 2024 de: <https://www.grundfos.com/es>

DOCUMENTO II.
PRESUPUESTO

1. INTRODUCCIÓN

Una vez realizado el diseño de los equipos a implementar, se detalla en este documento el presupuesto total necesario para llevar a cabo el proyecto. Este se compone de cuatro presupuestos parciales, siendo los siguientes:

- Presupuesto del generador de ozono.
- Presupuesto del espesador de fangos.
- Presupuesto de los paneles solares.
- Presupuesto de la mano de obra.

Como el proyecto se realiza para una planta potabilizadora ubicada en Panamá, el presupuesto se calculará en dólares en lugar de en euros, ya que se tiene que presentar en dicho país. Además, en Panamá, el impuesto equivalente al IVA (Impuesto sobre el Valor Añadido) se denomina ITMBS (Impuesto de Transferencia de Bienes Muebles y Servicios), el cual corresponde a un 7%; por ello, en este proyecto se aplicará este impuesto en lugar del IVA.

2. PRESUPUESTOS PARCIALES

2.1. Presupuesto del generador de ozono

En la Tabla Presupuesto 1 se detallan los equipos y materiales necesarios para el uso de un generador de ozono en la planta. Se incluye un generador de ozono distribuido por la empresa Zonosistem, detallando los componentes que contiene este.

Tabla Presupuesto 1. Coste de implementación del generador de ozono

Elemento	Modelo	Ud.	Precio unitario (\$)	Precio (\$)
Generador de ozono Sistema de generación de ozono Concentrador de oxígeno Enfriador Sistema de control PLC con pantalla táctil de 7" SIEMENS Sensores de flujo, temperatura y presión de gas resultante y de pérdida de ozono Válvula motorizada para la entrada de oxígeno Válvula proporcional para ajuste automático de flujo Válvula motorizada para la salida de ozono Válvula liberadora de presión	GRV-13EP Zonosistem	1	44.250,00	44.250,00
Inyector Venturi	Mazzei PVDF Ozone Compatible	3	109,97	329,91
Manifold 3 vías	Acero Inoxidable 316L Empaquetadura de Grafoil	1	599,44	599,44
Sensor concentración de ozono en el agua	Sensor Amperométrico de Ozono 9185sc HACH	3	4.113,07	12.339,21
Sensor concentración de ozono en el aire	Sensor de Ozono 50 ppm Prana Air	2	213,23	426,46
Tuberías acero inoxidable	610mm	4	1.150,00	4.600,00
TOTAL				62.545,02

Fuente: Elaboración propia

2.2. Presupuesto del espesador de fangos

La Tabla Presupuesto 2 incluye los equipos y materiales necesarios para la implementación de un espesador de fangos en la potabilizadora. Se ha escogido el espesador circular de lodos Pacific distribuido por la empresa Estruagua, detallándose en la tabla los equipos que lo componen. Se ha incluido además las tuberías y bombas necesarias para el transporte de fangos y agua clarificada.

Tabla Presupuesto 2. Coste de implementación del espesador de fangos

Elemento	Modelo	Ud.	Precio unitario (\$)	Precio (\$)
Espesador de fangos Pasarela estática Eje vertical y brazos de barrido Grupo motriz Barredor de pozos de lodo Campana central de alimentación Aliviadero	Espesador circular de lodos Pacific	1	120.000,00	120.000,00
Tanque rectangular de hormigón fondo inclinado	---	1	30.000,00	30.000,00
Tanque cilíndrico de hormigón Hormigón reforzado Acero de refuerzo Material impermeabilizante Arena Grava	---	1	175.505,00	175.505,00
Tuberías PVC Tubería D=5cm Tubería D=9cm Tubería D=10cm Tubería D=19cm Tubería D=14cm	Tubería de PVC 6m Tubería de PVC 6m Tubería de PVC 6m Tubería de PVC 6m Tubería de PVC 6m	118 118 118 59 59	8,30 16,94 19,10 38,54 22,50	979,40 1.998,92 2.253,80 2.273,86 1.327,50
Bombas Cavidad progresiva ($Q_{s1}=160\text{m}^3/\text{d}$) Cavidad progresiva ($Q_{s2}=167,2\text{m}^3/\text{d}$) Cavidad progresiva ($Q_{s3}=690,5\text{m}^3/\text{d}$) Centrífuga ($Q_{w1}=682\text{m}^3/\text{d}$) Centrífuga ($Q_{w3}=2.943,5\text{m}^3/\text{d}$)	DPK.10.80.22.5.0D DPK.10.80.22.5.0D DPK.10.80.22.5.0D CRE 32-1 P-F-A-E-HQQE CRE 95-1-1 A-F-A-E-HQQE	1 1 1 1 1	1.692,00 1.692,00 9.050,00 8.393,00 20.271,00	1.692,00 1.692,00 9.050,00 8.393,00 20.271,00
TOTAL				375.436,48

Fuente: Elaboración propia

2.3. Presupuesto de los paneles solares

En la Tabla Presupuesto 3 se detallan los equipos y materiales necesarios para la implementación de los paneles solares en la potabilizadora. Se ha escogido la estructura para paneles de la empresa Autosolar, la cual permite el correcto montaje de los paneles en el techo y se han detallado los componentes que contiene la misma. Además, se han incluido los materiales eléctricos necesarios al igual que los correspondientes a puesta a tierra para garantizar un funcionamiento seguro de la instalación.

Tabla Presupuesto 3. Coste de implementación de los paneles solares

Elemento	Modelo	Ud.	Precio unitario (\$)	Precio (\$)
Paneles	Jinko Solar JKM-615N-66HL4M-BDV	961	192,20	184.704,20
Estructura para paneles 2 x Riel de 3,6m aluminio anodizado 2 x Riel de 2,5m aluminio anodizado 2 x U Clamp Falcat (unión) 4 x E Clamp falcat (final) 8 x M Clamp falcat (intermedio) 8 x Soporte teja de barro 2 x Conector de tierra para estructura				
Techo 1 (440 paneles)	Estructura Teja de Barro 5 Panel KHT915	88	194,40	17.107,20
Techo 2 (69 paneles)	Estructura Teja de Barro 5 Panel KHT915	13	194,40	2.527,20
Techo 3 (240 paneles)	Estructura Teja de Barro 5 Panel KHT915	48	194,40	9.331,20
Techo 4 (52 paneles)	Estructura Teja de Barro 4 Panel KHT915	13	174,78	2.272,14
Techo 5 (84 paneles)	Estructura Teja de Barro 4 Panel KHT915	21	174,78	3.670,38
Techo 6 (76 paneles)	Estructura Teja de Barro 4 Panel KHT915	19	174,78	3.320,82

Fuente: Elaboración propia

Tabla Presupuesto 3 (continuación). Coste de implementación de los paneles solares

Elemento	Modelo	Ud.	Precio unitario (\$)	Precio (\$)	
Inversores	Huawei Techonologies SUN2000-115KTL-M2	2	7.845	15.690	
	Huawei Techonologies SUN2000-40 KTL-M3	2	4.388	8.776	
	Huawei Techonologies SUN2000-60KTL-M0	2	5.194	10.388	
	Huawei Techonologies SUN2000-30KTL-M3	1	3.615	3.615	
	Huawei Techonologies SUN2000-50KTL-ZHM3	1	4.608	4.608	
Cableado DC	Cable Solar USE-2 Cu 6 AWG	24	1,80	43,08	
	Cable Solar USE-2 Cu 16 AWG	4	0,34	1,37	
	Cable Solar USE-2 Cu 4 AWG	12	2,68	32,10	
	Cable Solar USE-2 Cu 12 AWG	4	0,45	1,80	
	Cable Solar USE-2 Cu 8 AWG	3	1,15	3,45	
Cableado AC	Cable Solar THHN Cu 6 AWG	3	1,99	5,97	
	Cable Solar THHN Cu 16 AWG	1	28,72	28,72	
	Cable Solar THHN Cu 4 AWG	2	3,28	6,56	
	Cable Solar THHN Cu 12 AWG	1	0,50	0,50	
	Cable Solar THHN Cu 8 AWG	1	1,43	1,43	
Puesta a tierra	Electrodo de puesta a tierra	Varilla Copper Well 1 m	6	4,10	24,60
	Conductor de puesta a tierra	Conductor recubierto de cobre	6	2,53	15,18
	Borne de puesta a tierra	Abrazadera de tierra cobre caja de 6	6	30,00	180,00
	Toma tierra	Pica toma de tierra 1,5m	6	8,70	52,20
	Conductor de protección	Cable de cobre desnudo 35mm líneas toma tierra	6	5,40	32,40
Tubería	Tubería PVC 3/4 eléctrica	6	1,06	6,36	
TOTAL				266.445,86	

Fuente: Elaboración propia

2.4. Presupuesto de la mano de obra

Para determinar el precio de la mano de obra, se ha considerado el salario mínimo establecido por la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial en un contrato de prácticas en empresa, siendo este de 4,6 €/h (4,83 \$/h), obteniéndose en la Tabla Presupuesto 4 el importe correspondiente a la mano de obra.

Tabla Presupuesto 4. Coste de mano de obra

Personal	Horas	Precio unitario (\$/h)	Precio (\$)
Estudiante en Ingeniería Química	300	4,83	1.449
TOTAL			1.449

Fuente: Elaboración propia

3. PRESUPUESTO TOTAL

El presupuesto total del proyecto se calcula sumando los presupuestos parciales, y añadiendo un 10% de gastos generales, un 6% de beneficio industrial y el ITMBS (7%). En la Tabla Presupuesto 5 se muestra el resultado de estos cálculos.

Tabla Presupuesto 5. Importe total del proyecto

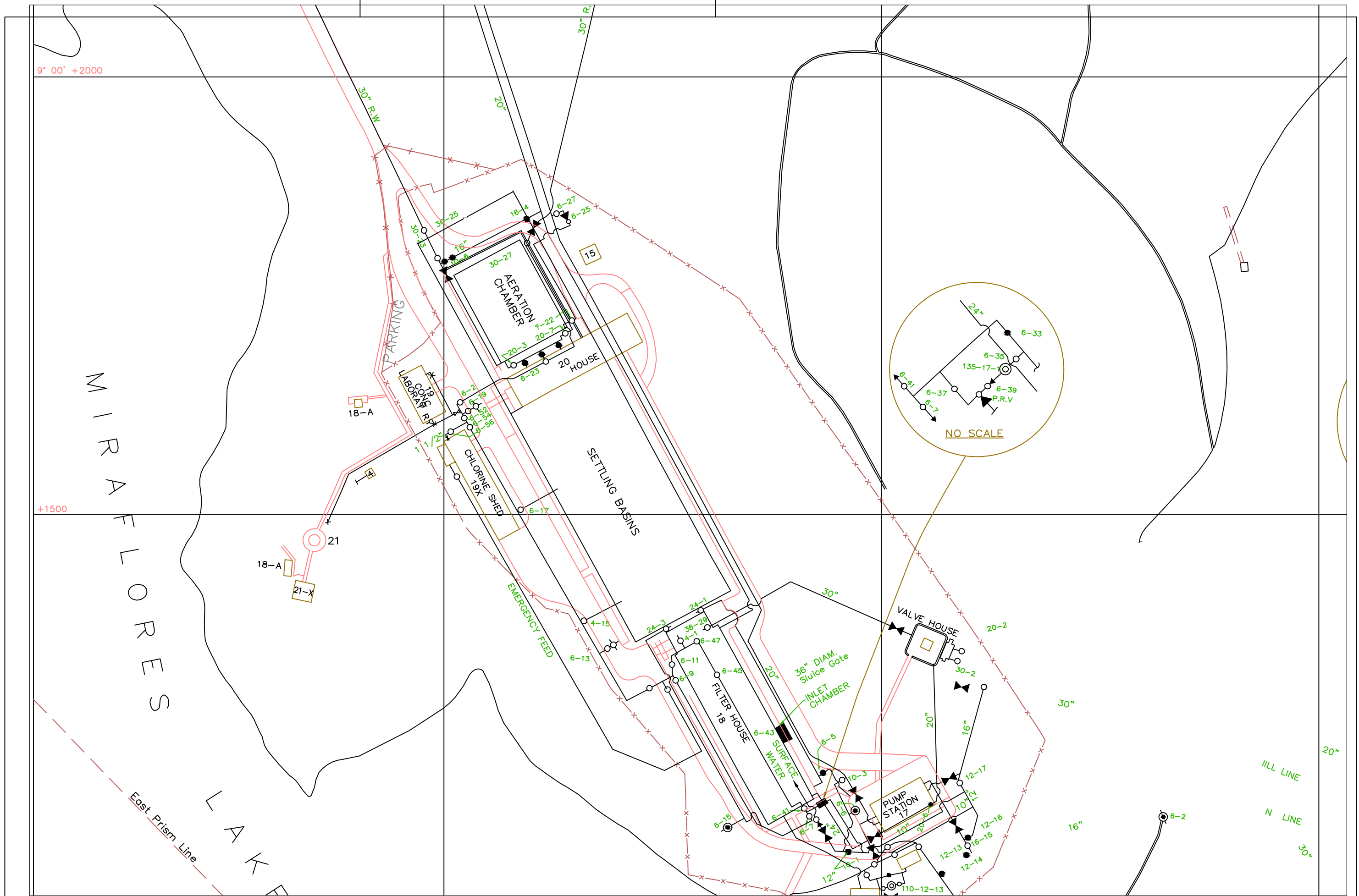
Elemento	Precio (\$)
Generador de ozono	62.545,02
Espesador de fangos	375.436,48
Paneles solares	266.445,86
Mano de obra	1.449,00
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL	705.876,36
Gastos generales (10%)	70.587,64
Beneficio industrial (6%)	42.352,58
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA	818.816,58
ITMBS (7%)	57.317,16
TOTAL	876.133,74


Fuente: Elaboración propia

El presupuesto total del proyecto asciende a **OCHOCIENTOS SETENTA Y SEIS MIL CIENTO TREINTA Y TRES DÓLARES CON SETENTA Y CUATRO CENTAVOS**, que equivale a 842.606,43€.

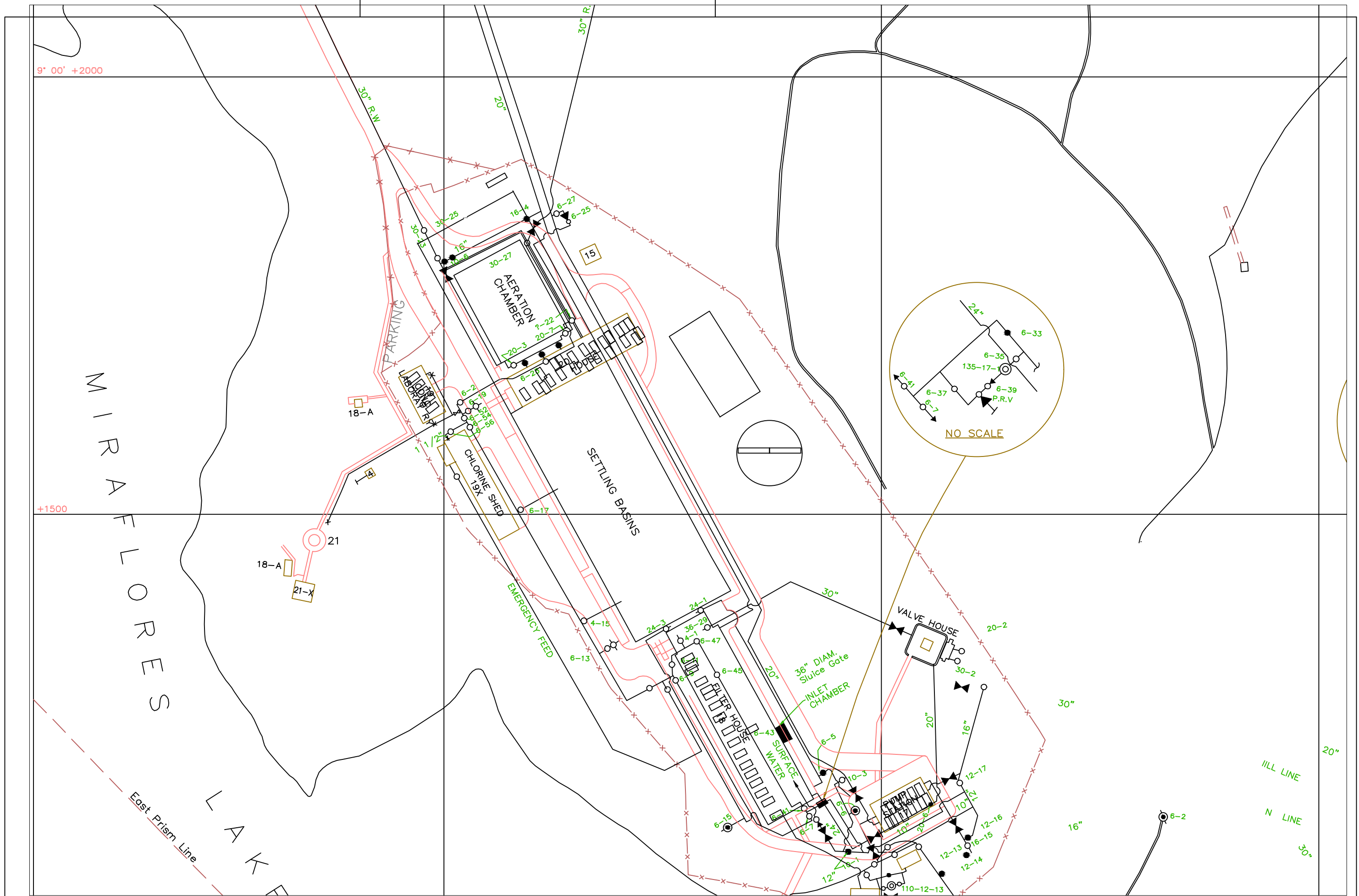
DOCUMENTO III.
PLANOS

1. Plano 01: Distribución en planta de la potabilizadora actual



<p>TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA</p> 	<p>Proyecto: Estudio e implementación de estrategias de actualización para la planta potabilizadora de Miraflores en Panamá, orientadas hacia una gestión más sostenible</p>	<p>Plano: Distribución en planta de la potabilizadora actual</p> <p>Autor: Isabella Sieiro Berbey</p>	<p>Fecha: Enero 2025</p> <p>Escala: 1:1000</p>	<p>Nº Plano: 1</p>
---	--	---	--	--------------------------------

2. Plano 02: Distribución en planta de la potabilizadora con las implementaciones



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA



Proyecto: Estudio e implementación de estrategias de actualización para la planta potabilizadora de Miraflores en Panamá, orientadas hacia una gestión más sostenible

Plano: Distribución en planta de la potabilizadora con las implementaciones
 Autor: Isabella Sieiro Berbey

Fecha: Enero 2025
 Escala: 1:1000

Nº Plano: 2