

**Maestría en Ingeniería Civil**

**Diseño de una PTAR para el Condominio Campestre La Primavera  
y evaluación de la factibilidad de la alimentación con energía  
fotovoltaica**

**Daniel Esteban Sánchez Sánchez**

**Bogotá, D.C., 22 de abril de 2021**



**Diseño de una PTAR para el Condominio Campestre La Primavera  
y evaluación de la factibilidad de la alimentación con energía  
fotovoltaica**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con  
énfasis en ingeniería ambiental**

**Juan Sebastián Salazar Henao**

**Director**

**Bogotá, D.C., 22 de abril de 2021**



La tesis de maestría titulada “Diseño de una PTAR para el Condominio Campestre La Primavera y evaluación de la factibilidad de la alimentación con energía fotovoltaica”, presentada por Daniel Esteban Sánchez Sánchez, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en ingeniería ambiental.

Director de la tesis

Juan Sebastián Salazar Henao

Jurado

Amalia Avendaño Sánchez

Jurado

María Paulina Villegas De Brigard

Bogotá, D.C., día de mes de año (fecha de aceptación del trabajo por parte del jurado)

## **Dedicatoria**

**Este trabajo ha sido desarrollado gracias a mi familia, la cual ha estado de forma incondicional, este esfuerzo y dedicación no hubieran sido suficientes sin la ayuda de mi madre Martha Libia Sánchez García, así como mi padre Harold Efrén Sánchez Niño, quienes con su apoyo me ayudaron a llegar a este punto de mi vida.**

**Daniel Esteban Sánchez Sánchez**

## **Agradecimientos**

En estas líneas quiero expresar mi agradecimiento primero a Dios por brindarme salud, fortaleza y paciencia en estos años, a mis padres mis modelos a seguir por quienes gracias a su incansable esfuerzo me han impulsado a través de los años.

Doy un gran agradecimiento a mi asesor de tesis el ingeniero Juan Sebastián Salazar Henao, Profesor instructor de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, por su actitud de ayuda, sus recomendaciones, su apoyo y el tiempo que invirtió para desarrollar este trabajo de la mejor manera.

Agradezco especialmente a mi tía Gloria Mery Sánchez Ruiz y su esposo Rodolfo Arévalo Lizarazo quienes me ayudaron y apoyaron durante estos últimos años.

Finalmente quiero agradecer a todos los que me apoyaron en el transcurso de este paso, a la ingeniera Laura Juliana Torres quien con su ayuda y paciencia me impulsaron a terminar de la mejor manera este proyecto.

## Resumen

El objetivo de la investigación es realizar el diseño conceptual de una Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) para el Condominio la Primavera de Monquirá. Así mismo, se plantea evaluar la factibilidad de su alimentación con energía fotovoltaica.

En esta investigación se realizó una identificación de las condiciones de la zona de estudio, una determinación de aspectos relacionados con las características del agua residual que se produce actualmente en el Condominio Campestre La Primavera, y se seleccionaron las estructuras de tratamiento más apropiadas. Se obtiene como resultado los diseños de las respectivas estructuras que conforman el sistema de tratamiento. Sumado a esto, se realiza un dimensionamiento de dos configuraciones de sistemas fotovoltaicos: con almacenamiento y una instalación híbrida (dando la posibilidad de alimentarse por paneles solares y la red de energía pública) y se determina los costos derivados a la implantación de dicho sistema fotovoltaico, evaluando la factibilidad de su instalación.

Se evidencia que la instalación fotovoltaica puede solventar los consumos generados por la planta de tratamiento de agua residual diseñada para el Condominio Campestre La Primavera. Se observa que es factible la instalación de una red híbrida tanto como una red con almacenamiento, ambos casos presentan relativamente bajos tiempos de recuperación de la inversión inicial. Los tiempos de retorno de la inversión inicial para un sistema con almacenamiento son menores a los de un sistema híbrido.

## Índice general

	Pág.
Capítulo 1 Marco teórico	13
Problema de investigación	17
Objetivos	19
Metodología	20
Capítulo 2 Condiciones de la zona de estudio	21
Ubicación y contexto	21
Planta potabilizadora	22
Capítulo 3 Variables meteorológicas para el diseño	25
Brillo solar	25
Precipitación	27
Evaporación	27
Humedad relativa	28
Nubosidad	28
Temperatura	29
Presión atmosférica	30
Capítulo 4 Criterios de selección de la planta de tratamiento de agua residual	31
Caracterización del agua residual	31
Caudal de diseño	32
Cargas contaminantes	35
Selección del sistema de tratamiento	36
Pretratamiento	37
Tratamiento secundario	39
Opciones de vertimiento	42
Capítulo 5 Diseño de la planta de tratamiento de agua residual	48
Diseño del sistema de pretratamiento	48
Cribado	48
Desarenador	56
Trampa de grasas	70

Diseño del sistema de tratamiento secundario	74
Lodos activados	74
Sedimentador secundario	95
Capítulo 6 Dimensionamiento del sistema de energía solar para alimentar la PTAR del condominio campestre la primavera.	105
Instalación fotovoltaica híbrida	107
Criterios de diseño	108
Dimensionamiento del sistema fotovoltaico sin almacenamiento	108
Instalación fotovoltaica autónoma	112
Criterios de diseño	112
Dimensionamiento red con almacenamiento de energía	112
Capítulo 7 Costos de construcción civil – eléctrica	118
Ganancias instalación híbrida	120
Ganancias red con autónoma	125
Conclusiones	128
Referencias	130

## Índice de Tablas

	<b>Pag</b>
Tabla 1. Caracterización de agua residual	32
Tabla 2. Factores pico para caudales de tratamiento de aguas residuales	33
Tabla 3. Caudales de diseño para el tratamiento de agua residual	34
Tabla 4. Matriz evaluación de pretratamiento	38
Tabla 5. Selección para el pretratamiento	39
Tabla 6. Matriz de selección tratamiento secundario.	40
Tabla 7. Selección para el tratamiento secundario	42
Tabla 8. Prueba de infiltración	44
Tabla 9. matriz de evaluación Vertimiento	45
Tabla 10. Selección del vertimiento	46
Tabla 11. Características cribado	55
Tabla 12. Resumen parámetros desarenador	69
Tabla 13. Resumen Tabla desarenador	73
Tabla 14. Accesorios Sistema aireación	88
Tabla 15. Resumen parámetros lodos activados	94
Tabla 16. Difusores de aireación.	94
Tabla 17. Accesorios de la línea de lodos	99
Tabla 18. Tabla resumen sedimentador secundario.	104
Tabla 19. Consumos por parte de la PTAR.	105
Tabla 20. Suministro por instalación híbrida.	107
Tabla 21. Parámetros instalación fotovoltaica híbrida	111
Tabla 22. Parámetros instalación autónomo	117
Tabla 23. Costos para sistema hibrido.	118
Tabla 24. Costos para sistema autónomo.	118
Tabla 25. Costos mano de obra.	119
Tabla 26. Costos totales de la instalación de red.	119
Tabla 27. Vida útil de los elementos fotovoltaicos	119
Tabla 28. Flujo de caja acumulado en VPN instalación solar Híbrida.	120
Tabla 29. Tarifas EBSA de 2018 al 2020	122
Tabla 30. VPN instalación híbrida	125

## Índice de Figuras

	Pag
Figura 1-Ubicación del condominio La Primavera.	21
Figura 2. Captación aljibe “Las Fuentecitas”.	22
Figura 3. Captación aljibe “NN”.	23
Figura 4. Ubicación estación meteorológica BERTHA	25
Figura 5. Valores máximos, mínimos y promedio de Brillo solar	26
Figura 6. Máximos, mínimos y medios de evaporación	27
Figura 7. Máximos, medio y mínimos Humedad relativa.	28
Figura 8. Valores máximos, medios y mínimos Nubosidad	29
Figura 9. Valores máximos, medios y mínimos temperatura.	30
Figura 10. Agujero para la prueba de infiltración.	43
Figura 11. Distribución de la PTAR	46
Figura 12. Diagrama de estructura cribado	54
Figura 13. Diagrama de la sección de control	65
Figura 14. Diagrama del canal de desarenado	67
Figura 15. Diagrama trampa de grasas.	72
Figura 16. Esquema típico reactor de lodos activados.	74
Figura 17. Distribución de los difusores	88
Figura 18. Sedimentadores secundarios	98
Figura 19. Diferencias de altura entre el sedimentador y el reactor de lodos activados	99
Figura 20. Tubería de lodos.	100
Figura 22. Escenarios propuestos	106
Figura 22. VPN instalación solar híbrida	121
Figura 23. Proyección de gasto realizado por el Sistema Híbrido.	123
Figura 24. VPN instalación con almacenamiento	126
Figura 25. Proyección de gasto realizado por el Sistema con almacenamiento.	127



## Introducción

El presente documento busca responder a dos problemáticas particulares que se presentan comúnmente en el territorio colombiano. La primera es la falta de tratamiento de las aguas residuales antes de verterlas al suelo o a cuerpos de agua naturales, para ello se plantea el diseño conceptual de una planta de tratamiento de agua residual. La segunda problemática es el suministro energético necesario para la operación continua de dichas plantas de tratamiento, se evalúa la instalación de una red fotovoltaica que mitigue total o parcialmente la necesidad energética dando mayor viabilidad para su instalación en lugares con baja o nula cobertura de la red eléctrica. Con este propósito, se escoge como estudio de caso el condominio residencial La Primavera, ubicado en el municipio de Monquirá en el departamento de Boyacá.

En Colombia se vertieron, para el año 2016, una carga total de 2'906.555 toneladas de DQO, correspondiente a 8.074 Ton/día, a los cuerpos de agua (IDEAM, 2019). En respuesta, siguiendo con las dinámicas mundiales, Colombia a lo largo de los años ha instalado numerosas de Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR), para el año 2017 se identificaron un total de 682 PTAR en el país (Supeservicios, 2018).

Las PTAR pueden tener diferentes tecnologías de tratamiento, entre las cuales se encuentra el reactor de lodos activados el cual pone en contacto el agua residual con un floc biológico previamente formado en un tanque de aireación (Romero, 2016). Este proceso tiene grandes necesidades energéticas, lo que se traduce a altos costos de mantenimiento. Es por esto que el objetivo principal de este trabajo es realizar el diseño conceptual de una PTAR para el Condominio Campestre La Primavera y comprobar la factibilidad de la alimentación eléctrica con un sistema de energía fotovoltaica. Con lo cual se logrará encontrar una manera sostenible para la depuración de aguas residuales disminuyendo aportes a los sistemas hídricos aledaños.

El documento contiene cinco capítulos, el primero da una descripción de las condiciones de la zona de estudio, la ubicación y la infraestructura actual del condominio; el segundo capítulo describe las características climáticas tales como brillo solar, evaporación, humedad relativa, nubosidad, temperatura y presión atmosférica; el tercer capítulo se refiere a las características del agua residual

generada por el Condómino Campestre La Primavera, la cantidad de agua residual generada y los criterios de selección para los procesos unitarios de tratamiento.

En el capítulo cuarto se realiza el diseño conceptual de la PTAR, donde se calculan las dimensiones para los sistemas de pretratamiento, tratamiento secundario y disposición del efluente. En el capítulo quinto se efectúa el dimensionamiento de las instalaciones fotovoltaicas teniendo en cuenta dos posibles sistemas de funcionamiento: uno con almacenamiento energético y otro híbrido (alimentación por energía solar y por la red eléctrica). En el sexto capítulo se realiza una comparación económica de los dos posibles sistemas mencionados anteriormente.

De manera general, la investigación presenta estudios básicos de la zona de estudio, información técnica de referencia, una caracterización del agua residual frente a la Resolución 631 de 2015, el proceso de selección para los procesos unitarios de tratamiento teniendo en cuenta las cualidades de la zona de estudio. Además, se muestran los diseños de cada estructura siguiendo las recomendaciones de la Resolución 0330 del 2017, así como el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos necesarios para la operación de la planta y la determinación de los costos de la instalación de los sistemas de energía alternativa.

## Capítulo 1 Marco teórico

El propósito del presente proyecto es diseñar una planta de tratamiento para el agua residual doméstica generada en el Condominio Campestre La Primavera en el municipio de Moniquirá. Adicionalmente, se evaluará la factibilidad económica de suministrar la energía eléctrica para la operación de la planta de tratamiento a través de un sistema de generación fotovoltaico (FV).

Con tal fin se realizó una revisión bibliográfica centrada en las siguientes palabras claves: “Solar Photovoltaic + Wastewater and Biological Treatment”. Considerando los artículos publicados desde el año 2009 se encontraron 17 artículos relevantes. En los artículos encontrados se describe que la energía eléctrica generada por sistemas FV es utilizada principalmente como suministro energético para la operación de la planta. Sin embargo, también se ha documentado la implementación de energía eléctrica de origen solar para desarrollar procesos de oxidación avanzada, electro-coagulación y foto-electrólisis, entre otros.

En las investigaciones encontradas se evidencia que los procesos de tratamiento biológico tradicionales son compatibles con el uso de energías FV como suministro de energía eléctrica para su operación. Los tratamientos biológicos se basan en la remoción de contaminantes a partir del uso de microorganismos principalmente, que al garantizar las condiciones óptimas para su desarrollo contribuirán a la mineralización de la materia orgánica contaminante en el agua residual (Romero, 2016).

En ese sentido, la energía FV es utilizada para alimentar equipos complementarios para el funcionamiento de las plantas de tratamiento, como los equipos del sistema de aireación que generan condiciones aerobias, las bombas para la recirculación de lodos y la alimentación de diferentes etapas y sistemas de tratamiento. Existen algunos ejemplos de la diversidad de usos de la energía FV, como la alimentación de sistemas de tratamiento de biofiltros de cochada por ejemplo (Ivan Muñoz, 2019). También, se ha encontrado que al utilizar la energía FV para alimentar sistemas de aireación, como en zanjones de oxidación, ésta fuente de energía resulta tan confiable que se obtienen los mismos resultados que al utilizar energía eléctrica de la red (Changfu Han, 2013)(Jiang et al., 2018).

Para el Condominio Campestre La Primavera de Moniquirá, resultaría llamativo implementar una fuente de energía independiente de la red local para el tratamiento de sus aguas residuales, en cuanto podrían superarse las fallas de continuidad en

la prestación del servicio y eventualmente generar una reducción de los costos de operación.

Dentro de la revisión bibliográfica se analizó el consumo de energía promedio por parte de las plantas de tratamiento en varios países, encontrando que Canadá usa entre 0.02 y 0.1 kW/m<sup>3</sup>, Hungría usa entre 0.045 y 0.14 kWh / m<sup>3</sup>, y Australia usa entre 0.1 y 0.37 kWh / m<sup>3</sup> para tratamientos primarios. Al comparar la energía demandada en los sistemas convencionales de tratamiento por lodos activados se encontró que: Australia usa en promedio 0.46 kWh / m<sup>3</sup>, China usa 0.269 kWh / m<sup>3</sup>, Estados Unidos usa entre 0.33 y 0.60 kWh / m<sup>3</sup> y Japón usa entre 0.30 y 1.89 kWh / m<sup>3</sup>.

Se encontró además que la aireación es la etapa de mayor consumo energético. En la mayoría de las Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) con sistemas de lodos activados, la aireación requiere entre el 50 y 60% del total de la energía consumida, mientras que el consumo restante se divide entre el tratamiento de lodos y las bombas de recirculación. En éste sentido, las plantas de lodos activados tienen grandes gastos energéticos, lo cual se convierte en su principal desventaja frente a otros sistemas de tratamiento (Gu et al., 2017).

Existe incremento generalizado de la demanda mundial para el tratamiento de aguas residuales tanto domésticas como industriales en zonas con dificultades de interconexión eléctrica, en ese sentido, es necesario el funcionamiento de plantas de tratamiento con autonomía energética. Una buena alternativa para resolver los problemas de interconexión eléctrica es el uso de sistemas FV, sin embargo, la principal dificultad que enfrentan éste tipo de plantas de tratamiento es que la inversión inicial para generar un sistema autosuficiente de energía suele ser más costoso que uno tradicional. Razón por la cual es necesario realizar estudios de pre-factibilidad que busquen encontrar las condiciones adecuadas para que éste tipo de plantas puedan desarrollarse (Gu et al., 2017).

Cuando la implementación de un sistema FV es viable, éste puede llegar a suplir la mayor cantidad de la demanda energética de una PTAR. Esto puede evidenciarse en el caso de estudio planteado por Xu et al, para una PTAR en China, donde se proyectó una producción de  $1.04 \times 10^7$  KWh a partir de un sistema FV para el año 2020, que sería capaz de suplir el equivalente del 79.4% de la energía consumida por la planta en el año de estudio (Xu et al., 2017). Otro estudio realizado en California, Estados Unidos, ha encontrado que para las PTAR de ese estado existe una adopción de energías renovables del 39%, equivalente a 41 plantas de las 105 evaluadas. Éstas plantas tienen capacidades entre 12 KW a 4.2 MW, revelando una pequeña tendencia a la conversión a energías verdes (Strazzabosco, Kenway, & Lant, 2019).

Otro caso de estudio relevante es el de la PTAR de Yongin, Corea del Sur en el cual la planta de tratamiento utiliza diferentes sistemas de recolección de energía verde (Chae & Kang, 2013). Esta planta de tratamiento municipal tiene una producción de 100 KW a partir del sistema FV, lo cual genera una producción del 2% superior a la energía gastada por la planta. Dicho sistema tuvo una recuperación de costos aproximadamente de 6 años (Chae & Kang, 2013).

En la revisión bibliográfica se encontró otros tipos de procesos de tratamiento que usan fuentes de energía FV, si bien estos no serán el foco de estudio del presente proyecto de investigación, cabe mencionar los siguientes por su importancia en la innovación tecnológica del tratamiento de aguas residuales:

Procesos de oxidación avanzada (POA), que involucran la generación y uso de compuestos altamente reactivos y transitorios conocidos como radicales libres ( Bes Monge, M.T. Silva, & Bengoa). Se encuentra evidencia de la realización de procesos basados en reacciones fenton, alimentados con energía solar, generaron eficiencias del 50 al 80% de remoción en DQO. Siendo eficiencias altas teniendo en cuenta la dificultad de remover contaminantes poco o nada biodegradables del agua residual (Edison GilPavas, 2018), (Sandra Figueroa, 2009).

Los sistemas eléctricamente asistidos, que se caracterizan por el uso de corrientes eléctricas y campos electromagnéticos generados sobre el agua residual para propiciar procesos de precipitación o transformación de los componentes del agua residual. Se ha encontrado la alimentación a sistemas de electro coagulación por medio de paneles FV, los cuales alimentan de forma óptima a los reactores proveyéndoles la energía necesaria para el tratamiento (Arango Ruiz, 2005) (C.J. Nawarkar, 2019) (Alfredo García-García, 2015). Se han reportado eficiencias mayores al 90% de éste tipo de sistemas cuando se implementan controles del voltaje vs caudal de entrada al sistema (D. Marmanisa, 2019). Así mismo, los gastos de energía difieren dependiendo de las concentraciones y los caudales del agua residual, esto pudo evidenciarse en el estudio realizado para el agua municipal de la ciudad de Sangli, Maharashtra, India. En ese caso se estudió el comportamiento de la eficiencia de remoción frente a un caudal variable, se requirió la utilización de dos paneles FV con capacidad de 60W cada uno y utilizando baterías de 12 V- 25 A, los cuales alimentaban paneles de acrílico con diferentes electrodos, dando eficiencias del 90% en remoción de DQO con una densidad de 48 A /m<sup>2</sup> (Nawarkar & Salkar, 2019).

Otros sistemas integran el tratamiento biológico con la foto-electrólisis, un ejemplo de éste sistema son los humedales sub-superficiales construidos con flujo horizontal (E-BHFCW por sus siglas en inglés) integrados con electrólisis. Este sistema utiliza paneles solares de 17 V, con una densidad de 1.27 a 2.55 mA/cm<sup>2</sup>, los cuales son

capaces de alimentar 50 electrodos con diámetro de 20 mm, con una eficiencia de conversión de energía del 18.5 %. Este sistema de tratamiento tiene remociones causadas por la foto-electrolisis del orden de 6.07 gNt/m<sup>2</sup> (nitrógeno total) y 0.25 g Pt/m<sup>2</sup> (fosforo total) equivalentes a un 67.62% y 52.99% de remoción de fosforo y nitrógeno respectivamente (Gao et al., 2019).

Por último, otro proceso en el que se usa energía eléctrica de fuentes FV son los biorreactores de membrana, en los cuales se realiza un tratamiento biológico conjunto con una filtración del agua. Estos reactores tienen un rango de gastos entre 0.5 y 0.7 KWh/m<sup>3</sup>, con paneles de 1 m<sup>2</sup> los cuales generaron una intensidad eléctrica de 0.7 KWh/m<sup>2</sup> (Zhang, Rottiers, Meessaert, Pinoy, & Van der Bruggen, 2019)

## **Problema de investigación**

En el mundo existen estudios que demuestran que existe una alta demanda energética por cuenta de sistemas de tratamiento de aguas residuales de tipo aerobio. En España según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA) el 45,5% de los sistemas utilizados son aerobios, de los cuales 101 sistemas utilizan el sistema de lodos activados, estos sistemas en la totalidad del país tienen una demanda de 98.981 kW per cápita. En la ciudad de Hermosillo en México, para 2003, existió una demanda de 4.67 millones de KW (Secretaría de Energía (SENER), 2015). De manera análoga en Colombia el Grupo EPM gastó para 2018, 16.503 MWh en las PTAR de San Fernando y El Retiro (Grupo EPM, 2019).

Teniendo en cuenta estos consumos energéticos por parte de las plantas de tratamiento de agua residual y los impactos asociados a la producción energética convencional, es posible plantear formas para reducir los impactos al usar fuentes menos contaminantes, según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) una estrategia es la instalación de energías limpias, como la energía FV. Este tipo de fuentes de energía resultan además bastante ventajosas cuando existen limitaciones al acceso a sistemas interconectados de energía.

En el caso del Condominio Campestre La Primavera, del municipio de Monquirá, donde existe la necesidad de desarrollar un sistema de tratamiento para las aguas residuales domésticas generadas por las viviendas del condominio. En ese sentido se plantea diseñar un sistema de tratamiento que supla esta necesidad de la copropiedad. Adicionalmente, en el Condominio se presentan algunas fallas en la disponibilidad del servicio eléctrico que podría afectar al sistema de tratamiento, por lo cual se pretende evaluar la viabilidad de alimentar al sistema de tratamiento con energía Fotovoltaica analizando si podrían encontrarse alivios económicos adicionales frente al consumo energético del condominio.

A continuación, presentamos las preguntas orientadoras que deberán ser respondidas a lo largo de la metodología de investigación:

1. ¿Cuáles son las condiciones del agua residual y las condiciones climáticas del Condominio Campestre La Primavera?
2. ¿Cuáles son las especificaciones que debe tener el sistema de tratamiento para depurar la carga contaminante del agua residual del condominio?
3. ¿Cuál será la demanda energética por cuenta de la operación de la planta de tratamiento?

4. ¿Qué condiciones debe cumplir el sistema de alimentación fotovoltaico para alimentar la operación de la planta y cuáles serán las condiciones que necesita soportar?
5. ¿Cómo será la distribución y producción de energía por parte de las celdas fotovoltaicas?
6. ¿Es viable alimentar la operación de la planta de tratamiento diseñada con energía solar?

## **Objetivos**

### **Objetivo general:**

- Realizar el diseño conceptual de una PTAR para el Condominio Campestre La Primavera. ubicado en el municipio de Moniquirá y evaluar la factibilidad de alimentarla con energía fotovoltaica.

### **Objetivos específicos:**

- Identificar las condiciones del agua residual producidas por el Condominio Campestre La Primavera, así como las condiciones climáticas de la región del municipio.
- Realizar el diseño conceptual de la planta de tratamiento de agua residual.
- Dimensionar un sistema de energía solar para alimentar el sistema de tratamiento de agua residual en el Condominio Campestre La Primavera.
- Determinar costos de construcción civil – eléctrica de un sistema de energía alternativa solar para para alimentar el sistema de tratamiento de agua residual en el Condominio Campestre La Primavera.

## **Metodología**

### **Diseño de la investigación**

la investigación es cuantitativa de tipo aplicada científica ya que el objetivo de esta es determinar estrategias para la mitigación de costos económicos derivados del consumo energético para la operación de una PTAR determinando una viabilidad de la implantación de un sistema fotovoltaico para solventar parcial o totalmente los consumos derivados de la operación de la PTAR.

### **Técnicas de investigación**

Para el desarrollo de este proyecto se tendrán en cuenta 3 etapas principales las cuales son la consecución de información del área de estudio, el diseño de una planta de tratamiento teniendo en cuenta las características del vertimiento, el diseño del sistema de energía solar y el análisis de costos.

### **Información del área de estudio**

La determinación de esta información se centra en la búsqueda referente a las condiciones ambientales, meteorologías y características del vertimiento del sector.

### **Planta de tratamiento de agua residual**

Se realizará un análisis multicriterio para seleccionar las operaciones unitarias que mejor se adapten a las condiciones y a la caracterización del agua residual para establecer el tren de tratamiento a ser diseñado. Para efectos del objetivo del presente trabajo se favorecen las unidades de tratamiento activo sobre los tratamientos pasivos, con consumo energético, para evaluar la viabilidad de su operación con fuentes de energía alternativas. En el desarrollo del presente documento se muestran las ecuaciones y modelos seleccionados para el dimensionamiento de las diferentes etapas del sistema de tratamiento.

### **Paneles solares**

Para el diseño del sistema FV se tendrán en cuenta factores como la localización, y las horas de luminosidad, las cuales son determinantes en la producción energética fotovoltaica. Por último, se estimará las demandas por parte de los sistemas de tratamiento de agua residual.

### **Análisis de costos**

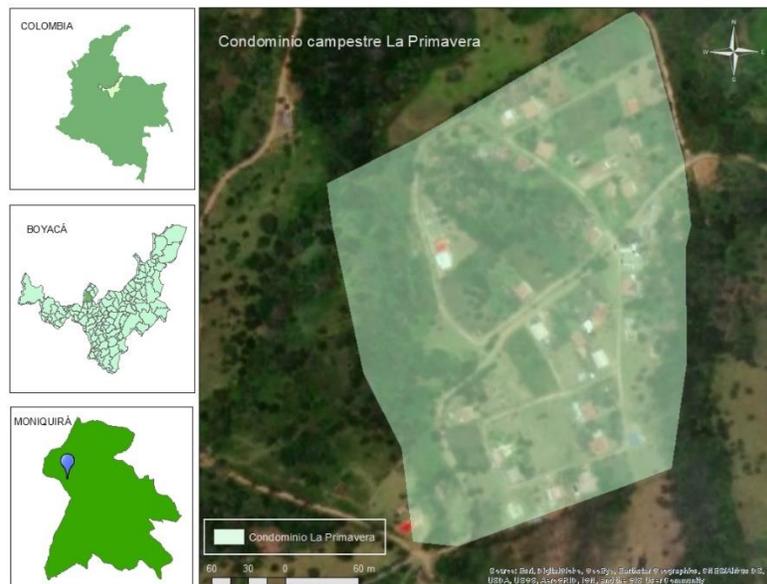
Se comparan los costos generados por la instalación del sistema FV, comparando escenarios con y sin paneles solares. Posteriormente es posible determinar el periodo de retorno de la inversión inicial del sistema FV.

## Capítulo 2 Condiciones de la zona de estudio

### Ubicación y contexto

El Condominio Campestre La Primavera, se encuentra ubicado en la vereda San Vicente zona noroeste del municipio de Moniquirá, en el departamento de Boyacá, como se puede observar en la Figura 1

Figura 1-Ubicación del condominio La Primavera.



Fuente: Elaboración propia con base en los datos suministrados por Google Earth y ESRI (2020)

La zona de estudio está ubicada en la vereda San Vicente del municipio de Moniquirá entre las coordenadas  $5^{\circ}54'20.00''N$ ,  $73^{\circ}36'19.90''O$  por el nororiente,  $5^{\circ}54'10.50''N$ ,  $73^{\circ}36'17.60''O$  por el sur oriente del Condominio,  $5^{\circ}54'12.50''N$ ,  $73^{\circ}36'10.80''O$  por el sur occidente y  $5^{\circ}54'24.60''N$ ,  $73^{\circ}36'12.00''O$  por el noroccidente.

El condominio cuenta con un área de 9 hectáreas (Torres, 2019), este cuenta con 67 suscriptores, y una media de 5 usuarios por suscriptor, para un total de 335 habitantes. El Condominio se abastece de dos fuentes superficiales, denominadas “aljibe Las Fuentesitas” y “aljibe NN”, cuenta con una concesión de aguas otorgada por la Corporación Autónoma Regional de Boyacá (CORPOBOYACÁ) mediante la Resolución 3144 del 11 de agosto de 2017.

### Planta potabilizadora

El Condominio Campestre La Primavera cuenta con una planta de potabilización, la cual trata un caudal aproximado de 1.0 L/s, el sistema de tratamiento es de tipo convencional integrando los procesos de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

La planta de tratamiento se encuentra ubicada en 5°54'11.34"N, 73°36'14.48"O, en la parte sur del condominio, esta zona es la parte con mayor altura de la zona de estudio, lo cual facilita la distribución por gravedad hacia los puntos de agua destinados a las viviendas construidas actualmente y a los lotes restantes del mismo. Se capta agua para el condominio de dos fuentes naturales denominadas, aljibe "NN" y aljibe "Las Fuentecitas",

La captación del aljibe "Las Fuentecitas" se encuentra ubicado dentro del área del condominio en las coordenadas 5°54'15.45"N, 73°36'18.29"O, mientras que el aljibe "NN" se localiza en las coordenadas 5°54'1.60"N, 73°36'8.60"O En un predio aledaño al condominio con el permiso de servidumbre respectivo

Figura 2. Captación aljibe "Las Fuentecitas".



Fuente: (Condominio campestre La Primavera, 2020)

Cómo se muestra en la Figura 2 la captación se realiza desde el fondo del reservorio, según Torres (2019) la derivación de caudal se realiza por medio de un aljibe natural (ver Figura 2) del cual se extrae el caudal con ayuda de una motobomba marca STANPROF de  $\frac{1}{2}$  HP (370 W) con el cual se realiza un bombeo de 4 horas con una frecuencia de dos veces por semana.

Por otro lado, se encuentra que el aljibe "NN", como se observa en la Figura 3, tiene una captación artesanal de la cual se toma el agua superficial de la fuente hídrica y se transporta a gravedad con una manguera de  $\frac{3}{4}$  de pulgada hasta la entrada de la PTAP a la cual después de las pérdidas, se estima que llega un caudal aproximado de 1,43 L/s para su tratamiento, almacenamiento y posterior distribución a los habitantes del condominio.

Figura 3. Captación aljibe "NN".



Fuente: (Condominio campestre La Primavera, 2020)

El sistema de tratamiento de agua potable según Romero (2006), tiene como objetivo la integración de procesos y operaciones de forma óptima para remover las impurezas que se puedan encontrar en el agua, garantizando una seguridad para su utilización y consumo. Esta planta de tratamiento se apega a las condiciones impuestas por la Resolución 0330 de 2019 y la Resolución 2115 de 2017, las cuales imponen respectivamente los parámetros de diseño y restringe la calidad del afluente de la misma, la planta de tratamiento de agua potable se compone por los siguientes sistemas:

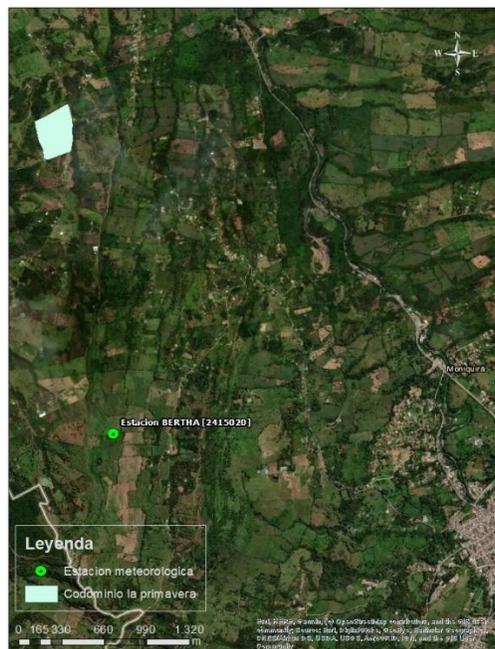
- **Coagulación:** en este proceso se realiza la inyección de sales metálicas que desestabilizan las partículas coloidales en suspensión para precipitarlas y sustraerlas del agua.
- **Sedimentación:** cuenta con un sedimentador de alta tasa gracias a que la sedimentación se realiza con un sistema de placas cónicas ubicadas en el interior del tanque con una inclinación de  $30^\circ$ , con un volumen para lodos de  $3.5 \text{ m}^3$ .
- **Filtración:** en su planta de tratamiento este proceso es de operación descendiente, opera con un sistema de lecho múltiple de arena silíceo y antracita, además de contar con una tubería perforada para la recolección uniforme del fluido. Tiene un volumen útil de  $1.5 \text{ m}^3$  y cuenta con un tanque de agua filtrada de  $1.9 \text{ m}^3$  para realizar el retro lavado (lavado en sentido contrario del flujo).
- **Desinfección:** El Condominio Campestre La Primavera, (2020) cuenta en su planta de tratamiento con un dosificador que inyecta los productos químicos, esta es una estructura compuesta por dos cámaras, una superior que contiene una solución del químico a dosificar y es alimentada constantemente por agua limpia

para realizar la dilución del producto y otra cámara inferior conectada al sitio de inyección que contiene el químico.

### Capítulo 3 Variables meteorológicas para el diseño

Los datos meteorológicos fueron tomados de la estación del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) con número de identificación 24015020 y cuyo nombre es BERTHA localizada en el municipio de Moniquirá, en el departamento de Boyacá, con coordenadas  $5^{\circ}52'60.00''N$ ,  $73^{\circ}35'60.00''O$  a una elevación de 1700 m.s.n.m, como se puede observar en la Figura 4

Figura 4. Ubicación estación meteorológica BERTHA



Fuente: Elaboración propia, Google EARTH (2021)

Esta estación se ubica a una distancia aproximada de 3.2 km de la cabecera del municipio de Moniquirá, a unos 5.5 km de la cabecera del municipio de Barbosa y a una longitud de 2.4 km del Condominio Campestre La Primavera.

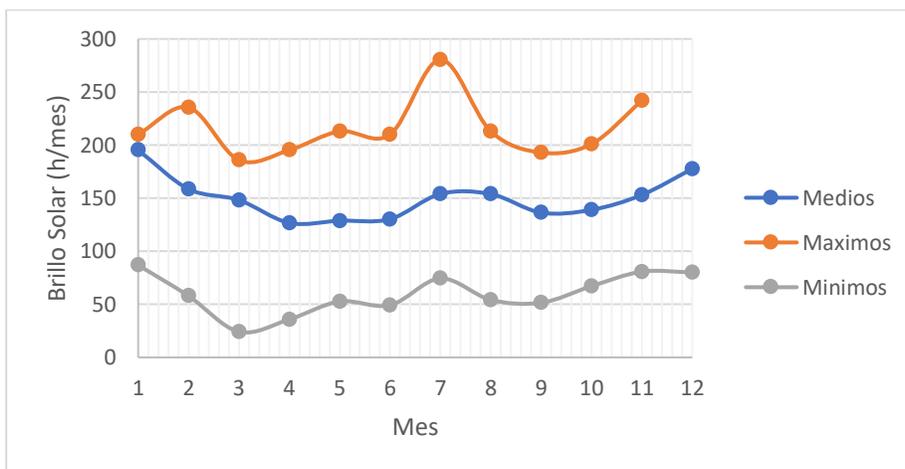
#### Brillo solar

El brillo solar según el IDEAM (2020), corresponde al tiempo en el que incide la luz solar sobre un lugar determinado, de esta manera y de acuerdo a la información proporcionada de la estación meteorológica, desde el año 1956 a 1994 la zona de

estudio posee variaciones importantes a través de los años, para el año 1962 se obtuvo un brillo solar de 1243,2 h/año siendo éste, el más bajo de los datos históricos representados, por otro lado, para el año 1959 se obtuvo un brillo solar de 2298,2 h/año siendo el año con mayor incidencia solar en la zona.

En la época de verano del municipio de Moniquirá, correspondiente a los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, se obtuvieron valores medios de brillo solar de 153,1 h/mes a 195,3 h/mes, máximos de 201 h/mes a 279,2 h/mes y mínimos de 80,1 h/mes a 86,9 h/mes. Mientras que, en época de invierno, en los meses de marzo a junio, el brillo solar tuvo una disminución importante ocasionada por la variabilidad del tiempo, con valores medios de 126,7 h/mes a 148,2 h/mes, máximos de 185,8 h/mes a 235,5 h/mes y mínimos de 24,2 h/mes a 52,7 h/mes como se observa en la Figura 5.

Figura 5. Valores máximos, mínimos y promedio de Brillo solar



Fuente: Elaboración propia con datos del IDEAM (2020)

## Precipitación

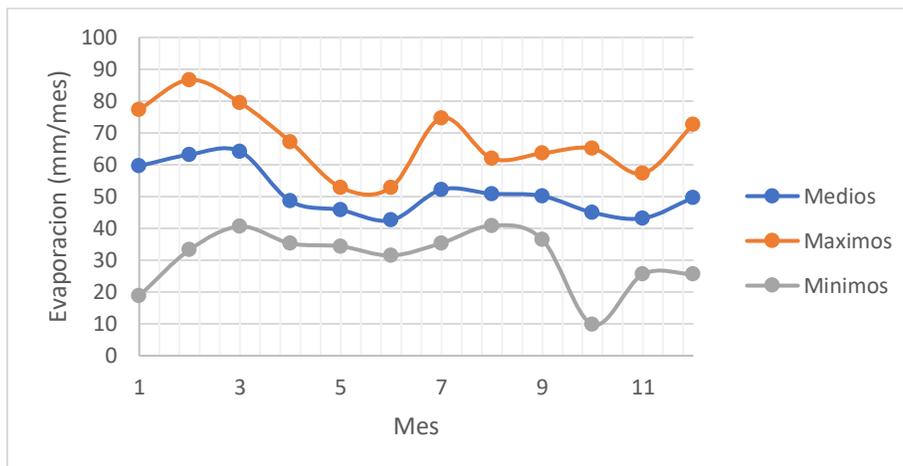
De acuerdo a la información proporcionada de la estación meteorológica, desde el año 1956 a 1994 la zona de estudio posee una precipitación media en el municipio de Moniquirá de 160 mm/mes. (IDEAM, 2020)

## Evaporación

El municipio de Moniquirá representa una variación de evaporación de 483,93 mm/año a 690,1 mm/año, correspondientes al año 1956 y 1968.

Además, entre los años 1956 y 1968 febrero y marzo son los meses con los valores medios más altos de evaporación en la zona de estudio con 63,2 mm/mes y 64,2 mm/mes, mínimos de 33,3 mm/mes y 40,6 mm/mes, máximos de 86,7 mm/mes y 79,5 mm/mes indicando una humedad alta, permitiendo llegar más rápido a un estado de saturación, lo cual, eleva las probabilidades de precipitaciones en el municipio; sin embargo, en la Figura 6 se evidencia las fluctuaciones en los valores anuales de evaporación, identificando declinaciones, como en el mes de octubre con 9,8 mm/mes, enero con 18,8 mm/mes, además de elevaciones importantes con valores máximos de 86,7 mm/mes en febrero y marzo 79,5 mm/mes como se mencionaba anteriormente.

Figura 6. Máximos, mínimos y medios de evaporación

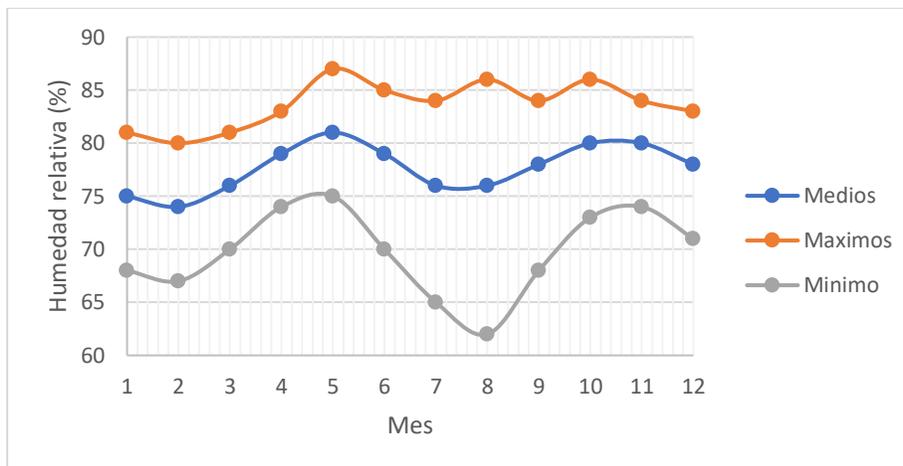


Fuente: Elaboración propia con datos de IDEAM

## Humedad relativa

La humedad relativa es la relación de presión actual del vapor de agua y la presión de vapor saturado en el ambiente (Tejada, 2018). El municipio de Monquirá no presenta una tendencia uniforme, se evidencia en la figura 7, que se presenta una tendencia ascendente los primeros meses del año, posteriormente tiene una tendencia accidentada hasta el mes de octubre, donde empieza una tendencia descendente.

Figura 7. Máximos, medio y mínimos Humedad relativa.



Fuente: Elaboración propia con datos de IDEAM

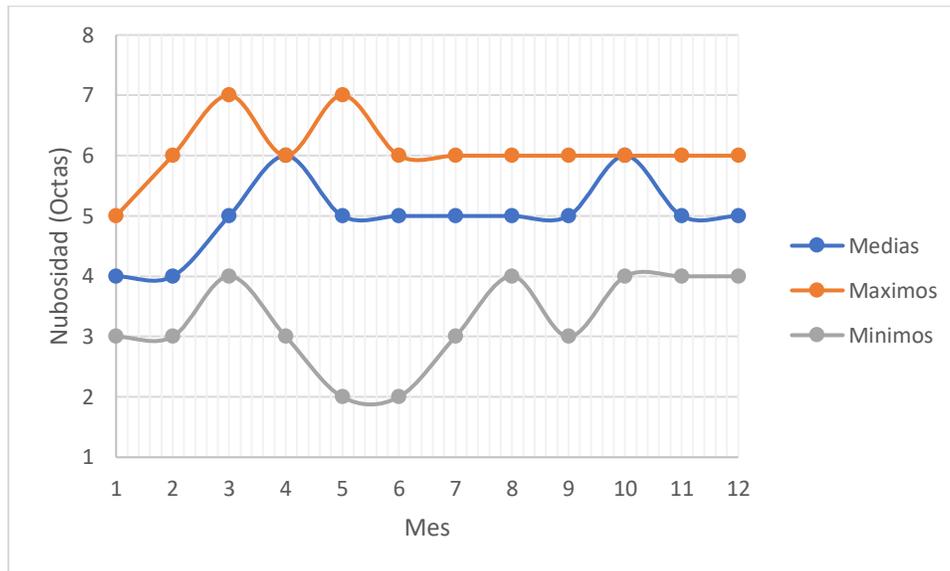
El municipio de Monquirá tiene una humedad relativa con valores medios de 74 % a 80 %, valores máximos de 80 % a 87% y mínimos de 62% a 75% con el pico más alto en el mes de mayo y el punto más bajo en el mes de agosto, evidenciado en la Figura 7.

## Nubosidad

Con relación a los datos históricos proporcionados por la estación meteorológica, el área de estudio desde el año 1956 a 1970 ha presentado una nubosidad casi constante de 5 octas, con un incremento de 6 octas en los años 1962 y 1968, una disminución de 4 octas en el año 1963.

El comportamiento observado en la Figura 8, permite distinguir que en los primeros meses del año la nubosidad en la zona, mantiene su tendencia con valores medios de 4 a 5 octas, que va incrementando con picos en los meses de marzo y abril. De mayo a septiembre se mantiene constante con 5 octas, para el mes de octubre tiene un leve ascenso y los últimos dos meses del año retoma la tendencia, ya sean valores mínimos, medios y máximos en la nubosidad del municipio.

Figura 8. Valores máximos, medios y mínimos Nubosidad



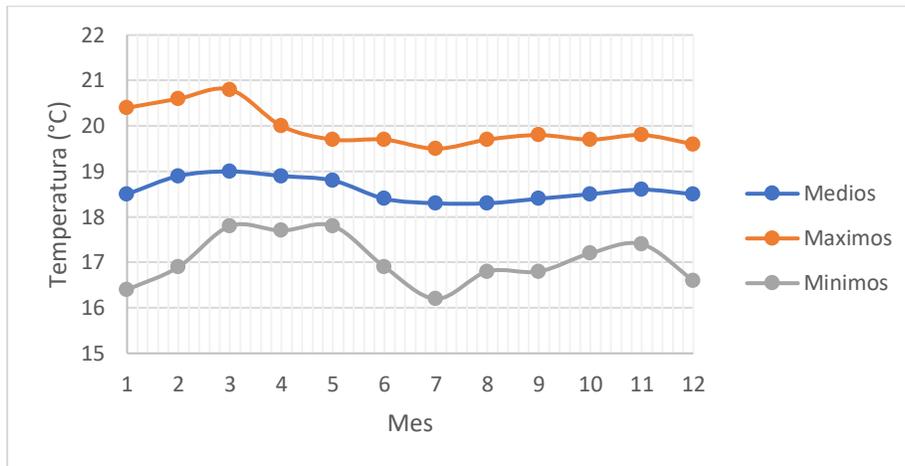
Fuente: Elaboración propia con datos de IDEAM

### Temperatura

El municipio de Monquirá ha presentado un aumento de su temperatura a través de los años, para el año 1955 la zona presentaba una temperatura de 18,2 °C aumentando para el año 1994 a 19,3 °C, es decir, durante los 39 años en los cuales se tomaron datos históricos, la zona presenta un aumento de 1,1 °C.

En cuanto a la representación de valores mínimos de temperatura se encuentran en un rango de 16,2 °C a 17,8 °C, valores medios de 18,3 °C a 19 °C y máximos de 19,5 °C a 20,8 °C, con cambios notorios en los meses de marzo, julio y octubre. (Ver Figura 9)

Figura 9. Valores máximos, medios y mínimos temperatura.



Fuente: Elaboración propia con datos de IDEAM

A partir de la Figura 9 se determina que la temperatura promedio para el condominio es de 18,6 °C

### Presión atmosférica

La presión atmosférica (P) en el Condominio Campestre La Primavera es calculada por medio de la ecuación:

$$P = P_o * e^{\frac{-\mu gh}{RT}}$$

Fuente: (Bottecchia, 2009)

Donde,

P<sub>o</sub>: Presión del gas a nivel de referencia estándar

R: Constante de los gases ideales (8,31432 N.º/ (mol. K)

μ: Masa molar del aire (0,0289644 Kg/mol)

T: Temperatura en el Condominio

h: Altura (m.s.n.m)

$$P = 760 \text{ mmHg} * e^{\frac{-0,0289644 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 1700 \text{ m.s.n.m}}{8,31432 \frac{\text{N}}{\text{mol.K}} * (18,6 + 273,15) \text{ K}}} = 622.77 \text{ mmHg}$$

## **Capítulo 4 Criterios de selección de la planta de tratamiento de agua residual**

### **Caracterización del agua residual**

El Condominio Campestre La Primavera, no posee actualmente ningún tipo de tratamiento para sus aguas residuales, lo cual puede ocasionar graves impactos al ambiente, ya que recibe cargas orgánicas, que pueden generar problemas como la reproducción de vectores, malos olores y la contaminación de la matriz agua-suelo. Por esta razón, se plantea el diseño de una planta de tratamiento de agua residual la cual disminuya la carga orgánica a tal punto que no represente riesgo tanto para los habitantes del sector como para el ambiente y conforme a los requerimientos normativos.

Debido a las condiciones del sector se realiza una caracterización del agua residual tomada de un vertimiento de una de las viviendas del Condominio, ubicada en las coordenadas geográficas 5°54'17.85"N, 73°36'11.54"O, donde se recolectó la muestra puntual, la cual se analizó en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, con el objetivo de determinar las características físicas y químicas evidenciando los siguientes resultados. Se realizó la caracterización del agua residual de esta manera debido a que, dentro de los tiempos establecidos en el cronograma del proyecto, al momento de realizar la campaña de muestreo solo se contaba con la autorización de acceso al predio estudiado. Para mayor representatividad hubiese sido necesario contar con la autorización de un mayor número de propietarios.

Tabla 1. Caracterización de agua residual

Parámetro	Método	Valor	Unidad	Resolución 631 de 2015 <sup>1</sup>
DQO <sup>2</sup>	SM 5220 C	449	mg/L	180
DBO <sub>5</sub> <sup>3</sup>	SM 5210 B	289,5	mg/L	90
SST <sup>4</sup>	SM 2540 D	164	mg/L	90
ST <sup>5</sup>	SM2540 B	680	mg/L	-
SF <sup>6</sup>	SM 2540 E	324	mg/L	-
SV <sup>7</sup>	SM 2540 E	356	mg/L	-
pH	SM 4500 K	7,74		6 - 9
Conductividad	SM 2510 B	3,24	ms/cm	-
Temperatura	SM 2250 B	18,6	°C	-

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Tabla 1 la relación de DQO/DBO, tiene un valor de 1,5. Para un agua residual domestica cruda los valores deben estar en relaciones de 1,2 a 2,5, demostrando que esta agua se encuentra dentro de los valores típicos para agua residual residencial (Romero, 2016).

Además, se encuentra que los parámetros de DQO, DBO, SST sobrepasan los valores máximos permisibles de la norma de parámetros de vertimientos, Resolución 631 de 2015, indicando que se tienen cargas orgánicas que pueden llegar a ocasionar perjuicios a la matriz en la que se depositen, por tanto, es necesario reducir los contaminantes antes de su disposición final.

### Caudal de diseño

Teniendo en cuenta que el caudal de la planta de tratamiento de agua potable es de 1,0 L/s, se asume un porcentaje de pérdidas típico del 30% en el sistema de distribución y un coeficiente de retorno de 0,85 según lo recomendado en la Resolución 0330 de 2017, la determinación del caudal medio residencial de agua residual se muestra a continuación:

<sup>1</sup> Tabla tomada de la resolución 631 del 7 de marzo de 2015, para aguas residuales con cargas menores a 625 kg/día DBO<sub>5</sub>

<sup>2</sup> DQO: Demanda Química de oxígeno.

<sup>3</sup> DBO: Demanda Biológica de oxígeno

<sup>4</sup> SST: Sólidos Suspendidos Totales

<sup>5</sup> ST: Sólidos Totales

<sup>6</sup> SF: Sólidos Fijos

<sup>7</sup> SV: Sólidos Volátiles

$$Q_{mr} = 0,7 * Q * Cr$$

Donde:

$Q_{mr}$ : Caudal medio residencial, L/s

Q: Caudal de la PTAP, L/s

Cr: Coeficiente de retorno

$$Q_{mr} = 0,7 * 1,0 \frac{L}{s} * 0,85 = 0,595 \frac{L}{s}$$

Para determinar el caudal medio diario se toma un valor de  $0,1 \frac{L}{s*ha}$  para aportes por infiltración según lo recomendado en el artículo 134 la Resolución 0330 de 2017. Así mismo, según el artículo 166 de la misma resolución y por las condiciones del proyecto se considera poco probable tener aportes por conexiones erradas, por lo que estos aportes no serán considerados.

$$Q_{md} = Q_{mr} + (A_i * F_{in}) + (A_i * F_{ce})$$

Donde,

$Q_{md}$ : Caudal medio diario, L/s

$Q_{mr}$ : Caudal medio residencial, L/s

$A_i$ : Area de influencia, m<sup>2</sup>

$F_{in}$ : Aportes por infiltración,  $\frac{L}{s*ha}$

$F_{ce}$ : Aportes por conexiones erradas,  $\frac{L}{s*ha}$

$$Q_{md} = 0,595 \frac{L}{s} + \left( 9 \text{ ha} * 0,1 \frac{L}{s * ha} \right) = 1,495 \frac{L}{s}$$

Para la determinación de los caudales máximos, se utilizarán los factores de mayoración presentados en la tabla 2, dados por el artículo 166 de la Resolución 0330 de 2017 para caudales menores a 10 L/s.

Tabla 2. Factores pico para caudales de tratamiento de aguas residuales

Factor máximo horario	Factor máximo diario	Factor máximo mensual
4	3	1,7

Fuente: (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)

Caudal máximo horario

$$Q_{Mh} = Q_{md} * F_{Mh}$$

Donde,

$Q_{Mh}$ : Caudal máximo horario, L/s

$Q_{md}$ : Caudal medio diario, L/s

$F_{Mh}$ : Factor máximo horario

$$Q_{Mh} = 1,5 \frac{L}{s} * 4 = 5,98 \frac{L}{s}$$

Caudal máximo diario

$$Q_{Md} = Q_{md} * F_{Md}$$

Donde,

$Q_{Md}$ : Caudal máximo diario, L/s

$Q_{md}$ : Caudal medio diario, L/s

$F_{Md}$ : Factor máximo diario

$$Q_{Md} = 1,5 \frac{L}{s} * 3 = 4,5 \frac{L}{s}$$

Caudal máximo mensual

$$Q_{Mm} = Q_{md} * F_{Mm}$$

Donde,

$Q_{Mm}$ : Caudal máximo mensual, L/s

$Q_{md}$ : Caudal medio diario, L/s

$F_{Mm}$ : Factor máximo mensual

$$Q_{Mm} = 1,5 \frac{L}{s} * 1,7 = 2,541 \frac{L}{s}$$

Teniendo en cuenta los anteriores caudales calculados en la Tabla 3 se encuentra para que módulos se utilizaran cada uno de ellos.

Tabla 3. Caudales de diseño para el tratamiento de agua residual

Tipo	Caudal		Estructura
Caudal medio doméstico	0,6	L/s	N/A
Caudal medio diario	1,5	L/s	NA
Caudal máximo horario	6	L/s	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desarenador</li> <li>• Cribado</li> <li>• Trampa de grasa</li> <li>• Sedimentador secundario</li> </ul>
Caudal máximo diario	4,5	L/s	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disposición del afluente</li> </ul>
Caudal máximo mensual	2,5	L/s	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lodos activados</li> </ul>

### Cargas contaminantes

Es necesario verificar que los aportes de cargas contaminantes que se derivan de la caracterización del agua residual y de los caudales estimados sean consecuentes con los valores de referencia en la literatura. Según el artículo 169 de la Resolución 0330 del 2017 los aportes típicos per cápita diarios para aguas residuales domesticas se encuentran entre 25-80 g/hab.día para DBO y 30 - 100 g/hab.día para SST.

Los aportes típicos per cápita de referencia se manejan en aportes diarios, en ese sentido, se calculan las cargas correspondientes a partir del caudal medio doméstico. No se usa el caudal medio diario pues no se deben tener en cuenta aun aportes adicionales por infiltración, esto porque el efecto real de las infiltraciones seria la dilución de la concentración de contaminantes en el agua residual. Si se calculara la carga per cápita diaria con un caudal mayor, se incurriría en una sobreestimación de los aportes. Sin embargo, en la práctica y para el diseño de las unidades respectivas en el presente trabajo se utilizan los diferentes caudales referenciados en la Tabla 3 (Romero, 2016).

Cada suscriptor abastecerá en promedio a 5 personas, los aportes per cápita diarios para el Condominio la Primavera son:

$$C = Conc * \frac{Q}{N_s}$$

Donde

C: Carga g/d

Conc: Concentración del parámetro (DQO, DBO<sub>5</sub>, SST O ST)

N<sub>s</sub>: Número de suscriptores

Q: caudal, L/d

$$C_{DQO} = 449 \frac{mg}{L} * \frac{0,595 \frac{l}{s}}{67 \text{ suscriptores}} * 86400 \frac{s}{d} * \frac{g}{10^3 mg} = 344,51 \frac{g}{\text{Suscriptor} * d}$$

$$PPC_{DQO} = 344,51 \frac{g}{\text{Suscriptor} * d} * \frac{1 \text{ suscriptor}}{5 \text{ habitantes}} = 68,9 \frac{g}{\text{hab} d}$$

$$C_{DBO} = 289,5 \frac{mg}{L} * \frac{0,595 \frac{l}{s}}{67 \text{ suscriptores}} * 86400 \frac{s}{d} * \frac{g}{10^3 mg} = 222,1 \frac{g}{\text{Suscriptor} * d}$$

$$PPC_{DBO} = 222,1 \frac{g}{\text{Suscriptor} * d} * \frac{1 \text{ suscriptor}}{5 \text{ habitantes}} = 44,4 \frac{g}{\text{hab} d}$$

$$C_{SST} = 164 \frac{mg}{L} * \frac{0,595 \frac{l}{s}}{67 \text{ suscriptores}} * 86400 \frac{s}{d} * \frac{g}{10^3 mg} = 125,83 \frac{g}{\text{Suscriptor} * d}$$

$$PPC_{SST} = 125,83 \frac{g}{\text{Suscriptor} * d} * \frac{1 \text{ suscriptor}}{5 \text{ habitantes}} = 25 \frac{g}{\text{hab} d}$$

$$C_{ST} = 680 \frac{mg}{L} * \frac{0,595 \frac{l}{s}}{67 \text{ suscriptores}} * 86400 \frac{s}{d} * \frac{g}{10^3 mg} = 521,75 \frac{g}{\text{Suscriptor} * d}$$

$$PPC_{ST} = 521,8 \frac{g}{\text{Suscriptor} * d} * \frac{1 \text{ suscriptor}}{5 \text{ habitantes}} = 104,3 \frac{g}{\text{hab} d}$$

Al realizar la comparación de resultados con el artículo 169 de la Resolución 0330 del 2017 los aportes de DBO con un valor de 44,4 g/hab.día son acordes con el rango de 25-80 g/hab.día. En cuanto a los SST el valor encontrado de 25 g/hab. día se encuentra por debajo del rango de 30 - 100 g/hab.día, sin embargo los valores del análisis de la muestra puntual tomada en el Condominio y sus aportes correspondientes se consideran aceptables.

### **Selección del sistema de tratamiento**

La PTAR se encargará de disminuir las cargas contaminantes presentes en el agua residual, para ello, disminuirán las concentraciones de DBO y SST de acuerdo con sus características físicas y químicas, para ello se utilizarán diferentes procesos unitarios de depuración.

Estos procesos serán seleccionados a partir de una matriz de evaluación, la cual hará un análisis multicriterio para determinar cuál es el mejor proceso de tratamiento para el agua del Condominio Campestre La Primavera.

Esta matriz evaluará parámetros básicos de cada uno de los procesos unitarios para el tratamiento de agua residual (pretratamiento, tratamiento secundario y disposición del efluente), determinando las mejores opciones para el diseño e instalación de la PTAR. Para ello se determinaban las fortalezas y debilidades de cada uno de los sistemas, encontrando cuál de ellos tiene el mejor desempeño para el proyecto.

Además de esto, se priorizarán en algunos casos ciertos aspectos que son de mayor relevancia para el diseño y los cuales pueden ser determinantes en la puesta en marcha de la planta. En este sentido se utilizará una asignación de pesos a algunas variables, y de forma general entre mayor sea el puntaje final la opción será seleccionada.

### ***Pretratamiento***

Para el pretratamiento se tendrán en cuenta los parámetros como facilidad de limpieza, necesidad para el tratamiento y facilidad de construcción.

- La facilidad de limpieza hace referencia a que dichos sistemas de tratamiento no tengan zonas con espacios muertos o con complejidad para la remoción de productos retenidos por dichos sistemas.
- El parámetro facilidad de construcción consiste en que estas estructuras de tratamiento tengan una construcción sencilla y económica, sin procesos complejos de construcción, se tendrá en cuenta que todas las estructuras serán realizadas en concreto cerrado de 4 psi asegurando que estas sean impermeables.
- Necesidad para el tratamiento, describe si es necesario este acondicionamiento que ofrece la estructura para el tratamiento, si este mejorara las condiciones o impedirá daños en las estructuras siguientes.

La matriz de evaluación para el pretratamiento se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Matriz evaluación de pretratamiento

Estructura	Facilidad de limpieza	Facilidad de construcción	Necesidad para el tratamiento	Sumatoria máxima pretratamiento
	0-2	0-2	0 v 2	8

Fuente: Elaboración propia

- Facilidad de limpieza (FL)

0: Representa que la estructura tiene una alta complejidad de limpieza.

1: Hace referencia que la estructura tiene complejidad media de limpieza.

2: La estructura tiene baja complejidad de limpieza.

- Facilidad de construcción (FC)

0: Representa que la estructura tiene una alta complejidad de construcción.

1: Hace referencia que la estructura tiene complejidad media de construcción.

2: La estructura tiene baja complejidad de construcción.

- Necesidad para el tratamiento (NT)

0: No es necesario para el tratamiento y/o no mejorará los procesos siguientes.

2: Es necesario para que el tratamiento funcione bien y/o mejorara los procesos posteriores

La selección de las estructuras será dada por la siguiente ecuación:

$$P_{pt}: FL + FC + NT$$

Donde,

$P_{pt}$ : Puntaje para el pretratamiento

FL= Facilidad de limpieza

FC: Facilidad de construcción

NT: Necesidad para el tratamiento

Se da un valor igual a todos los parámetros de evaluación, las estructuras con mayor puntaje en cada uno de los procesos unitarios serán las más óptimas, por tanto, estas se incluirán en el tren de tratamiento de la planta. A continuación, se presentan la matriz de evaluación para el pretratamiento en la Tabla 5.

Tabla 5. Selección para el pretratamiento

Estructura		Facilidad de limpieza	Facilidad de construcción	Necesidad para el tratamiento	Sumatoria máxima
Cribado	Rejilla de barros	2	2	2	6
	Rejilla con orificios	1	1	2	4
Extracción de grasas	Flotación con inyección de aire	2	0	2	4
	Trampa de grasas y aceites	2	2	2	6

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5 se expone las opciones para la selección de las estructuras de pretratamiento, para el cribado se selecciona una rejilla con barros, a causa de su fácil construcción y mantenimiento

Para el desarenador solo se seleccionó la opción de un canal con vertedero de control, por su facilidad de construcción y limpieza, dado que es una estructura de baja complejidad, y dimensiones con mayor facilidad de fabricación con concreto.

Mientras, el mejor método para la extracción de grasas y aceites generados por el Condominio Campestre La primavera es una trampa de grasas y aceites tradicional dado a que es sencillo su construcción operación y limpieza, además de que no necesita equipos extra para su funcionamiento.

### ***Tratamiento secundario***

Teniendo en cuenta que el agua corresponde a un agua residual típica es conveniente implantar un sistema de tratamiento biológico, el cual pueda reducir la carga orgánica hasta concentraciones que no generen grandes impactos. Entre los parámetros que se evaluarán para designar el tratamiento biológico serán la eficiencia, el área de ocupación, la producción de olores y la confiabilidad.

- La eficiencia será un parámetro que medirá la remoción de sustancias suspendidas o disueltas en el agua. Los parámetros de sólidos suspendidos totales y demanda biológica de oxígeno se tendrán como parámetros de referencia, con los cuales se evaluarán las principales eficiencias de remoción.
- El área de ocupación, describe la cantidad de terreno que ocupará la planta de tratamiento. Dado que no se tiene un área ilimitada, es importante calcular la ocupación total del reactor del terreno.
- La producción de olores evalúa el potencial de producción de gases con características que puedan ocasionar incomodidad en los habitantes aledaños del sector.
- La confiabilidad hace referencia a la capacidad de soportar picos de concentración, e interrupciones de caudal.

La matriz de selección para el tratamiento secundario se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Matriz de selección tratamiento secundario.

Parámetro	Eficiencia	Área de ocupación	Producción de olores	Confiabilidad	Sumatoria máxima tratamiento secundario
	1 - 5	0 - 2	0 - 2	0 - 2	8

Fuente: Elaboración propia

- Eficiencia (EF)

- 1: Eficiencia en remoción de DBO y SST de 0% a 20%
- 2: Eficiencia en remoción de DBO y SST de 20% a 40%
- 3: Eficiencia en remoción de DBO y SST de 40% a 60%
- 4: Eficiencia en remoción de DBO y SST de 60% a 80%
- 5: Eficiencia en remoción de DBO y SST de 80% a 100%

- Área de ocupación (AO)

- 0: Representa que la estructura tiene una alta área de ocupación.
- 1: Hace referencia que la estructura tiene ocupación media de área requerida.
- 2: La estructura tiene un bajo requerimiento de terreno necesario.

- Producción de olores (PO)

- 0: Representa que la estructura tiene una alta producción de olores.
- 1: Hace referencia que la estructura tiene tasa media de producción de olores.
- 2: La estructura tiene una baja producción de olores.

- Confiabilidad (CF)

- 0: Representa que la estructura tiene una alta confiabilidad.
- 1: Hace referencia que la estructura tiene una media confiabilidad.
- 2: La estructura tiene una baja confiabilidad.

El puntaje cuantitativo de selección se dará por la siguiente ecuación:

$$P_{sc} = EF + AO + PO + CF$$

Donde,

$P_{sc}$ : Puntaje para la matriz de evaluación tratamiento secundario.

EF: Eficiencia

AO: área de ocupación

PO: Producción de olores

CF: Confiabilidad

Se dará un valor equitativo a cada uno de los parámetros de evaluación, con ello se tendrá una evaluación multiparámetro que tomará las condiciones del condominio la primavera para realizar la selección más apropiada. En la tabla 7, se muestra la cuantificación de los puntajes obtenidos para el pretratamiento.

Tabla 7. Selección para el tratamiento secundario

Parámetro	Eficiencia	Área de ocupación	Producción de olores	Confiabilidad	Sumatoria máxima
Reactor UASB	4	2	0	1	7
Laguna facultativa	5	0	1	2	8
Reactor RAP	4	2	0	1	7
Lodos activados	5	2	1	1	9
Filtro percolador	4	2	1	1	8
Pozo séptico	4	2	0	2	8

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 7 describe que el tratamiento más indicado para la instalación en el condominio es el reactor de lodos activados el cual tiene buenas eficiencias, una baja área de ocupación, confiabilidad media y una tasa de producción de olores baja.

### ***Opciones de vertimiento***

Es necesario definir el tipo de vertimiento que tendrá la planta de tratamiento, el producto final será vertido de tal forma que el cuerpo receptor soporte la cantidad y calidad de agua entregada a este, para ello es necesario observar la proximidad y la disponibilidad del cuerpo receptor.

- La proximidad del medio se refiere a la distancia a la cual se encuentra el sitio de vertimiento.
- La disponibilidad del medio, describe parámetros tales como si es posible hacer un vertimiento, la calidad del mismo, y los usos que este puede tener.

Adicionalmente para determinar el método de disposición más favorable se realiza una prueba de infiltración. Dicho ensayo se realiza con una excavación manual con un diámetro de 30 cm y 25 cm de profundidad como se observa en la Figura 10, la prueba de infiltración fue realizada en las coordenadas 5°54'16.58"N, 73°36'13.28"O.

Figura 10. Agujero para la prueba de infiltración.



Fuente: Elaboración propia

Antes de iniciar la prueba de infiltración se realiza una saturación del terreno durante 12 horas para observar la tasa de infiltración en las condiciones más desfavorables. La prueba de infiltraciones realizada el día 23 de agosto del 2020 y se inicia a las 10: 26 a.m., llenando totalmente el agujero y tomando medidas inicialmente cada 2 minutos, posteriormente cada 30 minutos hasta la 1:59 p.m., teniendo una duración total de 3 horas 33 minutos, y descendiendo una totalidad de 5.8 cm. Se muestra en la Tabla 8 los resultados de esta prueba.

Tabla 8. Prueba de infiltración

Hora inicial	Hora final	Minutos	Lectura inicial (cm)	Lectura final (cm)	Diferencia (cm)	Tasa (min/cm)
10:26:00 a. m.	10:30:00 a. m.	4	30,7	29,3	1,4	2,86
10:30:00 a. m.	10:32:00 a. m.	2	29,3	28,9	0,4	5,00
10:32:00 a. m.	10:34:00 a. m.	2	29,3	28,9	0,4	5,00
10:34:00 a. m.	10:59:00 a. m.	25	29,3	28,8	0,5	50,00
10:59:00 a. m.	11:29:00 a. m.	30	28,8	28,1	0,7	42,86
11:29:00 a. m.	11:59:00 a. m.	30	27,1	26,5	0,6	50,00
11:59:00 a. m.	12:29:00 p. m.	30	26,5	26	0,5	60,00
12:29:00 p. m.	12:59:00 p. m.	30	26	25,7	0,3	100,00
12:59:00 p. m.	1:29:00 p. m.	30	25,7	25,3	0,4	75,00
1:29:00 p. m.	1:59:00 p. m.	30	25,3	24,9	0,4	75,00
		213	Total		5,6	

Fuente: Elaboración propia

Luego del periodo de medición y en condiciones de saturación los últimos valores encontrados de tasas de infiltración corresponden a los valores mas representativos de las condiciones mas desfavorables de infiltracion del agua en el suelo, siendo de 75,00 min/cm.

De acuerdo con Romero (2016) los suelos con unas tasas de infiltración mayores a 18 min/cm son de tipo marga arcillolimoso o marga arcillosa; este tipo de suelo tiene permeabilidades muy bajas, por tanto no es recomendable el vertimiento al suelo para este caso. Por lo cual la opcion mas favorable es realizar un vertimiento a un cuerpo de agua superficial.

Se plantea a consideración de la Autoridad Ambiental pertinente realizar un proceso de cloración antes del vertimiento final, el propósito de esta cloración es proteger de la contaminación por patógenos. Desde una perspectiva epidemiológica esta actividad es recomendada, sin embargo, desde un punto de vista toxicológico la formación de subproductos de desinfección, como por ejemplo los trihalometanos

como el cloroformo, se constituyen como un riesgo crónico a la salud de la población expuesta.

La matriz de evaluación para la selección del tipo de vertimiento se encuentra en la Tabla 9.

Tabla 9. Matriz de evaluación Vertimiento

Tipo de vertimiento	Proximidad	Disponibilidad	Sumatoria
	0-1	0-1	2

Fuente: Elaboración propia

- Proximidad (PRX)

0: Representa que el sitio de vertimiento es lejano.

1: Indica que se encuentra a poca distancia de la planta.

- Disponibilidad (DPD)

0: No tiene la suficiente capacidad para soportar el vertimiento

1: Tiene la suficiente capacidad para soportar el vertimiento.

- Impacto ambiental (IM)

0: Representa que la estructura tiene un alto impacto.

1: Hace referencia que la estructura tiene un impacto medio.

2: La estructura tiene un bajo impacto.

El puntaje para la selección el vertimiento será:

$$P_{ver} = PRX + DPD + IM$$

Donde,

$P_{ver}$ : Puntaje de selección para el vertimiento

PRX: Proximidad

DPD: Disponibilidad

IM: Impacto ambiental

En esta ecuación igual que para el puntaje de disposición del efluente se ponen todas las variables con igual peso sin priorizar ninguna. En la tabla 10, se muestra la selección y la cuantificación cualitativa de las características de los vertimientos.

Tabla 10. Selección del vertimiento

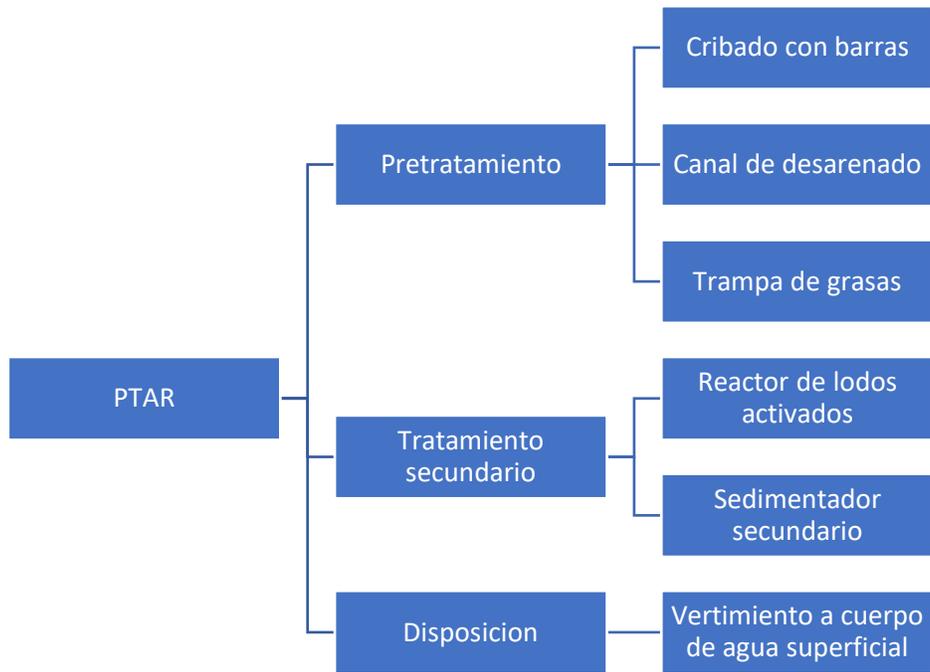
Tipo	Proximidad	Disponibilidad	Impacto	Sumatoria
Vertimiento en Quebrada "Las Fuentecitas"	1	0	1	2
Vertimiento en Quebrada "NN"	0	0	1	1
Vertimiento en Río Moniquirá	0	1	1	2

Fuente: Elaboración propia

Según la Tabla 10 se recomienda el vertimiento a la Quebrada "Las Fuentecitas" o al Río Moniquirá a consideración de la autoridad ambiental competente.

Teniendo en cuenta lo anterior la planta de tratamiento de agua residual tendrá la distribución mostrada en la Figura 11.

Figura 11. Distribución de la PTAR



Fuente: Elaboración propia

## Capítulo 5 Diseño de la planta de tratamiento de agua residual

### Diseño del sistema de pretratamiento

La primera fase de tratamiento corresponde al acondicionamiento de las aguas residuales, para facilitar la depuración de las mismas y proteger las estructuras del sistema de tratamiento, en este proceso se realizará un desbaste de sólidos gruesos, eliminación de grasas y una remoción de sólidos discretos fácilmente sedimentables.

#### *Cribado*

Inicialmente se plantea un proceso de desbaste de grandes sólidos, con lo cual se evitará la entrada de material que pueda inhibir el tratamiento biológico, así como para proteger las tuberías, estructuras y equipos de la PTAR. Para ello, es necesario la utilización de un sistema de rejillas el cual retendrá material grueso entrante. Dando prioridad a la facilidad de construcción del proceso, se dimensionará un sistema de cribado con rejillas fijas.

El sistema de rejillas fijas contara con dos rejillas de diferentes espaciamientos, instaladas a lo largo de un canal recto. Esta estructura es de fácil construcción y mantenimiento, además asegurará la retención de los materiales sólidos con tamaños mayores a 1 centímetros.

#### *Parámetros de diseño.*

- Caudal, 6 L/s
- Inclinación  $\theta = 50^\circ$ , para una limpieza manual.
- Pérdidas máximas, 15 cm
- Material del canal concreto liso ( $n= 0,011$ )
- Velocidad del canal de aproximación, 0,6 m/s (Artículo 186 Resolución 0330 del 2019)
- Borde libre, 0,1 m

#### *Memoria de cálculo*

- **Canal de aproximación**

La estructura de cribado será diseñada con el caudal máximo horario, se calcula el canal de aproximación bajo el mismo criterio, y teniendo una velocidad de aproximación de 0,6 m/s, como recomendación del artículo 186 de Resolución 0330 de 2017.

- Área transversal

$$A_{tc} = \frac{Q_{Mh}}{v_a}$$

Donde,

$Q_{Mh}$ : Caudal máximo horario, m<sup>3</sup>/s

$v_a$ : Velocidad de aproximación, m/s

$A_{tc}$ : Area transversal del canal de cribado, m<sup>2</sup>

$$A_{tc} = \frac{\left(0,006 \frac{m^3}{s}\right)}{0,6 \frac{m}{s}} = 0,01 m^2$$

Se define que el ancho de la sección rectangular tendrá 2 veces la altura de la lámina de agua, con lo cual tenemos:

- Altura de la lámina de agua

$$H_{Li} = \left(\frac{A_{tc}}{2}\right)^{\left(\frac{1}{2}\right)}$$

Donde,

$H_{Li}$ : Altura de la lámina de agua, m

$A_{tc}$ : Area transversal del canal de cribado, m<sup>2</sup>

$$H_{Li} = \left(\frac{0,01 m^2}{2}\right)^{\frac{1}{2}} = 0,07 m$$

- Altura del canal

$$H_c = H_{Li} + Bl$$

$H_c$ : Altura del canal, m

Bl: borde libre, m

$H_{Li}$ : Altura de la lámina de agua, m

$$H_c = 0,07 \text{ m} + 0,10 \text{ m} = 0,17 \text{ m}$$

- Ancho

$$B = 2 * H_{Li} = 2 * 0,07 \text{ m} = 0,14 \text{ m}$$

Donde,

B: amplitud transversa del canal, m

$H_{Li}$ : Altura de la lámina de agua, m

- Pendiente del canal

Teniendo en cuenta las dimensiones de la sección del canal y la velocidad anteriormente descritas se obtiene:

$$v_a = \frac{1}{n} * R^{\frac{2}{3}} * s^{\frac{1}{2}}$$

Donde,

R: Radio Hidráulico

s: Pendiente del canal, m/m

n: Coeficiente de fricción de Manning

B: amplitud transversa del canal, m

$H_{Li}$ : Altura de la lámina de agua, m

$$s = \left( v * \frac{n}{R^{\frac{2}{3}}} \right)^2$$

Radio hidráulico para una sección rectangular es:

$$R = \frac{B * H_{Li}}{B + (2 * H_{Li})}$$

Entonces,

$$s = \left( v * \frac{n}{\frac{B * H_{Li}^{\frac{2}{3}}}{B + (2 * H_{Li})}} \right)^2$$

$$s = \left( 0,6 \frac{m}{s} * \frac{0,011}{\frac{0,14 m * 0,07 m}{0,14 m + (2 * 0,07 m)}} \right)^2 = 0,035 \frac{m}{m} \cong 3,5\%$$

Se define que el canal de aproximación tendrá 1 metro de longitud.

- Rejilla de cribado
  - Primera rejilla

La primera rejilla constará de barras de 3/8", (diámetro de 0,96 cm) y se retendrán solidos mayores a 1 cm (espaciamento entre rejillas).

- Pérdidas en la rejilla

Se utiliza la ecuación de Kirschmer para el cálculo de pérdidas. (Romero, 2016)

$$P_{r1} = \beta \left( \frac{w}{b_b} \right)^{\frac{4}{3}} * h_v * \text{sen}\theta$$

Donde,

$P_{r1}$ : pérdidas en la primera rejilla, m

$\beta$ : Factor de forma, (1,79 para barras circulares (Romero, 2016)

$w$ : Ancho de las barras, cm

$b_b$ : Amplitud de los espacios entre barras

$h_v$ = energía de velocidad de flujo de aproximación.

$$P_{r1} = 1,79 * \left( \frac{0,96 \text{ cm}}{1 \text{ cm}} \right)^{\frac{4}{3}} * \left( \frac{(0,6 \frac{m}{s})^2}{2 * 9,8} \right) * \text{sen } 50^\circ = 0,024 \text{ m}$$

- Longitud de la primera rejilla

$$H_r = \frac{H_{li}}{\text{sen}\theta}$$

Donde,

$H_r$ : Longitud de la rejilla, m

$H_{li}$ : Altura de la lámina de agua, m

$\theta$ = Angulo de inclinación

$$H_r: \frac{0,07 \text{ m}}{\text{sen}50^\circ} = 0,09 \text{ m}$$

La primera rejilla y segunda rejilla serán 4 cm más largas después de llegar al nivel de la lámina de agua, por tanto, tendrán una longitud de 0,13 m

- Numero de barras

El número de barras estará dado por la siguiente ecuación:

$$wn + (n + 1)b_b = B$$

Donde,

$n$ : Numero de barras

$w$ : Ancho de las barras, cm

$b_b$ : Amplitud de los espacios entre barras, cm

$B$ = Ancho del canal, cm

$$0,96 \text{ cm} * n + (n + 1) * 1 \text{ cm} = 14 \text{ cm}$$

Resolviendo:

$$n \cong 6$$

Longitud total

$$0,96 * 6 + 1 * (6 + 1) = 12,8$$

Se tendrán 6 barras en esta primera rejilla, cada una de 0,96 cm, en la Figura 12 se encuentra un diagrama de cribado

- Segunda rejilla

La segunda rejilla constará de barras de 0,96 cm de diámetro, y se retendrán sólidos mayores a 0,5 cm (espaciamiento entre rejillas).

- Pérdidas en la rejilla

Se utiliza la ecuación de Kirschmer para el cálculo de pérdidas. (Romero, 2016)

$$P_{r2} = \beta \left( \frac{w}{b_b} \right)^{\frac{4}{3}} * h_v * \text{sen}\theta$$

Donde,

$P_{r2}$ : pérdidas en la segunda rejilla, m

$\beta$ : Factor de forma, (1,79 para barras circulares (Romero, 2016)

$w$ : Ancho de las barras, cm

$b_b$ : Amplitud de los espacios entre barras

$h_v$ = energía de velocidad de flujo de aproximación.

$$P_{r2} = 1,79 * \left( \frac{0,96 \text{ cm}}{0,5 \text{ cm}} \right)^{\frac{4}{3}} * \left( \frac{(0,6 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2 * 9,8} \right) * \text{sen } 50^\circ = 0,06 \text{ m}$$

- Numero de espacios

El número de espacios estará dado por la siguiente ecuación:

$$wn + (n + 1)b_b = B$$

Donde,

$n$ : Numero de espacios

$w$ : Ancho de las barras, cm

$b_b$ : Amplitud de los espacios entre barras, cm

$B$ = Ancho del canal, cm

$$0,96 \text{ cm} * n + (n + 1) * 0,5 \text{ cm} = 14 \text{ cm}$$

Resolviendo:

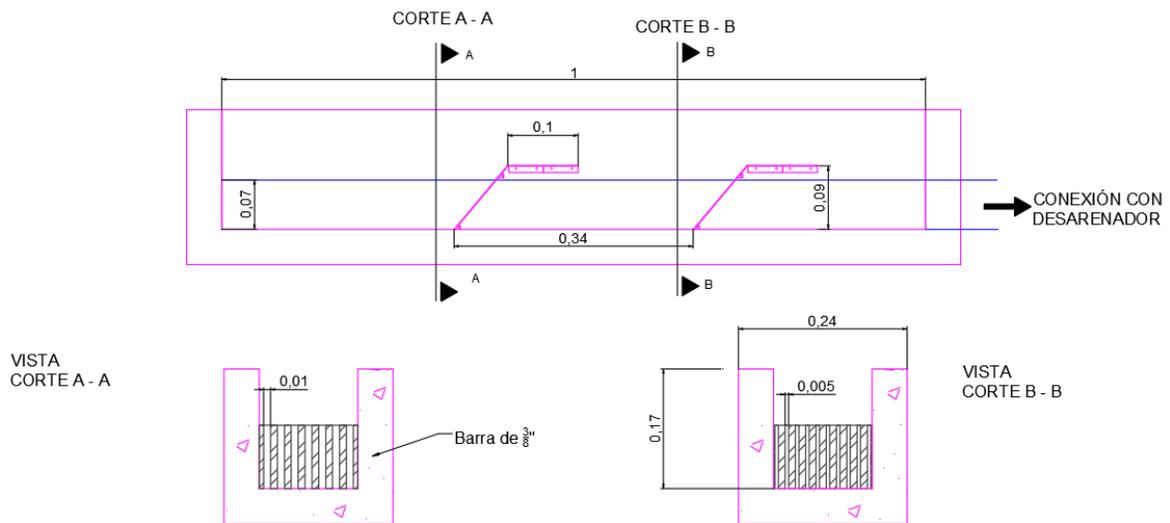
$$n \cong 9$$

Comprobando

$$0,96 \text{ cm} * 9 + 1,1 \text{ cm} * (9 + 1) = 13,64 \text{ cm}$$

Se tendrán 9 barras en esta segunda rejilla, en la Figura 12 se encuentra un diagrama de cribado y en la Tabla 10, el resumen de parámetros del cribado

Figura 12. Diagrama de estructura cribado



Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Características cribado

Parámetro	Primera rejilla	Segunda rejilla
Numero de barras	6	9
Ancho de barra	0,96 cm	0,96 cm
Pérdidas en la rejilla	0,024 m	0,06 m
Espacios entre barras	1 cm	0,5 cm

Fuente: Elaboración propia

## **Desarenador**

Según López Cualla (2004) y Romero (2016) un desarenador es un tanque construido con el propósito de remover arena, grava, partículas u otro material por la acción de la gravedad. Este elemento constituye un pretratamiento, esta estructura se construye para evitar la entrada de sólidos discretos, y otras partículas gruesas a los reactores minimizando la necesidad de limpieza de estos y además protege los equipos mecánicos de un desgaste más alto que el normal. Según el artículo 188 de la Resolución 0330 de 2017 los desarenadores de agua residual deben asegurar la remoción de partículas con un diámetro mínimo de 0.3 mm, utilizando una velocidad de decantación de 0.03 m/s, con velocidades horizontales de paso menores a 0.3 m/s.

### *Parámetros de diseño*

Numero de módulos, 2

Caudal medio diario por modulo: 0,75 L/s

Caudal máximo diario por modulo: 2,25 L/s

Caudal máximo horario por modulo: 3 L/s

Caudal en caso de mantenimiento de un canal: 6 L/s

### *Memoria de calculo*

El cálculo del desarenador está basado en la metodología dada por Romero, un canal parabólico con sección de control rectangular (Romero, 2016). Cada canal de desarenado tendrá una amplitud de 0,20 m y tendrá una velocidad de paso de 0,3 m/s (según lo dictado por el artículo 188 de la resolución 0330 de 2017 ).

- Caudal máximo horario (3 L/s)
  - Altura para caudal máximo horario

$$H_{Mh} = \frac{3Q_{Mh}}{2Tv}$$

Donde,

$H_{Mh}$ : Altura para caudal máximo horario, m

$Q_{Mh}$ : Caudal máximo horario, (m<sup>3</sup>/s)

T: Ancho superior de la sección, (0,20 m)

$v$ : Velocidad en el canal de desarenado, m/s

$$H_{Mh} = \frac{3 * 0,003 \frac{m^3}{s}}{2 * 0,20 m * 0,3 \frac{m}{s}} = 0,075 m$$

- Energía en el desarenador

$$Energía en el desarenador = \left( H_{Mh} + \frac{v^2}{2 * g} \right)$$

Donde,

$H_{Mh}$ : Altura para caudal máximo horario, m

$v$ : Velocidad en el canal de desarenado, m/s

- Altura de velocidad en la sección de control rectangular

$$\frac{v_c^2}{2g} = \frac{1}{3,1} \left( H_{Mh} + \frac{v^2}{2 * g} \right)$$

Donde,

$\frac{v_c^2}{2g}$ : Altura de velocidad en la sección de control rectangular, m

$H_{Mh}$ : Altura para caudal máximo horario, m

$v$ : Velocidad en el canal de desarenado, m/s

$$\frac{v_c^2}{2g} = \frac{1}{3,1} * \left( 0,075 m + \left( \frac{0,3^2}{2 * 9,8} \right) \right) = 0,03 m$$

- Profundidad crítica para el caudal máximo horario en la sección de control

$$d_{cMH} = 2 * \frac{v_c^2}{2g}$$

Donde,

$d_{cMH}$ : Profundidad crítica para el caudal máximo horario

$\frac{v_c^2}{2g}$ : Altura de velocidad en la sección de control rectangular, m

$$d_{cMh} = 2 * 0,03 \text{ m} = 0,05 \text{ m}$$

- Velocidad en la sección de control

$$v_c = \left( 2 * g * \frac{v_c^2}{2g} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Donde,

$v_c$ : Velocidad en la sección de control, m/s

$\frac{v_c^2}{2g}$ : Altura de velocidad en la sección de control rectangular, m

$$v_c = \left( 2 * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,03 \text{ m} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- Área de la sección de control

$$a_c = \frac{Q_{Mh}}{v_c}$$

Donde,

$a_c$ : Área de la sección de control

$Q_{Mh}$ : Caudal máximo horario en la sección del desarenador, m<sup>3</sup>/s

$v_c$ : Velocidad de en la sección de control, m/s

$$a_c = \frac{0,003 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,004 \text{ m}^2$$

- Ancho de la sección de control

$$w = \frac{a_c}{d_{cMh}}$$

Donde,

$w$ : Ancho de la sección de control, m

$a_c$ : Area de la sección de control

$d_{cMH}$ : Profundidad crítica para el caudal máximo horario, m

$$w = \frac{0,004 \text{ m}^2}{0,05 \text{ m}} = 0,08 \text{ m}$$

- Caudal máximo diario (2,25 L/s)
  - Área de flujo en la sección de control para el caudal máximo diario

$$a_{dMd} = \left( \frac{Q_{Md}^2 w}{g} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Donde,

$a_{dMd}$ : Área de flujo en la sección de control para el caudal máximo diario, m<sup>2</sup>

$Q_{Md}$ : Caudal máximo diario para el módulo del canal de desarenado

$w$ : Ancho de la sección de control, m

$$a_{dMd} = \left( \frac{\left(0,00225 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)^2 * 0,08}{9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,003 \text{ m}^2$$

- Profundidad crítica para el caudal máximo diario

$$d_{cMd} = \frac{a_{dMd}}{w}$$

Donde,

$d_{cMd}$ : Profundidad crítica para el caudal máximo diario

$a_{dMd}$ : Área de flujo en la sección de control para el caudal máximo diario, m<sup>2</sup>

$w$ : Ancho de la sección de control, m

$$d_{cMd} = \frac{0,003 \text{ m}^2}{0,08 \text{ m}} = 0,04 \text{ m}$$

- Profundidad en la cámara desarenadora para el caudal máximo diario

$$H_{dMd} = \frac{3,1 * d_{cMd}}{2} - \left( \frac{(v)^2}{2 * g} \right)$$

Donde,

$H_{dMd}$ : Profundidad en la cámara desarenadora para el caudal máximo diario, m

$d_{cMd}$ : Profundidad crítica para el caudal máximo diario en la sección de control, m

$v$ : Velocidad en el canal de desarenado, m/s

$$H_{dMd} = \frac{3,1 * 0,04 \text{ m}}{2} - \left( \frac{(0,3)^2}{2 * 9,8} \right) = 0,06 \text{ m}$$

- Ancho de la lámina de agua en el canal para el caudal máximo diario

$$T_{dMd} = \frac{3 * Q_{Md}}{2 * H_{dMd} * v}$$

Donde,

$T_{dMd}$ : Ancho de la lamina de agua en el canal para el caudal máximo diario, m

$Q_{Md}$ : Caudal Máximo diario, m<sup>3</sup>/s

$H_{dMd}$ : Profundidad en la cámara desarenadora para el caudal máximo diario

$v$ : Velocidad en el canal de desarenado, m/s

$$T_{dMd} = \frac{3 * 0,00225 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{2 * 0,06 \text{ m} * 0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,18 \text{ m}$$

- Caudal medio diario,(0,75 L/s)
  - Área de flujo en la sección de control para el caudal medio diario

$$a_{dmd} = \left( \frac{Q_{md} * w}{g} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Donde,

$a_{dmd}$ : Área de flujo en la sección de control para el caudal medio diario, m<sup>2</sup>

$Q_{md}$ : Caudal medio diario para el módulo del canal de desarenado

$w$ : Ancho de la sección de control, m

$g$ : Gravedad, (9,8 m/s<sup>2</sup>)

$$a_{dmd} = \left( \frac{(0,00075 \frac{m^3}{s})^2 * 0,08}{9,8 \frac{m}{s^2}} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,0016 m^2$$

- Profundidad crítica para el caudal medio diario

$$d_{cmd} = \frac{a_{dmd}}{w}$$

Donde,

$d_{cmd}$ : Profundidad crítica para el caudal medio diario en la sección de control, m

$a_{dmd}$ : Área de flujo en la sección de control para el caudal medio diario, m<sup>2</sup>

$w$ : Ancho de la sección de control, m

$$d_{cmd} = \frac{0,0016 m^2}{0,08 m} = 0,02 m$$

- Profundidad en la cámara desarenadora para el caudal medio diario

$$H_{dmd} = \frac{3,1 * d_{cmd}}{2} - \left( \frac{(v)^2}{2 * g} \right)$$

Donde,

$H_{dmd}$ : Profundidad en la cámara desarenadora para el caudal medio diario, m

$d_{cmd}$ : Profundidad crítica para el caudal medio diario en la sección de control, m

$v$ : Velocidad en el canal de desarenado, m/s

$$H_{dmd} = \frac{3,1 * 0,02 m}{2} - \left( \frac{(0,3)^2}{2 * 9,8} \right) = 0,026 m$$

- Ancho de la lámina de agua en el canal para el caudal medio diario

$$T_{dmd} = \frac{3 * Q_{md}}{2 * H_{dmd} * v}$$

Donde,

$T_{dmd}$ : Ancho de la lámina de agua en el canal para el caudal medio diario, m

$Q_{md}$ : Caudal medio diario, m<sup>3</sup>/s

$H_{amd}$ : Profundidad en la cámara desarenadora para el caudal medio diario

$v$ : Velocidad en el canal de desarenado, m/s

$$T_{amd} = \frac{3 * 0,00075 \frac{m^3}{s}}{2 * 0,026 m * 0,3 \frac{m}{s}} = 0,083 m$$

- Caudal de emergencia o limpieza, (6 L/s)

En caso de limpieza de uno de los desarenadores, el restante debe soportar un caudal de 6 L/s

- Área de flujo en la sección de control para el caudal de limpieza

$$a_{de} = \left( \frac{Q_e * w}{g} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Donde,

$a_{de}$ : Área de flujo en la sección de control para el caudal de limpieza, m<sup>2</sup>

$Q_e$ : Caudal de emergencia para el módulo del canal de desarenado

$w$ : Ancho de la sección de control, m

$g$ : Gravedad, (9,8 m/s<sup>2</sup>)

$$a_{de} = \left( \frac{(0,006 \frac{m^3}{s})^2 * 0,08}{9,8 \frac{m}{s^2}} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,006 m^2$$

- Profundidad crítica para el caudal de emergencia

$$d_{ce} = \frac{a_{de}}{w}$$

Donde,

$d_{ce}$ : Profundidad crítica para el caudal de emergencia

$a_{de}$ : Área de flujo en la sección de control para el caudal de emergencia, m<sup>2</sup>

$w$ : Ancho de la sección de control, m

$$d_{ce} = \frac{0,006 \text{ m}^2}{0,08 \text{ m}} = 0,08 \text{ m}$$

- Profundidad en la cámara desarenadora para el caudal de emergencia

$$H_{de} = \frac{3,1 * d_{ce}}{2} - \left( \frac{(v)^2}{2 * g} \right)$$

Donde,

$H_{de}$ : Profundidad en la cámara desarenadora para el caudal de emergencia, m

$d_{ce}$ : Profundidad crítica para el caudal de emergencia en la sección de control, m

$v$ : Velocidad en el canal de desarenado, m/s

$$H_{de} = \frac{3,1 * 0,08 \text{ m}}{2} - \left( \frac{(0,3)^2}{2 * 9,8} \right) = 0,12 \text{ m}$$

- Ancho de la lámina de agua en el canal para el caudal de emergencia

$$T_{de} = \frac{3 * Q_e}{2 * H_{de} * v}$$

Donde,

$T_{de}$ : Ancho de la lámina de agua en el canal para el caudal de emergencia, m

$Q_e$ : Caudal de emergencia, m<sup>3</sup>/s

$H_{de}$ : Profundidad en la cámara desarenadora para el caudal de emergencia

$v$ : Velocidad en el canal de desarenado, m/s

$$T_{de} = \frac{3 * 0,0006 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{2 * 0,12 \text{ m} * 0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,25 \text{ m}$$

El ancho teórico encontrado para el caudal de emergencia corresponde a un valor más grande que el ancho fijo del canal de 0,2 m. En ese sentido se esperaría que, al constreñir el ancho teórico a un ancho fijo del canal, se alcance una altura mayor a la teórica.

En este caso se tendrían las siguientes condiciones reales de flujo para el caudal de emergencia:

$$H_{de} = \frac{3Q_e}{2Tv}$$

Donde,

$H_{de}$ : Altura para caudal de emergencia, m

$Q_e$ : Caudal de emergencia, (m<sup>3</sup>/s)

T: Ancho superior de la sección, (0,2 m)

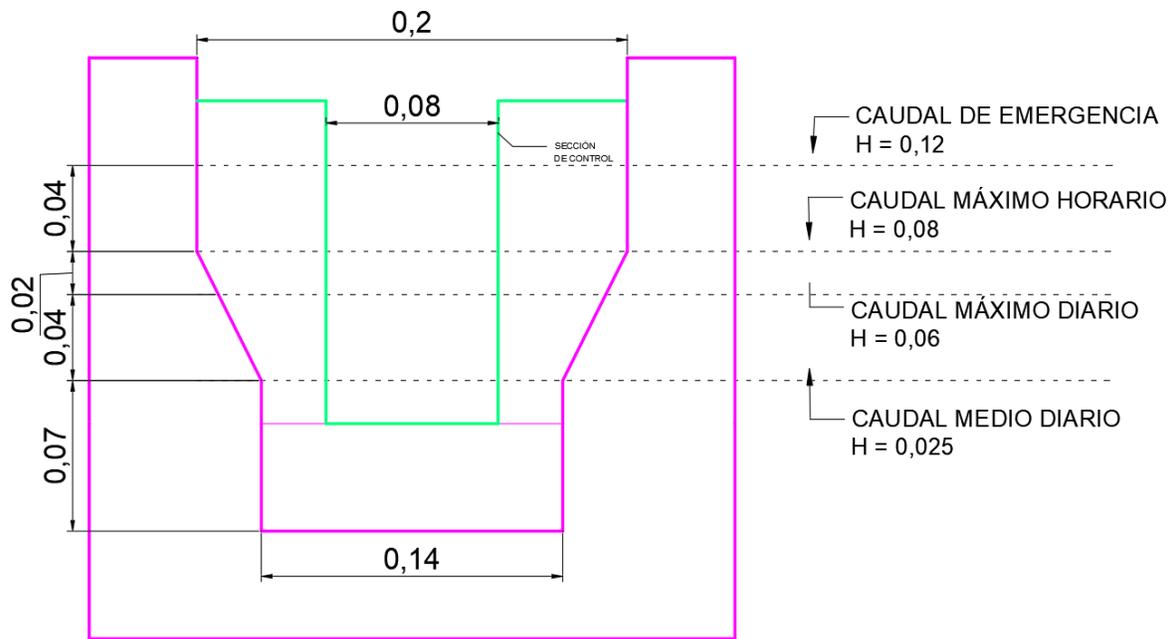
$v$ : Velocidad en el canal de desarenado, m/s

$$H_{de} = \frac{3 * 0,006 \frac{m^3}{s}}{2 * 0,2 m * 0,3 \frac{m}{s}} = 0,15 m$$

Sumado a la altura para caudal máximo horario se le añade un borde libre de 10 centímetros, para evitar que el caudal supere la altura de la estructura, por tanto, la altura del desarenador será 0,25 m.

En la Figura 13 se presenta un diagrama de la sección de control con las alturas para cada uno de los caudales.

Figura 13. Diagrama de la sección de control



Fuente: Elaboración propia

- Longitud de la cámara desarenadora

Para el cálculo de la longitud se escoge una partícula más crítica que la recomendada por la resolución 330. Se removerán partículas de 0,21 mm, con una velocidad de asentamiento de 1,15 m/min (Romero, 2016):

$$L_{td} = H_{dmh} * \frac{v}{v_s}$$

Donde,

$L_{td}$ : Longitud de la cámara desarenadora, m

$H_{dmh}$ : Altura para el caudal máximo horario, m

$v$ : Velocidad en el canal de desarenado, m/s

$v_{ds}$ : Velocidad de sedimentación (partículas de 0,21 mm) en el canal de cribado, m/s

$$L_{td} = 0,08 \text{ m} * \frac{0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1,15 \frac{\text{m}}{\text{min}}} * 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} = 1,25 \text{ m}$$

- Longitud mínima adicional

$$L_{ma} = 2 * H_{de}$$

Donde,

$L_{ma}$ : Longitud mínima adicional, m

$H_{de}$ : Altura para caudal de emergencia, m

$$L_{ma} = 2 * 0,12 \text{ m} = 0,23 \text{ m}$$

- Longitud máxima adicional

La longitud máxima adicional es equivalente al 50% de la longitud del desarenador (Romero, 2016).

$$L_{Ma} = 0,5 * L_{td}$$

Donde,

$L_{Ma}$ : Longitud máxima adicional, m

$L_{td}$ : Longitud del desarenador, m

$$L_{Ma} = 0,5 * 1,25 \text{ m} = 0,62 \text{ m}$$

Se designa la longitud adicional 0,55 m por tanto la longitud total será de 1,8 m en cada uno de los módulos de desarenado.

- Tiempo de retención hidráulico

$$TRH_d = \frac{L_{dt}}{v}$$

Donde,

$TRH_d$ : Tiempo de retención hidráulico para el desarenador, min

$L_{dt}$ : Longitud total del canal de desarenado, m

$v$ : Velocidad en el canal de desarenado, m/s

$$THR_d = \frac{1,8 \text{ m}}{0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} = 0,167 \text{ min}$$

Se designa que el desarenador tendrá una zona de lodos que se extenderá a lo largo del todo el desarenador, y tendrá una profundidad de 5 centímetros. Por tanto, la zona de lodos tendrá un volumen de:

$$V_{Ldes} = L_{des} * P_{Ldes} * B_{mdes}$$

Donde,

$V_{Ldes}$ : Volumen de lodos del desarenador, m<sup>3</sup>

$L_{des}$ : Longitud del desarenador, m

$B_{mdes}$ : Amplitud de la zona inferior del desarenador

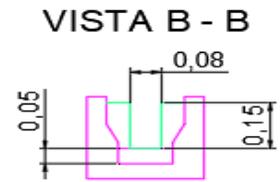
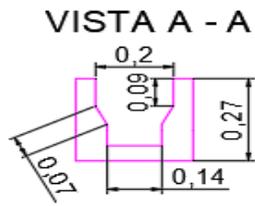
$$V_{Ldes} = 1,8 \text{ m} * 0,05 \text{ m} * 0,14 \text{ m} = 0,01 \text{ m}^3$$

En la Figura 14 se encuentra el diagrama del desarenador y en la Tabla 12 se encuentra los parámetros más importantes del desarenador.

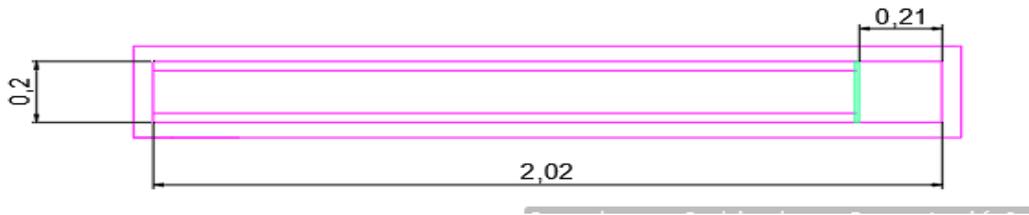
Figura 14. Diagrama del canal de desarenado



A



**VISTA EN PLANTA**



Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Resumen parámetros desarenador

Parámetro	Unidad	Valor
Longitud	m	1,8
Ancho	m	0,2
Tiempo de retención hidráulico	Min	0,16
Velocidad de paso	m/s	0,3

Fuente: Elaboración propia

## ***Trampa de grasas***

Una trampa de grasas consiste en un tanque donde se retienen grasas y aceites por medio de diferencia de pesos específicos, en la superficie estará ocupada por el fluido con menor densidad, en esta estructura se dan las condiciones laminares para que ocurra una separación de los fluidos. La normativa indica en el artículo 172 de la Resolución 0330 de 2017 que las trampas de grasa deben tener un periodo de retención mínimo de 2.5 minutos, relaciones largo ancho ente 1:1 y 3:1 y una altura útil mayor a 0.35 m.

### *Parámetros de diseño*

Numero de módulos: 1

Caudal por modulo: 0.006 m<sup>3</sup>/s

Tiempo de retención en la trampa de grasas: 150 s (Decreto 0330 articulo 172)

Profundidad: 0.50 m

Borde libre: 0.30 m

Relación Largo/Ancho: 3/1

### *Memoria de cálculo*

- **Volumen útil de la trampa de grasas**

$$V_g = Q_{Mh} * t_g$$

Donde,

$Q_{Mh}$ : Caudal maximo horario, m<sup>3</sup>/s

$V_g$ : Volumen del tanque de grasas y aceites, m<sup>3</sup>

$t_g$ : Tiempo de retención en la trampa de grasas, s

$$V_g = 0.006 \frac{m^3}{s} * 150s = 0,9 m^3$$

- **Área superficial**

$$A_{sg} = \frac{V_g}{H_g}$$

Donde,

$V_g$ : Volumen del tanque de grasas y aceites,  $m^3$

$A_{sg}$ : Area superficial del tanque de grasas,  $m^2$

$H_g$ : Altura del tanque de grasas, m

$$A_{sg} = \frac{0,9 m^3}{0,5 m} = 1,8 m^2$$

- **Dimensiones**

- **Ancho**

$$B = \sqrt{\frac{A_s}{3}} = \sqrt{\frac{1,8 m^2}{3}} = 0,77 m$$

- **Largo**

$$L_g = 0,77 m * 3 = 2,3 m$$

- **Volumen real**

$$H_{rg} = 0,5 m + 0,3 m = 0,8 m$$

$$V_{rg} = 2,3 m * 0,77 m * 0,8 m = 1,42 m^3$$

Donde,

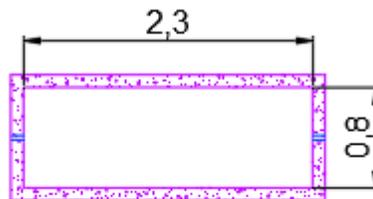
$V_{rg}$ : Volumen del tanque de grasas y aceites,  $m^3$

$H_{rg}$ : Altura real del tanque de grasas y aceites, m

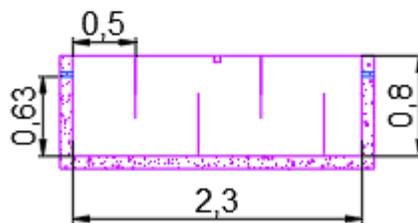
En la Tabla 11 se encuentra el resumen de los parámetros de diseño de la trampa de grasas, mientras que en la Figura 15 se expone la configuración de la trampa de grasas.

Figura 15. Diagrama trampa de grasas.

## VISTA EN PLANTA



## VISTA EN PERFIL



Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Resumen Tabla desarenador

Parámetro	Valor	Unidad
Volumen útil	0,9	m <sup>3</sup>
Tiempo de retención	2,5	min
Profundidad	0,8	m
Área superficial	1,8	m <sup>2</sup>
Largo	2,3	m
Ancho	0,8	m

Fuente: Elaboración propia

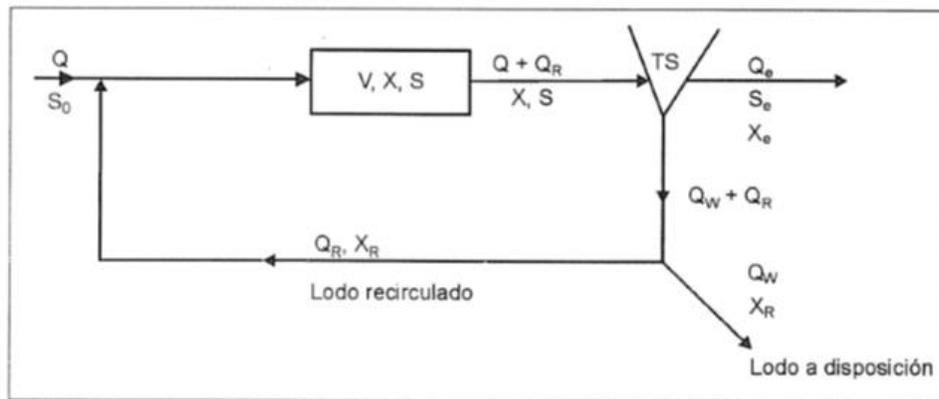
## Diseño del sistema de tratamiento secundario

En esta fase se realizará la remoción de carga orgánica con ayuda de procesos biológicos, dichos métodos son efectuados por microorganismos, los cuales metabolizan la materia orgánica biodegradable. Para que el proceso sea eficiente a estos organismos se les garantizan las mejores condiciones para maximizar su tasa de reproducción y consumo de materia orgánica.

### Lodos activados

El reactor de lodos activados se encargará de la remoción de la mayor parte de la materia orgánica presente por medio de procesos biológicos. El dimensionamiento se basa de la metodología de diseño dada por Metcalf & Eddy, (2014) y la metodología propuesta por Romero, (2016) además de los resultados obtenidos en el laboratorio.

Figura 16. Esquema típico reactor de lodos activados.



Fuente: (J.A, 2016)

Teniendo en cuenta la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.6**, un balance de masa para los microorganismos será:

$$AFLUENTE - EFLUENTE + GENERACION = ACUMULACION$$

Según (J.A, 2016) esta balance de masas matemáticamente sería:

$$V \frac{dX}{dt} = Q X_o - QX + V r'_g$$

Donde:

$\frac{dX}{dt}$  = Tasa de crecimiento de microorganismos, ms SSV/Ld

$V$ = volumen del reactor,  $m^3$

$X_0$ = biomasa en el afluente,  $ms\ SSV/L$

$X$ = biomasa en el efluente,  $ms\ SSV/L$

$r'_g$ = tasa neta de crecimiento de microorganismos,  $mg\ SSV/L.d$

Con la ayuda de la ecuación anterior se realizará el diseño y dimensionamiento del reactor de lodos activados teniendo en cuenta que será de flujo continuo y mezcla completa.

El reactor de lodos activados que se va a diseñar es por el proceso de aireación extendida, este proceso se caracteriza por tener una edad de lodos mayor, según Romero (2016), las principales características de este proceso es una relación alimento microorganismo baja, una concentración de SSVLM<sup>8</sup> alta y un tiempo de aireación largo, este reactor es usado para pequeñas comunidades ya que al tener una edad de lodos entre 20 y 40 días se proporcionara un lodo con una mayor grado de estabilidad, ya que el lodo se metabolizará completamente de forma aerobia, esto por que generar procesos de lisis en la fase endógena. Al debido a esto se puede disponer el lodo de exceso en lechos de secado sin necesidad de un tratamiento adicional.

#### *Parámetros de diseño*

- DBO<sub>5</sub>: 289.5 mg/L
- DQO: 449 mg/L
- Sólidos Suspendidos Totales: 164 mg/L
- Sólidos Totales: 680 mg/L
- Sólidos Fijos Totales: 324 mg/L
- Sólidos volátiles Totales: 356 mg/L
- Temperatura: 18.6°C
- Concentración de biomasa en el reactor recomendada: 2500 mg SSV/L (Metcalf & Eddy, 2014)
- Concentración de lodo sedimentado: 10000 mg ST/L (Romero, 2016)
- $Y$ : 0,65 mg SSV/mg DBO (Metcalf & Eddy, 2014) (Romero, 2016)
- $k_d$ : 0,048  $d^{-1}$  (Romero, 2016)
- Para lodos activados aireación extendida -  $\theta_c$ : 35 d (Metcalf & Eddy, 2014) (Romero, 2016)
- Factores de aireación,  $F$ : =0,9;  $\alpha$ =0,5 ;  $\beta$ =0,95 (Metcalf & Eddy, 2014)
- Oxígeno mínimo en el tanque de aireación,  $C_L$ : 2 mg/L (Metcalf & Eddy, 2014)

---

<sup>8</sup> SSVLM, hace referencia a sólidos suspendidos en el licor mixto.

- Altura del tanque: 2 m

*Memoria de cálculo*

- **Volumen del tanque**

Se calculan las dimensiones del tanque basado en la metodología de Romero, (2016), para el diseño de un reactor de lodos activados, con los parámetros de aireación extendida.

- DBO en el efluente

Según el Decreto 0631 de 2015 establece que la máxima concentración de DBO<sub>5</sub> y SST que se puede verter por cuenta del condominio es de 90 mg/L. Por lo tanto, se selecciona que la salida tendrá una concentración de 30 mg/L de SST y 30 mg/L DBO por lo cual se espera una eficiencia del 89,6% en remoción de DBO

$$S_e = DBO_e - (0,63 * SS_e)$$

Donde,

$S_e$ : DBO soluble en el efluente

$DBO_e$ : DBO Total deseada en el efluente, mg DBO/L

$SS_e$ : SST en el efluente, mgSS/L

$$S_e = 30 - (0,63 * 30) = 11,1 \frac{mg}{L}$$

- Coeficiente de respiración endógena

$$k_d = k_{d20^\circ} * \emptyset^{T-20}$$

Donde,

$k_d$ : Coeficiente de respiración endógena, d<sup>-1</sup>

$k_{d20}$ : Coeficiente de respiración endógena a 20 °C, d<sup>-1</sup>

$\emptyset$ : Coeficiente de corrección para temperatura (1,07)

$$K_d: 0,048 \frac{g SSV}{g DBO * d} * 1.07^{18.6-20} = 0.0436 \frac{g SSV}{g DBO * d}$$

- Biomasa en el reactor

$$XV = \frac{\theta_c Y Q_{Mm} (S_o - S_e)}{1 + k_d * \theta_c}$$

Donde,

$Q_{Mm}$ : Caudal máximo mensual, m<sup>3</sup>/d (Resolución 0330 de 2017)

XV: Biomasa en el reactor gSSV

$\theta_c$ : Edad de lodos, d

Y: Masa microbial producida/ masa de sustrato removido, coeficiente de producción de crecimiento, (0,65  $\frac{\text{mgSSV}}{\text{mg DBO}}$  para heterótrofos)

$k_d$ : Coeficiente de respiración endógena, d<sup>-1</sup>

$S_o$ : Concentración inicial de DBO, mg/L

$S_e$ : Concentración de salida de DBO soluble, mg/L

$$XV = \frac{35d * 0,65 \frac{\text{gSSV}}{\text{g DBO}} * 216 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} * \left( 289,5 \frac{\text{g DBO}}{\text{m}^3} - 11,1 \frac{\text{g DBO}}{\text{m}^3} \right)}{1 + 0,0436d^{-1} * 35d}$$

$$= 5,41 \times 10^5 \text{gSSV}$$

- Volumen reactor

$$V_{L.a} = \frac{XV}{X}$$

Donde,

$V_{L.a}$ : Volumen del reactor de lodos activados, m<sup>3</sup>

X: Concentración de biomasa en el reactor, g/m<sup>3</sup>

XV: Biomasa en el reactor gSSV

$$V_{L.a} = \frac{5,41 \times 10^5 \text{gSSV}}{2500 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}} = 216,5 \text{ m}^3$$

- Producción de lodos

Para la producción de lodos se desea tener en cuenta los restos celulares producidos por muerte celular, ya que pueden producir una masa representativa en la producción de lodos, llevando así a tener cálculos más aproximados a la realidad, por tanto, se toma la siguiente ecuación dada por Metcalf & Eddy (2014).

$$P_x = \frac{Q_{Mm} * Y(S_o - S_e)}{1 + (k_d * \theta_c)} + \frac{f_b * k_d * Q_{Mm} * Y * (S_o - S_e) * \theta_c}{1 + (k_d * \theta_c)}$$

Donde,

$Q_{Mm}$ : Caudal máximo mensual, m<sup>3</sup>/d

$S_o$ : Concentración inicial de DBO, gDBO/m<sup>3</sup>

$S_e$ : Concentración de salida de DBO soluble, gDBO/m<sup>3</sup>

$Y$ : Masa microbiana producida/ masa de sustrato removido, coeficiente de producción de crecimiento (0,65  $\frac{\text{mgSSV}}{\text{mg DBO}}$  para heterótrofos)

$\theta_c$ : Edad de lodos, d<sup>-1</sup>

$k_d$ : Coeficiente de respiración endógena, d<sup>-1</sup>

$f_b$ : Fracción de biomasa remanente (0,15 gSSV/gSSV (Metcalf & Eddy, 2014))

$$\begin{aligned} P_x &= \frac{216 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} * 0,65 \frac{\text{mgSSV}}{\text{mg DBO}} * \left(289,5 \frac{\text{g DBO}}{\text{m}^3} - 11,1 \frac{\text{g DBO}}{\text{m}^3}\right)}{1 + (0,0436 \text{ d}^{-1} * 35 \text{ d})} \\ &+ \frac{0,15 * 0,0436 \text{ d}^{-1} * 216 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} * 0,65 \frac{\text{mgSSV}}{\text{mg DBO}} * \left(289,5 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} - 11,1 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}\right) * 35}{1 + (0,0436 \text{ d}^{-1} * 35 \text{ d})} \\ &= 19004,72 \frac{\text{gSSV}}{\text{d}} \end{aligned}$$

○ Lodo seco

$$L. \text{ seco} = \frac{P_x}{xv}$$

Donde,

$P_x$ : Producción de lodos, g/d

$xv$ : Porción volátil (80%) (Romero, 2016)

$L. \text{ seco}$ : Lodo seco, Kg/d

$$L.seco = \frac{19004,72 \frac{g}{d} SSV}{0,8 * 1000 \frac{g}{kg}} = 23,76 \frac{kg}{d}$$

- Caudal de lodos de desecho

$$Q_w = \frac{L.seco}{X_R}$$

Donde,

$Q_w$ : Caudal de lodo desecho,  $\frac{m^3}{d}$

$X_R$ : Concentración de recirculación,  $\frac{g}{m^3}$

$L.seco$ : Lodo seco, Kg/d

$$Q_w = \frac{23,76 \frac{kg}{d} * 1000}{10000 \frac{g}{m^3}} = 2,3 \frac{m^3}{d}$$

La cantidad de lodos en el reactor se controlará con el Índice Volumétrico de Lodos, Romero, (2016) recomienda que se mantenga en un valor inferior a  $150 \frac{mL}{g}$ , cuando este se supere se dejará fluir el lodo en el reactor hacia unos lechos de secado donde se realizará el tratamiento y secado de este.

- Caudal de recirculación

$$Q_R = \frac{Q_{Mm} * X}{xv * X_R - X}$$

Donde,

$Q_R$ : Caudal de recirculación,  $m^3/d$

$xv$ : Porción volátil (80%) (Romero, 2016)

$X_R$ : Concentración de recirculación,  $\frac{g}{m^3}$

$X_R$ : Concentración de recirculación,  $\frac{g}{m^3}$  de SSV

$X$ : Concentración de biomasa en el reactor,  $g/m^3$  de SSV

$Q$ : Caudal máximo mensual,  $m^3/d$

$$Q_R = \frac{0.0025 \frac{m^3}{s} * 2500 \frac{g}{m^3}}{\left(0,8 * 10000 \frac{g}{m^3}\right) - 2500 \frac{g}{m^3}} = 0,0011 \frac{m^3}{s} = 98,18 \frac{m^3}{d}$$

- Relación de recirculación

$$R = \frac{Q_R}{Q}$$

Donde,

R: recirculación, %

$Q_R$ : Caudal de recirculación, m<sup>3</sup>/d

Q: Caudal de entrada, m<sup>3</sup>/d

$$R = \frac{98,18 \frac{m^3}{d}}{216 \frac{m^3}{d}} = 50\%$$

- Tiempo de retención hidráulico

$$\theta = \frac{V}{Q_{Mm}}$$

Donde,

V: Volumen del reactor, m<sup>3</sup>

$Q_{Mm}$ : Caudal máximo mensual, m<sup>3</sup>/d

$\theta$ : Tiempo de retención hidráulico, h

$$\theta = \frac{216,45 m^3}{216 \frac{m^3}{d}} = 1 d = 24 h$$

- Carga orgánica volumétrica

$$COV = Q_{Mm} * \frac{S_o}{V}$$

Donde,

COV: Carga orgánica volumétrica, g DBO/m<sup>3</sup>d

V: Volumen del reactor, m<sup>3</sup>

$Q_{Mm}$ : Caudal máximo mensual,  $m^3/d$

$S_o$ : Concentración orgánica de entrada,  $gDBO/m^3$ .

$$COV = 216 \frac{m^3}{d} * \frac{289,5 \frac{g DBO}{m^3}}{216,45 m^3} = 288,89 \frac{g DBO}{m^3 d}$$

- Relación alimento microorganismo

$$\frac{A}{M} = \frac{Q_{Mm} * S_o}{V * X}$$

Donde,

$\frac{A}{M}$ : Relación alimento microorganismo,  $d^{-1}$

$V$ : Volumen del reactor,  $m^3$

$Q_{Mm}$ : Caudal máximo mensual,  $m^3/d$

$S_o$ : Concentración orgánica de entrada,  $gDBO/m^3$ .

$X$ : Concentración de biomasa en el reactor,  $g/m^3$

$$\frac{A}{M} = \frac{216 \frac{m^3}{d} * 289,5 \frac{g DBO}{m^3}}{216,45 m^3 * 2500 \frac{g}{m^3}} = 0,11 \frac{g DBO}{g SSV \cdot d}$$

Según Romero (2016) y el artículo 193 de la Resolución 0330 de 2017, un reactor de aireación extendida debe tener un a edad de lodos entre 20 y 30 días, una carga orgánica entre 100 y 300  $gDBO/m^3 \cdot d$ , una relación alimento microorganismo entre 0,04 y 0,1  $gDBO/dSSV \cdot d$  y una tasa de recirculación entre el 50 y 150%, por lo cual se encuentra que el reactor anteriormente calculado cumple con los requerimientos necesarios para un buen funcionamiento.

- Dimensiones del tanque

- Área

$$A_{la} = \frac{V}{h}$$

$A_{la}$ : Área superficial del tanque,  $m^2$

$h$ : Profundidad del tanque,  $m$

$V$ : Volumen del tanque,  $m^3$

$$A_{la} = \frac{216,45 m^3}{2 m} = 108,23 m^2$$

- Ancho

El tanque tendrá una relación ancho : largo de 1:2 con lo cual tenemos:

$$B_{la} = \sqrt{\frac{A}{2}}$$

$B_{la}$ : Ancho del tanque de lodos activados

$$B_{la} = \sqrt{\frac{108,23 m^2}{2}} = 7,36 m$$

- Largo

$$L_{la} = 2 * B$$

$L_{la}$ : largo del tanque de lodos activados

$$L_{la} = 7,36 m * 2 = 14,7 m$$

### Cálculo de la aireación

El cálculo de la aireación se realizará con la metodología de Metcalf & Eddy, (2014)

- Concentración de saturación
  - Concentración de saturación a 20°C para aireación difusa.

Según Metcalf & Eddy, (2014) El valor de saturación de oxígeno disuelto, en agua, a 20 °C y una presión de 760 mmHg es de 9.09 mg/L, para determinar el valor de  $C_{20}$  alterado por la presión atmosférica de la zona y la profundidad a la que se encuentran los difusores, se utiliza la ecuación:

$$C_{20}^* = C_{20} * \left( 1 + d_e * \frac{D_f}{P_a} \right)$$

Donde,

$C_{20}^*$ : Concentración de saturación a 20°C en el sector y a la profundidad de los difusores

$C_{20}$ : Concentración de saturación a 20°C al nivel del mar

$d_e$ : Factor de corrección a la distancia media del tanque, (típico 0,4 (Metcalf & Eddy, 2014))

$D_f$ : Profundidad de los difusores, m

$P_a$ : Presión atmosférica, mm Hg (tomada del capítulo 3,7)

Para este tanque de aireación se dejarán los difusores a una profundidad de 0,3 m sobre el fondo del tanque, teniendo en cuenta que los tanques tienen una profundidad de 2 m la profundidad en los difusores será:

$$D_f = 2,0 \text{ m} - 0,3 \text{ m} = 1,7 \text{ m}$$

Metcalf & Eddy, (2014) recomienda que el factor de corrección de la profundidad media sea 0,4. Por lo tanto, la concentración de saturación a 20 °C para aireación difusa en el sector del Condominio Campestre La Primavera, el cual tiene una presión de 622,77 mmHg (ver Capítulo 3,7), es:

$$C_{20}^* = 9,09 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * (1 + 0,4 * \left( \frac{1,7 \text{ m}}{622,77 \text{ mmHg} * 0,013595 \frac{\text{m}}{\text{mmHg}}} \right)) = 9,82 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

La aproximación utilizada por Metcalf & Eddy, (2014) trata de contemplar el incremento de presión generado por el peso de la columna de agua sobre los difusores del sistema de aireación.

- Concentración de saturación de oxígeno en el agua en el Condominio Campestre La Primavera

La concentración de oxígeno de saturación se determina siguiendo las recomendaciones de Romero (2016) encontrando un valor saturación de 9,43 mg/L a 18,6 °C, y 760 mm Hg. Para realizar la corrección por presión se utiliza la siguiente fórmula:

$$C_s = OD * \frac{P - p}{760 - p}$$

Donde,

$C_s$ : Concentración de saturación a la temperatura y presión del Condominio

OD: Concentración de saturación a 18.6 °C y 0 -cloruros

P: Presión barométrica, mm Hg (Tomada del capítulo 3,7)

p: Presión de vapor a la temperatura del agua, Se tiene en cuenta que a 18.6 °C es 2,16 kN/m<sup>2</sup> (Romero, 2016)

$$C_s = 9,43 \frac{mg}{L} * \left( \frac{622,77 mmHg - \left( 2,16 \frac{kN}{m^2} * 7,5 \frac{mmHg}{kN/m^2} \right)}{760 - \left( 2,16 \frac{kN}{m^2} * 7,5 \frac{mmHg}{kN/m^2} \right)} \right) = 7,69 \frac{mg}{L}$$

- Oxígeno requerido.

$$OTR_f = 1,5 * Q * (S_o - S_e) - 1,42 * X_R * Q_w$$

Donde,

$OTR_f$ : Oxígeno requerido, mg/L

$Q_w$ : Caudal de lodo desecho,  $\frac{m^3}{d}$

$S_o$ : Concentración inicial de DBO, mg/L

$S_e$ : Concentración de salida de DBO, mg/L

$X_R$ : Concentración de lodo de recirculación, g/m<sup>3</sup>

$$\begin{aligned} OTR_f &= 1,5 * 216 \frac{m^3}{d} * \left( 289,5 \frac{g}{m^3} - 11,1 \frac{g}{m^3} \right) - 1,42 * \left( 10000 \frac{g}{m^3} * 0,8 \right) * 2,4 \frac{m^3}{d} \\ &= 62,93 \frac{kg}{d} = 2,6 \frac{kg}{h} \end{aligned}$$

- Eficiencia estándar de oxígeno del difusor

$$SORT = \frac{OTR_f}{\alpha * F} * \left[ \frac{C_{20}^*}{\beta * \left( \frac{C_s}{C_{20}^*} \right) * \left( \frac{P_b}{P_s} \right) * (C_{20}^* - C)} \right] * (1,024^{20-T})$$

Donde,

SORT: Tasa estándar de transferencia de oxígeno del difusor, kg/s

C: Concentración de saturación de oxígeno en condiciones de campo, mg/L

$C_s$ : Concentración de saturación a la temperatura y presión del Condominio, mg/L

$C_{20}^*$ : Concentración de saturación a 20°C en el sector y a la profundidad de los difusores, mg/L

$\alpha, \beta, F$ : Factores típicos difusor (Metcalf & Eddy, 2014)

$P_b$ : Presión en el condominio, mmHg

$P_s$ : Presión al nivel del mal, m

$$SORT = \frac{2,6 \frac{kg}{h}}{0,5 * 0,9} * \left[ \frac{9,82 \frac{mg}{L}}{0,95 * \frac{7,69 \frac{mg}{L}}{9,82 \frac{mg}{L}} * \frac{622,7 \text{ mmHg} * (\frac{10,33 \text{ m}}{760 \text{ mmHg}})}{10,33 \text{ m}} * 9,82 \frac{mg}{L} - 2 \frac{mg}{L}} \right] * (1,024^{20-18,6})$$

$$SORT = 14,72 \frac{kg}{h} = 0,004 \text{ kg/s}$$

- Eficiencia del aireador

$$e = D_f * \frac{SOTE}{100}$$

Donde,

SOTE: Eficiencia estándar de oxígeno del difusor, (25 %-30 % (NOPOL, 2020))

$e$ : Eficiencia de aireación

$D_f$ : Profundidad de los difusores, m

$$e = (2 - 0,3)m * \frac{25\%}{100} = 0,425 = 42,5\%$$

- Densidad del aire

$$P_a = \frac{1,293}{1 + 0,00367 * T_i} * \left( \frac{H}{76} \right)$$

Donde,

$P_a$ : Densidad del aire en el Condominio Campestre La Primavera

H: altura de presión Condominio Campestre La Primavera, cm Hg

$T_i$ : Temperatura en el condominio, °C

$$P_a = \frac{1,293}{1 + 0,00367 * 18,6 \text{ } ^\circ\text{C}} * \left( \frac{62,27 \text{ cm Hg}}{76} \right) = 0,99 \text{ kg/m}^3$$

$$A_f = \frac{SORT}{e * P_a * \%O_2 \text{ air}}$$

Donde,

$A_f$ : Flujo de aire requerido,  $\frac{m^3}{min}$

SORT: Tasa estándar de transferencia de oxígeno del difusor, kg/s

$e$ : Eficiencia del aireador

$P_a$ : Densidad del aire en el Condominio Campestre La Primavera

$\%O_2 \text{ air}$ : concentración del oxígeno en la atmosfera, 21%

$$A_f = \frac{14,72 \text{ kg/h}}{0,425 * 0,99 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,21} = 166,59 \frac{\text{m}^3}{h} = 2,77 \frac{\text{m}^3}{min}$$

### Cálculo de la potencia del soplador

- Carga estática

$$P_H = H * 9,804$$

Donde,

$P_H$ : Carga estática, kpa

H: altura del tanque de aireación

$$P_H = 2 \text{ m} * 9,804 = 19,608 \text{ kpa}$$

- Pérdidas en el difusor ( $P_{d,dif}$ )

Teniendo en cuenta los datos NOPOL (2002) la pérdida de carga en el difusor KKI 215 es de 4.5 kPa.

- Pérdidas en filtros y válvulas ( $P_{a.s}$ )

Qasim, (1999) recomienda un valor de 1,78 kPa

- Pérdidas en tuberías ( $P_b$ )

Romero (2016) dice que el diámetro recomendado para un caudal de 69,7 m<sup>3</sup>/min o menor es de 300 mm, por lo tanto, se utilizara tubería de acero inoxidable marca Imporinox de diámetro 12", con un diámetro exterior de 323,9 mm, un grosor de 9,53 mm y un diámetro interno de 304,8 mm, el más cercano posible a la recomendación teórica. La tubería tendrá una velocidad de flujo de:

$$v = \frac{A_f}{A}$$

Donde,

$v$ : Velocidad de flujo, m/s

$A$ : Área de Tubería, m

$A_f$ : Flujo de aire requerido,  $\frac{m^3}{min}$

$$v = 2,77 \frac{m^3}{min} * \frac{\frac{1 min}{60 s}}{\frac{(0.3048 m)^2}{4} * \pi} = 1,98 \frac{m}{s}$$

- Cabeza de velocidad

$$h_i = \left( \frac{v}{1,096} \right)^2 P_a$$

$h_i$ : Cabeza de velocidad, m

$P_a$ : Densidad del aire en el Condominio Campestre La Primavera

$v$ : Velocidad de flujo, m/s

$$h_i = \left( \frac{1,98 \frac{m}{s}}{1,096} \right)^2 * 0,99 \frac{kg}{m^3} = 3,23 m$$

- Longitud equivalente de accesorios

## Conteo de accesorios

A continuación, en la tabla 14, se muestra la cantidad de accesorios requerida para el sistema de aireación, la totalidad de accesorios se tienen en diámetro de 12”.

Tabla 14. Accesorios Sistema aireación

NOMBRE DE ACCESORIO	CANTIDAD	LONGITUD EQUIVALENTE <sup>9</sup>
Codo radio largo 90°C	2	2,12m
Tee Salida lateral	19*	6,61m
Válvula de compuerta	1	0,71m

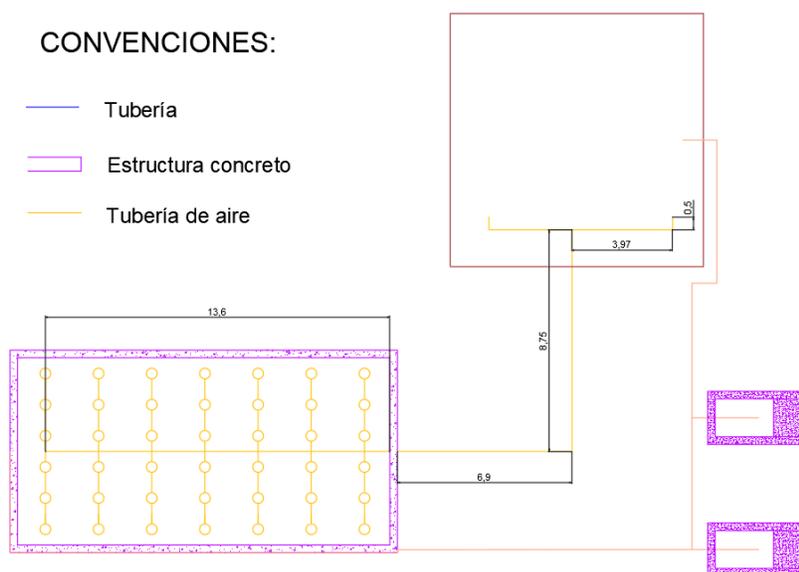
\*ver cálculo del número de columnas de difusores

Fuente: Elaboración propia con datos de Pérez (2019).

- Pérdida de carga

El sistema de aireación se encuentra en la Figura 17

Figura 17. Distribución de los difusores



Fuente: Elaboración propia

<sup>9</sup> Las longitudes equivalentes se tomaron del libro de instalaciones hidrosanitarias de gas y de aprovechamiento de aguas lluvias de Rafael Pérez Carmona

Este sistema presenta una tubería en acero (encontrada en la Figura 17 de color amarillo) con una longitud desde el cuarto de máquinas hasta el tanque de aireación de 33,72 m, mientras que la longitud por accesorios es de 130,54 m, por tanto, la longitud total es de 164,26 m.

Las pérdidas de carga se calculan de la siguiente manera:

$$P_b = f * \frac{L}{D} * h_i$$

Donde,

$P_b$ : Pérdidas de carga, kPa

$h_i$ : Cabeza de velocidad, m

$f$ : Factor de fricción para tubería en acero inoxidable, 0,046 (Saldarriaga, 1998)

$L$ : Longitud total equivalente

$D$ : Diámetro de tubería

$$P_b = 0,046 * \frac{164,26 \text{ m}}{0,3048 \text{ m}} * 0,19 \text{ m} = 4,7 \text{ mca} = 46.15 \text{ kPa}$$

- Presión de descarga

$$P_d = P_H + P_b + P_{a,dif} + P_{a,s} + P_p$$

$P_H$ : Carga estática, kPa

$P_b$ : Pérdidas en tuberías, kPa

$P_{a,dif}$ : Pérdidas en el difusor, kPa

$P_{a,s}$ : Pérdidas en filtros y válvulas, kPa

$P_p$ : Presión en el condominio

$$P_d = 19,608 \text{ kPa} + 46.15 \text{ kPa} + 4,5 \text{ kPa} + 1,78 \text{ kPa} + 622,7 \text{ mmHg} * \frac{(0,1332 \text{ kPa})}{1 \text{ mmHg}}$$

$$= 154,98 \text{ kPa} = 1,51 \text{ atm}$$

- Flujo de masa de aire

$$w = A_f * \delta_{air}$$

Donde,

$w$ : Flujo de masa de aire, kg/s

$A_f$ : Flujo de aire requerido, m<sup>3</sup>/h

$\delta_{air}$ : Densidad del aire, 0,99 kg/m<sup>3</sup>

$$w = 166,59 \frac{m^3}{h} * \frac{1 h}{3600 s} * 0,99 \frac{kg}{m^3} = 0,046 \frac{kg}{s}$$

- Potencia del soplador

La potencia se calcula con la siguiente ecuación dada por (Romero, 2016)

$$P_w = \frac{w * R * T_i}{8,41 * e} * \left( \left( \frac{P_d}{P_p} \right)^{0,283} - 1 \right)$$

Donde,

$w$ : Flujo de masa de aire,

$P_d$ : presión de descarga, atm

$T_i$ : Temperatura en el condominio, °C

$P_p$ : Presión en el condominio, atm

$R$ : Constante de los gases ideales, 8,314 kJ/mol°K

$e$ : Eficiencia del aireador (70-80 (Qasim S. R., 1999))

$$P_w = \frac{0,046 \frac{kg}{s} * 8,314 \frac{kJ}{mol \cdot ^\circ K} * (18,6 + 273,15)^\circ K}{8,41 * 0,7} * \left( \left( \frac{1,51 atm}{0,81 atm} \right)^{0,283} - 1 \right) = 3,7 kW$$

- Requisitos de mezcla

El requisito de potencia mínimo para la mezcla completa dentro del reactor está dado por la siguiente ecuación (Romero, 2016):

$$NP_r = 0,004X + 5$$

Donde,

$NP_r$ : Nivel de potencia requerido, W/m<sup>3</sup>

$X$ : Sólidos suspendidos en el licor mixto, mg/L

$$NP = 0,004 * \left( 2500 \frac{mgSSV}{L} \right) + 5 = 15 \frac{W}{m^3}$$

Se determina el nivel de mezcla en el reactor de lodos activados

$$NP = \frac{P_w}{V}$$

Donde,

NP: Nivel de potencia, W/m<sup>3</sup>

P<sub>w</sub>: Potencia del soplador, W

V= Volumen del reactor de lodos activados, m<sup>3</sup>

$$NP = \frac{3800 W}{216,45 m^3} = 17,09 \frac{W}{m^3}$$

Por tanto, el flujo de aire estimado es suficiente para mantener el reactor completamente mezclado. Adicionalmente, la cantidad de energía que se requeriría para tratar 1 m<sup>3</sup> de agua sería alrededor de los 0,42 kWh, siendo un valor similar a valores reportados por Japón entre que oscilan entre 0.30 y 1.89 kWh / m<sup>3</sup>.

$$E_h/Q_{md} = \frac{3,7 kWh}{2,5 \frac{L}{s} * \frac{3600 s}{1000 L} * \frac{m^3}{h}} = 0,41 kWh/m^3$$

Donde:

E<sub>h</sub>: Energía requerida por hora, kWh

Q<sub>md</sub>: Caudal medio horario, m<sup>3</sup>/h

## Difusores

- Número de difusores

Para la aireación difusa se utilizarán difusores tipo NOPOL®, de la referencia KKI 215, los cuales tienen un caudal de flujo de 4 m<sup>3</sup>/h y un diámetro de 7”.

$$N.A = \frac{A_f}{q_{ad}}$$

q<sub>ad</sub>: caudal del difusor,  $\frac{m^3}{h}$

$A_f$ : Flujo de aire requerido,  $\frac{m^3}{min}$

N.A: Numero de aireadores

$$N.A = \frac{166,59 \frac{m^3}{h}}{4 \frac{m^3}{h}} = 41,6 \cong 42$$

○ Área de los difusores

$$A_d = N.A * \left( \frac{r^2}{4} * \pi \right)$$

Donde,

$r$ : Radio del difusor, m

N.A: Numero de aireadores

$$A_d: 42 * \left( \frac{\left( 7 \text{ in} * \left( 0,025 \frac{m}{in} \right) \right)^2}{4} * \pi \right) = 1,01 \text{ m}^2$$

○ Distribución

Se dejarán 6 difusores por fila y 7 por columna, por lo tanto, la separación es:

$$S_{fila} = \frac{B}{N_{fila}}$$

$$S_{columna} = \frac{L}{N_{columna}}$$

S: Separación

B: ancho

L: largo

N: Número de difusores

$$S_{fila} = \frac{7,4 \text{ m}}{6} = 1,23 \text{ m}$$

$$S_{columna} = \frac{14,7 \text{ m}}{7} = 2,1 \text{ m}$$

En la Tabla 15 se encuentra el resumen del diseño de lodos activados, mientras que en la tabla 16 se observa las características de los difusores.

Tabla 15. Resumen parámetros lodos activados

Parámetro	Magnitud	Unidad
Volumen en el reactor	216,45	m <sup>3</sup>
SSVLM	2500	mg/L
DBO <sub>5</sub> _SALIDA	30	mg/L
SST_ SALIDA	30	mg/L
Caudal de recirculación	98,18	m <sup>3</sup> /d
Relación de circulación	50	%
Carga orgánica volumétrica	288,89	gDBO/m <sup>3</sup> ,d
Relación A/M	0,11	d <sup>-1</sup>
Eficiencia	0,896	
Tiempo de retención hidráulico	1	d
Tiempo de retención hidráulico	24	h

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Difusores de aireación.

Difusores		
Marca	Nopol	
Referencia	KKI 215	
Numero de difusores	42	numero
Potencia de aireación	3,8	kW

Fuente: Elaboración propia

## **Sedimentador secundario**

El clarificador secundario es utilizado para recolectar el lodo saliente del reactor biológico para posteriormente recircular una fracción de dicho lodo y purgar el resto, con esto se mantendrá la relación A/M recomendada dentro del reactor y se controla la edad de lodos en el sistema.

### *Parámetros de diseño*

- Carga superficial,  $40 \frac{m^3}{m^2*d}$  (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)
- Módulos 2
- Caudal por modulo (basado en caudal máximo horario): 3 L/s
- Sólidos suspendidos en el lodo de recirculación, 10000 mg/L
- Altura del sedimentador, 5,3 m (Zona de sedimentación 3,5 m, Zona de lodos 0,5 m y borde libre 0,3 m)
- Humedad del lodo: 92 % (Romero, 2016)
- Densidad relativa de lodos: 1,3 (Romero, 2016)

### *Memoria de cálculos*

#### **Sedimentador**

- Área de sedimentación

$$A_{sed} = \frac{Q}{C_{sed}}$$

Donde,

$A_{sed}$ : Área de sedimentación,  $m^2$

Q: Caudal,  $m^3/d$

$C_{sed}$ : Carga hidráulica de superficial,  $\frac{m^3}{m^2*d}$

$$A_{sed} = \frac{259,2 \frac{m^3}{d}}{40 \frac{m^3}{m^2 * d}} = 6,5 m^2$$

- Dimensiones del área de sedimentación
  - Longitud trasversal

Teniendo en cuenta que el sedimentador secundario tendrá una forma rectangular con una relación de 1:3 se calculan las dimensiones.

$$B_{sed} = \sqrt{\frac{A_{sed}}{3}}$$

Donde,

$B_{sed}$ : Amplitud del lado del tanque de sedimentación, m

$A_{sed}$ : Área de sedimentación, m<sup>2</sup>

$$B_{sed} = \sqrt{\frac{6,5 \text{ m}^2}{3}} = 1,5 \text{ m}$$

- Largo del sedimentador

$$L_{sed} = 1,5 \text{ m} * 3 = 4,5 \text{ m}$$

- Volumen sedimentador

$$V_{seds} = B_{sed} * L_{sed} * H_{sed}$$

Donde,

$V_{seds}$ : Volumen de la zona de sedimentación.

$B_{sed}$ : Amplitud del tanque de sedimentación, m

$L_{sed}$ : Longitud del sedimentador, m

$H_{sed}$ : Altura de la zona de sedimentación, m

$$V_{seds} = 1,5 \text{ m} * 4,5 \text{ m} * 3,5 \text{ m} = 23,625 \text{ m}^3$$

- Volumen lodos

La zona de lodos tendrá forma de pirámide rectangular invertida con una profundidad de 0,5 m y la base inferior tendrá dimensiones de 3,4 m x 0,5 m, con un área de 1,6 m<sup>2</sup>, para determinar el volumen de lodos se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_{lods} = \frac{h_{lod}}{3} * \left( A_{sed} + A_{stod} + (A_{sed} * A_{stod})^{\frac{1}{2}} \right)$$

Donde,

$V_{lods}$ : Volumen de lodos en el sedimentador,  $m^3$

$A_{sed}$ : Área de sedimentación,  $m^2$

$A_{slod}$ : Área inferior de la zona de lodos,  $m^2$

$H_{lods}$ : Altura de la zona de lodos,  $m$

$$V_{lods} = \frac{0,5 m}{3} * \left( 6,5 m^2 + 1,6 m^2 + (6,5 m^2 + 1,6 m^2)^{\frac{1}{2}} \right) = 1,82 m^3$$

- Volumen sedimentador

$$V_{sed} = A_{sed} * H_{sed} + V_{lods}$$

Donde,

$V_{sed}$ : Volumen del sedimentador,  $m^3$

$H_{sed}$ : Altura de la zona de sedimentación,  $m$

$A_{sed}$ : Área de sedimentación,  $m^2$

$$V_{sed} = 6,5 m^2 * 3,5 m + 1,82 m^3 = 24,57 m^3$$

- Tiempo de retención hidráulico

$$TRH_{sed} = \frac{V_{seds}}{Q}$$

Donde,

$TRH_{sed}$ : Tiempo de retención hidráulica

$V_{seds}$ : Volumen de la zona de sedimentación.

Q: Caudal  $m^3/h$

$$TRH_{sed} = \frac{22,75 m^3}{10,8 \frac{m^3}{h}} = 2,1 h$$

Según la Resolución 0330 de 2017, artículo 195, el tiempo de retención hidráulico para un sedimentador secundario debe estar entre las 2 y 3h, por lo cual el diseño

es aceptable. Además, se diseña con una velocidad de 40 m/d, lo cual asegura la remoción de la mayor cantidad de partículas de lodo provenientes del reactor.

- Carga sobre vertedero

Se utilizará un vertedero recto de 1,5 m para recolectar el caudal saliente del sedimentador.

$$Cv_{sed} = \frac{Q}{B_{sed}}$$

Donde,

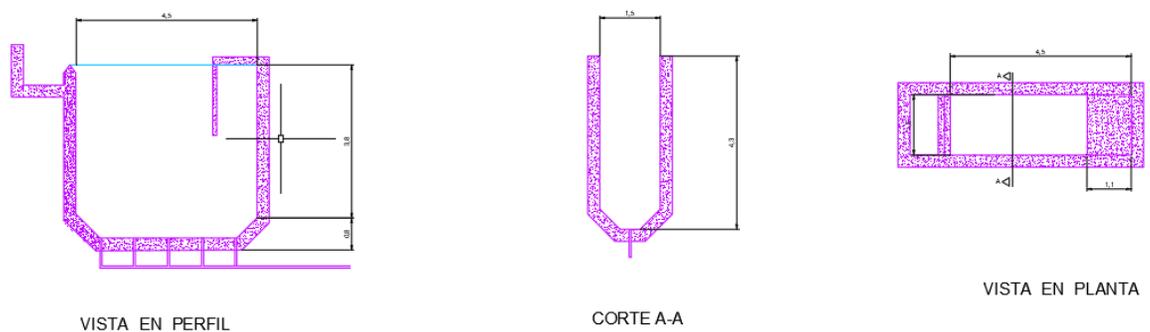
$Cv_{sed}$ : carga sobre vertedero de sedimentación, L/s.m

$B_{sed}$ : Ancho del vertedero del sedimentador, m

$$Cv_{sed} = \frac{3 \frac{L}{s}}{1,5 m} = 2 \frac{L}{s.m}$$

Según (Romero, 2016) y la resolución 0330 de 2017 para un sedimentador secundario la carga sobre el vertedero debe ser inferior de 4.5 L/s.m, con lo cual el vertedero designado cumple satisfactoriamente con el criterio. En la Figura 18 podemos encontrar la distribución de los sedimentador secundarios

Figura 18. Sedimentadores secundarios



Fuente: Elaboración propia

### Bombeo de lodos

- Cálculo de la succión
  - Altura máxima de succión

$$AMS = 2 + A_t + B + C + D + E + F$$

Donde,

AMS: Altura máxima de succión, se adopta una altura mínima de 2 m teniendo en cuenta la diferencia de alturas entre la zona de salida de lodos del sedimentador secundario y la entrada del tanque de lodos activados.

A<sub>t</sub>: Pérdida por temperatura

B: Pérdida por altura sobre el nivel del mar

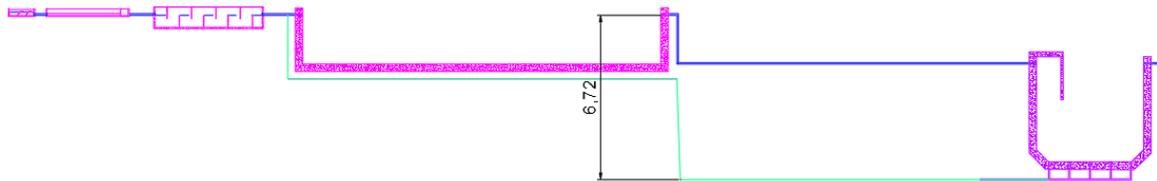
C: Pérdida por depresiones barométricas

D: Por vacío imperfecto

E: Pérdidas por fricción

F: Pérdidas por velocidad

Figura 19. Diferencias de altura entre el sedimentador y el reactor de lodos activados



Fuente: Elaboración propia

Según Perez (2019), las pérdidas para la temperatura del lugar (18,2°C) son de 0,2148 m, además, las pérdidas por la altura son de 1,99 m, pérdidas por depresión 0,36 m y las pérdidas por vacío imperfecto 2,4 m.

- Pérdidas por fricción y accesorios

Tabla 17. Accesorios de la línea de lodos

Accesorio	Cantidad	Pérdida unitaria	Pérdida
Codo	8	0,95m	7,6m
tee	2	2,31m	4,62m
Total			12,2m

Fuente: Elaboración propia

- Velocidad en las tuberías

$$v_{Ld} = \frac{Q_r}{\frac{\pi}{4} * D_l}$$

Donde,

$v_{Ld}$ : Velocidad en la línea de lodos, m/s

$Q_r$ : caudal de recirculación, m<sup>3</sup>/s

$D_l$ : Diámetro de la línea de lodos, 4"

$$v_{Ld} = \frac{0,001 \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi}{4} * (0,1016 m)^2} = 0,14 \frac{m}{s}$$

- Cabeza de velocidad

$$h_{iL} = \left( \frac{v_{Ld}}{1,096} \right)^2 \gamma_a$$

Donde,

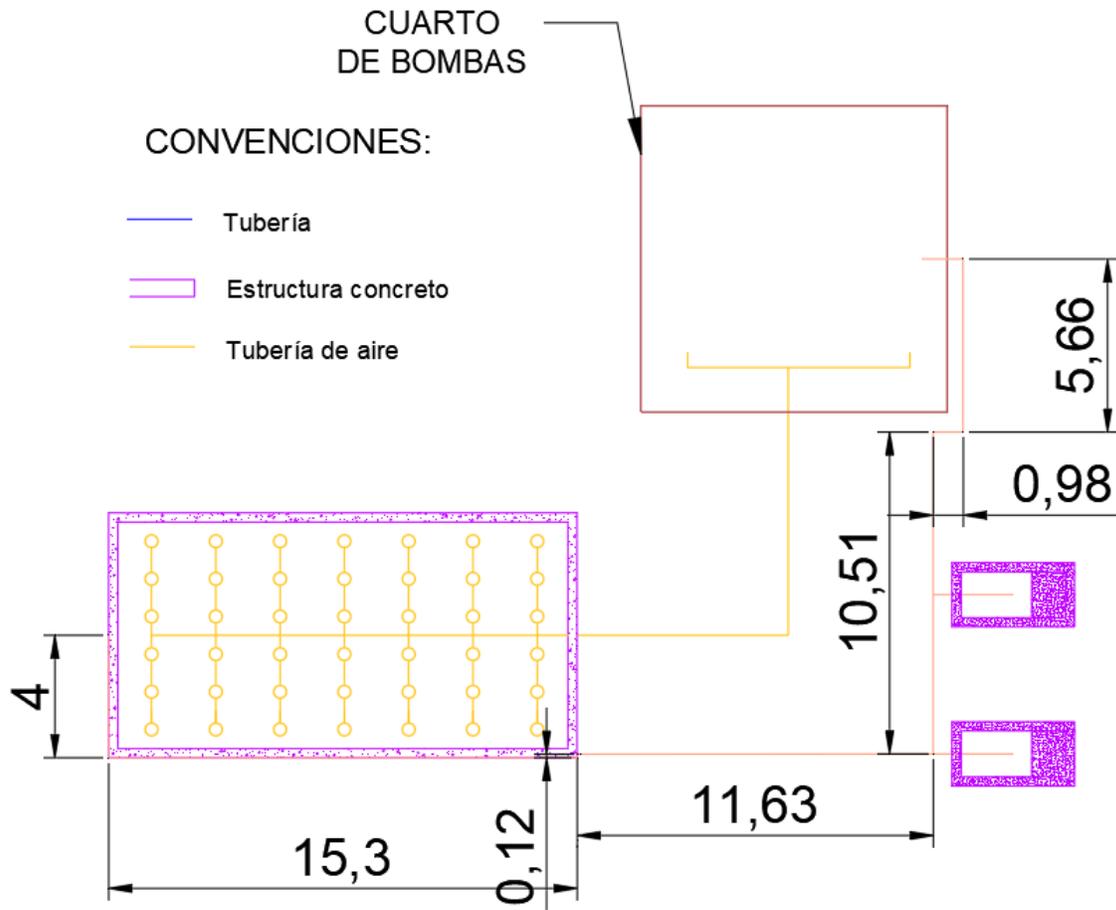
$h_{iL}$ : Cabeza de velocidad, m

$\gamma_a$ : peso específico del fluido, 2,6 kg/L para lodos

$$h_{iL} = \left( \frac{0,14 \frac{m}{s}}{1,096} \right)^2 * 2,6 \frac{kg}{L} = 0,04 m$$

- Pérdidas por fricción

Figura 20. Tubería de lodos.



Fuente: Elaboración propia

$$E_1 = f * \frac{L}{D_l} * h_{iL}$$

Donde,

$E_1$ : Pérdidas por fricción

$f$ : Factor de fricción, 0,0015 para Tubería PVC presión

$h_{iL}$ : Cabeza de velocidad, m

$L$ : longitud equivalente, m

$L_{acc}$ : Longitud equivalente de accesorios, m

$L_{dis}$ : Longitud de tubería, m (de la Figura 20)

$D_l$ : Diámetro de la línea de lodos, 4"

$$L = L_{acc} + L_{dis} = 12,2 \text{ m} + 48,2 \text{ m} = 60,4 \text{ m}$$

$$E_1 = 0,0015 * \frac{60,4 m}{0,1016 m} * 0,04 m = 0,035 m$$

Teniendo en cuenta que los lodos son un fluido no newtoniano, se le aplica un factor de seguridad el cual depende del porcentaje de sólidos presentes en el lodo, para lodos activados se tiene que típicamente el lodo tiene un porcentaje de humedad del 92%, por tanto, tiene un 8% de sólidos. Según Romero (2016), el factor de corrección para las pérdidas de un lodo con este contenido de sólidos es de 7,8 g/g, por tanto, las pérdidas por fricción serán:

$$E = E_1 * F_l$$

Donde,

E: Pérdidas por fricción reales

$E_l$ : Pérdidas por fricción

$F_l$ : Factor de seguridad para bombeo de lodos

$$E = 0,035 m * 7,8 = 0,3 m$$

- Pérdidas por velocidad

$$F = \frac{v_{Ld}^2}{2 * g}$$

Donde,

$v_{Ld}$ : Velocidad en la línea de lodos, m/s

F: Perdidas por velocidad, m

$g$ : Gravedad,(9,81 m/s<sup>2</sup>)

$$F = \frac{\left(0,14 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81} = 0,001 m$$

- Altura máxima de succión

$$AMS = 2 + A + B + C + D + E + F$$

$$AMS = 2 m + 0,2148 m + 1,99 m + 0,36 m + 2,4 m + 0,27 m + 0,001 m = 7,23 m$$

- Potencia de la bomba

$$P = \gamma_{lodo} * H_d * \frac{Q_r}{\eta * 76}$$

Donde.

P= potencia de la boba, hp

$Q_r$ : Caudal de recirculación, l/s

$\eta$ : Eficiencia de la Bomba, % (se toma una eficiencia de 76%) (Pérez, 2019)

$\gamma_{lodo}$ : Peso específico del lodo, asumido como con una densidad de 1,3 kg/L (Romero, 2016)

$H_d$ : Altura dinámica de presión, m

$H_e$ : Altura estática de presión, m (equivalente a la altura del reactor de lodos activados sobre la entrada de lodos ver Figura 19)

$$H_d = AMS + H_e$$

$$P = \gamma_{lodo} * (AMS + H_e) * \frac{Q_r}{\eta * 76}$$

$$P = 1,3 * (7,23 + 6,72)m * \frac{1,1 \frac{L}{s}}{0,76 * 76} = 0,034 \text{ hp} = 372,82 \text{ W}$$

Se aproxima la potencia a 0,5 hp (372,85) W, la cual se encuentra como una potencia comercial, que viabiliza la instalación de la misma. En la Tabla 18 se presenta el resumen de los parámetros básicos con los cuales fue diseñado el sedimentador secundario.

Tabla 18. Tabla resumen sedimentador secundario.

Parámetro	Valor	Unidad
Carga	40	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d
Área de sedimentador	6,5	m <sup>2</sup>
Volumen	23,6	m <sup>3</sup>
Tiempo de retención hidráulica	2,1	h
largo	4,5	m
amplitud	1,5	m
Altura	3,5	m
Altura Lodos	0,5	m
Volumen lodos	1,82	m <sup>3</sup>
Vertedero	1,5	m
Carga sobre el vertedero	2	L/s.m

Fuente: Elaboración propia

## Capítulo 6 Dimensionamiento del sistema de energía solar para alimentar la PTAR del condominio campestre la primavera.

La planta de tratamiento de agua residual tendrá diferentes puntos de consumo, generados no solo por las unidades que hacen uso de sistemas a presión. En la Tabla 19 se exponen los consumos diarios por parte de la planta de agua residual.

Tabla 19. Consumos por parte de la PTAR.

Elementos	Cantidad	Consumo Wh	Tiempo de funcionamiento diario (horas)	Consumo total (Wh)
Bombillas 6W	16	6	12	1152
Nevera	1	80	24	1920
Soplador	1	3800	24	91200
Bomba de lodos	1	373	24	8952
Termo reactor	1	280	2	560
Multiparámetro	1	6	24	144
Espectro fotómetro	1	240	2	480
Potencia W		4785	Total (Wh)	104408
Potencia kW		4,785	Total (kWh)	104,408

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 19, explica la cantidad de dispositivos que se van a utilizar, la potencia de cada uno de ellos utiliza, el tiempo aproximado de uso por cada día y el requerimiento energético de los mismos. Para el funcionamiento óptimo de la planta no solo es necesario la utilización de equipos activos en el tratamiento, también es necesario la utilización de aparatos tales como bombillas para optimizar el trabajo en las horas nocturnas o de poca luz, así como un equipo mínimo de laboratorio con el cual se controle las eficiencias diarias de remoción.

Además de la obtención teórica de consumos derivados del tratamiento es necesario que la red tenga cierta holgura en su funcionamiento, con lo cual se mayorá la energía necesaria para la planta con un factor de seguridad que será adicionarle a los consumos diarios el 20% del mismo así se tiene cierta libertad en los consumos adicionales que pueda tener la planta, por lo tanto, el gasto energético de diseño será:

$$C_{ed} = C_e * (1 + fs)$$

Donde,

$C_{ed}$ : Consumo energético de diseño, kWh

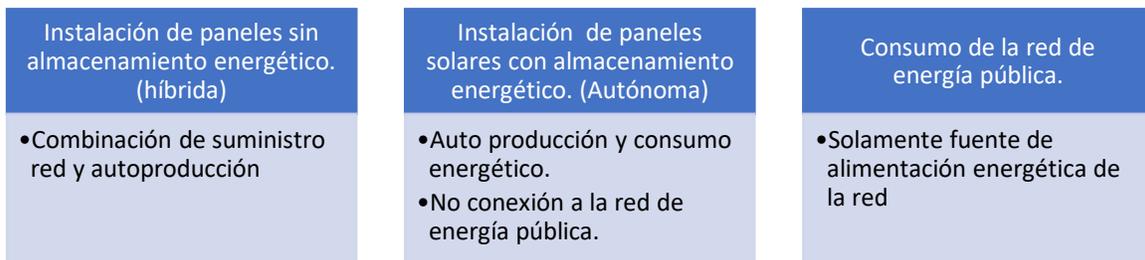
$C_e$ : Consumo energético, kWh

$fs$ : Factor de seguridad

$$C_{ed} = 104,4 \text{ kWh} * (1 + 0,2) = 125,28 \text{ kWh}$$

La captación de esta demanda energética de 125,28 kWh puede ser diseñada de diferentes maneras. Las alternativas difieren en la cantidad de energía que deben recolectar los paneles, los costos derivados de esto y si es necesario mantener la conexión a la red de energía local o no. Por ello se plantean escenarios en la Figura 22:

Figura 21. Escenarios propuestos



Fuente: Elaboración propia

## Instalación fotovoltaica híbrida

Esta instalación eléctrica se caracterizará por tener un suministro combinado, tomará energía de la red en las horas de poca luz para alimentar las bombas, los elementos de iluminación nocturna y equipos dispuestos para desarrollar las actividades de la planta.

Como se puede observar en el capítulo 1.2.1 Brillo solar, el municipio de Monquirá, Boyacá, las horas de brillo solar son de 153.1 h/mes y 126.7 h/mes, con lo cual tenemos un promedio de 139.9 h/mes, por lo tanto, en el Condominio Campestre La Primavera se tendrán 4.66 h/ día.

Las instalaciones fotovoltaicas solo estarán activas 4.66 h/día el tiempo restante la red funcionará con suministro eléctrico, teniendo en cuenta esto en la Tabla 20, se muestra los aportes diarios que realizará por parte de los paneles en el caso que sólo se utilice en el tiempo de brillo solar del municipio.

Tabla 20. Suministro por instalación híbrida.

Elementos	Cantidad	Consumo Wh	Tiempo de funcionamiento diario (horas)	Consumo total (Wh)
Bombillas 6W	16	6	0	0
Nevera	1	80	4,6	368
Soplador	1	3800	4,6	17480
Bomba de lodos	1	373	4,6	1715,8
Termo reactor	1	280	4,6	1288
Multiparámetro	1	6	4,6	27,6
Espectro fotómetro	1	240	4,6	1104
Potencia W		4785	Total (Wh)	21983,4
Potencia kW		4,785	Total (kWh)	21,9834

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 20 muestra la cantidad de energía que será aportada por el sistema fotovoltaico sin almacenamiento de energía, estos 121,98 kWh se le aplicará un factor de seguridad para asegurar el correcto suministro por parte de la red a todos los equipos.

$$C_{ed1} = C_{e1} * (1 + fs)$$

Donde,

$C_{ed1}$ : Consumo energético de diseño sin almacenamiento, kWh

$C_{e1}$ : Consumo energético sin almacenamiento, kWh

$fs$ : Factor de seguridad

$$C_{ed1} = 21,98 \text{ kWh} * (1 + 0,2) = 26,38 \text{ kWh}$$

La instalación fotovoltaica será diseñada con paneles de celda VERTEX-TSM-DE18M(II) de la fabricante Trina solar, que tienen capacidad de producción entre 380 y 400 W, un voltaje por panel de 49,8 V, estas celdas tienen una dimensión de 2008 x 1002 mm, representativo a 2 m<sup>2</sup> (Jinko, 2020). La cantidad de paneles necesarios para alimentar el sistema sin almacenamiento será:

### **Criterios de diseño**

- Potencia de recolección por panel, 400 W
- Celda PERC Monocristalina
- Área por panel, 2 m<sup>2</sup>
- Horas de brillo solar, 4,66 h/día

### **Dimensionamiento del sistema fotovoltaico sin almacenamiento**

El diseño del sistema fotovoltaico se realiza teniendo en cuenta la metodología dada por (Podder, Ahmed, Roy, & Biswas, 2017).

- Capacidad del inversor

La capacidad del inversor sugerida es de **1,351kWh**, por tanto, el inversor será un inversor solar Multiplus Compact 24/3000/70 120 V con una potencia de entrada de 4 kW, tensión de salida de 230V, una eficiencia de 93% y una potencia de salida de 1600 W a 25°C (MultiPlus, 2020).

- Potencia pico del sistema

$$P_{pv} = \frac{C_d}{\eta_i * \eta_c * T_s}$$

Donde,

$P_{pv}$ : Potencia pico media, kW

$C_d$ : Consumo diario, kWh

$\eta_i$ : Eficiencia del inversor de corriente

$\eta_c$ : Eficiencia del Controlador de carga, (no utiliza ya que no se utilizará almacenamiento por tanto se toma como un valor de 1)

$T_s$ : Tiempo pico de horas de sol, h (como se observa en el capítulo 2,1 es de 4,6 h)

$$P_{pv1} = \frac{26,38 \text{ kWh}}{0,93 * 1 * 4,6 \text{ h}} = 6,16 \text{ kW}$$

- Intensidad del sistema

$$I_{dc1} = \frac{P_{pv1}}{V_{dc}}$$

Donde,

$I_{dc1}$ : Intensidad del sistema sin almacenamiento, A

$P_{pv1}$ : Potencia pico del sistema sin almacenamiento

$V_{dc}$ : Voltaje del sistema, V (El sistema necesitara un sistema trifásico con voltaje de 230 V para que los equipos tengan un óptimo funcionamiento)

$$I_{dc1} = \frac{6160 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 26,81 \text{ A}$$

- Intensidad de los paneles solares

$$I_{rm} = \frac{P_{rm}}{V_{rm}}$$

Donde,

$I_{rm}$ : Intensidad del panel, A

$P_{rm}$ : Potencia del panel, W

$V_{rm}$ : Voltaje del panel, V

$$I_{rm} = \frac{400 \text{ W}}{49,8 \text{ V}} = 8,0 \text{ A}$$

- Numero de paneles en serie

$$n_{ps1} = \frac{V_{dc}}{V_{rm}}$$

Donde,

$n_{ps1}$ : Número de paneles en serie para la red sin almacenamiento

$V_{dc}$ : Voltaje del sistema, V

$V_{rm}$ : Voltaje del panel, V

$$n_{ps1} = \frac{230 \text{ V}}{49,8 \text{ V}} = 4,62 \cong 5$$

- Numero de paneles en paralelo

$$N_{pp1} = \frac{I_{dc1}}{I_{rm}}$$

Donde,

$N_{pp1}$ : Número de paneles en paralelo para la red sin almacenamiento

$I_{rm}$ : Intensidad del panel, A

$I_{dc1}$ : Intensidad del sistema sin almacenamiento, A

$$N_{pp1} = \frac{26,81 \text{ A}}{8,0 \text{ A}} = 4,6 \cong 5$$

- Número total de paneles

$$N_{p1} = N_{ps1} * N_{pp1}$$

Donde,

$N_{p1}$ : Numero de paneles necesarios en el sistema sin almacenamiento

$n_{pp1}$ : Número de paneles en paralelo para la red sin almacenamiento

$n_{ps1}$ : Número de paneles en serie para la red sin almacenamiento

$$N_{p1} = 5 * 5 = 25$$

- Área de paneles

$$A_{pl} = N_{p1} * 2 m^2$$

Donde,

$A_{pl}$ : Área de paneles para el sistema sin almacenamiento,  $m^2$

$$A_{pl} = 25 * 2 m^2 = 50 m^2$$

El área necesaria en este escenario es de  $10 m^2$ , los paneles podrían ser instalados sobre el techo del cuarto de bombas, evitando ocupar un espacio adicional al de las estructuras ya previstas. En la Tabla 21, se puede observar los parámetros de diseño para esta red fotovoltaica.

- Comprobación del inversor

Ya que se tendrán 5 redes en paralelo y en cada red se contará con 5 paneles, por tanto, cada arreglo tendrá un voltaje de:

$$P_A = N_p * P_p$$

Donde,

$P_A$ : Potencia del arreglo, W

$N_p$ : Numero de paneles

$P_p$  Potencia de paneles, W

$$V_A: 5 + 400W = 2000 W$$

Por tanto el inversor solar Multiplus Compact 24/3000/70 es suficiente para soportar la carga de cada uno de los arreglos y serán necesarios 5 de ellos.

Tabla 21. Parámetros instalación fotovoltaica híbrida

Parámetro	Valor	Unidad
Número de paneles	25	Panel
Área de paneles	50	$m^2$

Fuente: Elaboración propia

## **Instalación fotovoltaica autónoma**

La instalación fotovoltaica con almacenamiento debe recolectar la suficiente energía eléctrica como para satisfacer las demandas de energía en las horas nocturnas y de poca luz, por ello se conserva los consumos datos en la Tabla 20 y la demanda de 125,28 kWh.

Se utilizarán baterías de marca LEOCH Battery series, referencia S12-230, con 12 V y capacidad de 287,5 A (LEOCH, 2020) y Paneles

### **Criterios de diseño**

- Celda PERC Monocristalina
- Área por panel, 2 m<sup>2</sup>
- Horas de brillo solar, 4,66 h/día (capítulo 2.1.)
- Almacenamiento, 3 días
- Producción por cada panel solar, 400 Wh
- Voltaje batería, 12 v
- Capacidad batería 145 A

### **Dimensionamiento red con almacenamiento de energía**

- Potencia pico del sistema

$$P_{pv2} = \frac{C_{d2}}{\eta_i * \eta_c * T_s}$$

Donde,

$P_{pv2}$ : Potencia pico media para el sistema con almacenamiento, kW

$C_{d2}$ : Consumo diario con almacenamiento, kWh

$\eta_i$ : Eficiencia del inversor de corriente

$\eta_c$ : Eficiencia del Controlador de carga, (no utiliza ya que no se utilizará almacenamiento por tanto se toma como un valor de 1)

$T_s$ : Tiempo pico de horas de sol, h (como se observa en el capítulo 2,1 es de 4,6 h)

$$P_{pv2} = \frac{3 * 125,28 \text{ kWh}}{0,93 * 1 * 4,6h} = 87,86 \text{ kW}$$

- Intensidad del sistema

$$I_{dc2} = \frac{P_{pv2}}{V_{dc}}$$

Donde,

$I_{dc2}$ : Intensidad del sistema con almacenamiento, A

$P_{pv2}$ : Potencia pico del sistema con almacenamiento

$V_{dc}$ : Voltaje del sistema, V (El sistema necesitara un sistema trifásico con voltaje de 230 V para que los equipos tengan un óptimo funcionamiento)

$$I_{dc1} = \frac{87860 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 382 \text{ A}$$

- Numero de paneles en serie

$$N_{ps2} = \frac{V_{dc}}{V_{rm}}$$

Donde,

$N_{ps1}$ : Número de paneles en serie para la red con almacenamiento

$V_{dc}$ : Voltaje del sistema, V

$V_{rm}$ : Voltaje del panel, V

$$n_{ps1} = \frac{230 \text{ V}}{49,8 \text{ V}} = 4,62 \cong 5$$

- Numero de paneles en paralelo

$$N_{pp1} = \frac{I_{dc1}}{I_{rm}}$$

Donde,

$N_{pp1}$ : Número de paneles en paralelo para la red con almacenamiento

$I_{rm}$ : Intensidad del panel, A

$I_{dc1}$ : Intensidad del sistema con almacenamiento, A

$$N_{pp1} = \frac{382 \text{ A}}{9 \text{ A}} = 42,4 \cong 43$$

- Número total de paneles

$$N_{p1} = N_{ps1} * N_{pp1}$$

Donde,

$N_{p1}$ : Numero de paneles necesarios en el sistema con almacenamiento

$n_{pp1}$ : Número de paneles en paralelo para la red con almacenamiento

$n_{ps1}$ : Número de paneles en serie para la red con almacenamiento

$$N_{p1} = 5 * 43 = 215$$

- Capacidad de las baterías
  - Almacenamiento necesario

$$A_{pl2} = C_{ed} * t_a$$

Donde,

$A_{pl2}$ : Almacenamiento necesario, kWh

$t_a$ : Tiempo de duración, d

$$A_{pl2} = 125,28 kWh * 3 d = 375,86 kWh$$

- Almacenamiento libre de energía

$$E_{safe} = \frac{A_{pl2}}{D_{dis}}$$

Donde,

$E_{safe}$ : Almacenamiento libre de energía

$A_{pl2}$ : Almacenamiento necesario, kWh

$D_{dis}$ : Factor de descarga, (80,8% para 4 horas de carga con baterías de 1,75 V (LEOCH, 2020))

$$E_{safe} = \frac{375,86 kWh}{0,808} = 469,8 kWh$$

- Capacidad total del banco de baterías

$$C_{tb} = \frac{E_{safe}}{V_b}$$

Donde,

$C_{tb}$ : Capacidad total del banco de baterías, A

$E_{safe}$ : Almacenamiento libre de energía, Wh

$V_b$ : Voltaje de batería, V (según LEOCH, (2020) el voltaje para la batería es de 12 V)

$$C_{tb} = \frac{(469800 \text{ Wh})}{12 \text{ V}} = 39153 \text{ Ah}$$

- Número total de baterías

$$N_{tb} = \frac{C_{tb}}{C_b}$$

Donde,

$N_{tb}$ : Número total de baterías

$C_{tb}$ : Capacidad total del banco de baterías, A

$C_b$ : Capacidad de la batería, A

$$N_{tb} = \frac{39153 \text{ Wh}}{287,5 \text{ Wh}} = 136,18 \cong 137$$

- Numero de baterías en serie

$$N_{sb} = \frac{V_{dc}}{V_b}$$

Donde,

$N_{sb}$ : Numero de baterías en serie

$V_{dc}$ : Voltaje del sistema, V

$V_b$ : Voltaje de las baterías, V

$$N_{sb} = \frac{230 \text{ V}}{12 \text{ V}} = 19,6 \cong 20$$

- Numero de baterías en paralelo

$$N_{pb} = \frac{N_{tb}}{N_{sb}}$$

Donde,

$N_{pb}$ : Numero de baterías en paralelo

$N_{sb}$ : Numero de baterías en serie

$N_{tb}$ : Número total de baterías

$$N_{pb} = \frac{137}{20} = 6,8 \cong 7$$

Se necesitan 137 la baterías de marca LEOCH Battery series, referencia S12-230, con 12 v y capacidad de 287,5 A (LEOCH, 2020) la cual posee un voltaje de 12 v y una intensidad de 287,5 A para soportar y aguantar la carga necesaria para los 3 días de autonomía, además de esto, se tendrán conectadas dos de estas en paralelo aumentar el voltaje y asegurar la autonomía del circuito.

- Área de paneles

$$A_{pl2} = N_{pl2} * 2 m^2$$

Donde,

$A_{pl2}$ : Área de paneles para el sistema con almacenamiento,  $m^2$

$N_{pl2}$ : Numero de paneles necesarios en el sistema con almacenamiento

$$A_{pl} = 215 * 2 m^2 = 430 m^2$$

En la Tabla 22 podemos observar el resumen de los parámetros para las instalaciones fotovoltaicas.

- Capacidad del inversor

El arreglo de paneles solares será de 5 arreglos en paralelo cada uno conformado por 43 paneles, por lo tanto cada uno de los arreglos tendrá una potencia de:

$$P_A = N_p * P_p$$

Donde,

$P_A$ : Potencia del arreglo, W

$N_p$ : Numero de paneles

$P_p$  Potencia de paneles, W

$$P_A = 43 * 400 W = 17200 W$$

La capacidad del inversor sugerida es de 17,2 kWh, por tanto, el inversor seleccionado será un inversor Trifásico INGECON Sun 3PLAY 20TL con una potencia de entrada de 20,6 kWh, tensión de salida de 230V, una eficiencia de 93% y una potencia de salida de 20000 W a 25°C (Autosolar) este inversor además tiene la capacidad de cargar las baterías del sistema.

Tabla 22. Parámetros instalación autónomo

Parámetro	Valor	Unidad
Número de paneles	215	Panel
Área de paneles	430	m <sup>2</sup>
Almacenamiento	469,83	kWh
Número de baterías	137	Batería

Fuente: Elaboración propia

## Capítulo 7 Costos de construcción civil – eléctrica

Para la generación de energía eléctrica es necesario realizar la instalación y adecuación de diferentes elementos, como lo son un inversor solar, la batería, regulador de carga y otros componentes auxiliares que ayudan a transformar y aprovechar la energía, generada a partir de la irradiación solar, En las Tablas 23 y 24 se encuentran los costos para los sistemas de generación fotovoltaica.

Tabla 23. Costos para sistema híbrido.<sup>10</sup>

Elemento	Valor unitario (COP)*	Cantidad	Costo (COP)
Inversor solar Multiplus Compact 24/3000/70 120 V	4.560.192	5	22.800.960
Panel Solar-JINKO-395 W MONO PERC	462.800	25	11.570.000
<b>Total</b>			<b>34.370.960</b>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Costos para sistema autónomo.

Elemento	Valor unitario (COP)	Cantidad	Costo (COP)
Inversor solar Trifásico INGECON Sun 3PLAY 20TL	10.844.283	5	54.241.715
Batería-LEOCH LPS-12-285	1.494.640	137	204.765.680
Panel Solar-JINKO-395 W MONO PERC	462.800	215	99.502.000
<b>Total</b>			<b>358.509.395</b>

Fuente: Elaboración propia

Las Tablas 23 y 26 representan los costos directos de inversión inicial para la instalación y puesta en marcha de los sistemas fotovoltaicos, además de estos costos en equipos se debe añadir el gasto generado por mano de obra calificada, la cual estará encargada de la instalación correcta de los equipos y mantenimiento anual de los mismos, en la Tabla 25 se observan dichos costos para la instalación de los paneles, en la cual se requerirá 3 trabajadores, por un tiempo de 2 días.

<sup>10</sup> Costos tomados de la distribuidora suncolombia, disponible en: <https://cutt.ly/Pgota2s>

\* La sigla COP, según el código de monedas ISO 4217, significa Colombia, pesos

Tabla 25. Costos mano de obra.

Ítem	Costo unitario (COP)	Unidad	Cantidad requerida	Tiempo necesario (d)	Valor total (COP)
Técnico (Instalación híbrida y mantenimiento)	1.040.000	día	3	2	6.240.000
Técnico (Instalación autónoma)	3.040.000	día	3	2	18.240.000

Fuente: Elaboración propia

Los costos de inversión inicial para los escenarios con almacenamiento y sin este se muestran en la Tabla 26, donde se adiciona a el costo de los equipos para la instalación fotovoltaica los gastos generados por la mano de obra.

Tabla 26. Costos totales de la instalación de red.

	Instalación híbrida (COP)	Instalación autónoma (COP)
Costo de equipos	34.370.960	358.509.395
Costo de mano de obra	6.240.000	18.240.000
Valor total	40.610.960	376.749.395

Fuente: Elaboración propia

El periodo de retorno de la inversión inicial definido como el tiempo en el que la inversión inicial es superada por las ganancias a causa del retorno energético. La viabilidad económica de los sistemas fotovoltaicos dependerá mucho de este parámetro, por tanto, es necesario hacer un análisis de costo ganancia por parte de cada uno de los sistemas propuestos. En la Tabla 28 se encuentra una recopilación de información de la vida útil de los diferentes componentes de la red fotovoltaica.

Tabla 27. Vida útil de los elementos fotovoltaicos

Elemento	Vida útil	Referencia
Paneles solares	20 años	(Wuang, 2018)
Baterías solares	25 años	(Chavez, 2013)
Inversor solar	20 años	(Chan, Torres, Sánchez, Toral, & Acosta, 2014)

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta la Tabla 28 el periodo de retorno de la inversión inicial deberá tener una duración inferior a 20 años, tiempo en el que se debe plantear un cambio de la infraestructura de la red.

### Ganancias instalación híbrida

En este escenario se encontrará el periodo de retorno de la inversión inicial si se instalan 25 paneles solares de 400W, los cuales ocupan un área de 50 m<sup>2</sup> la Tabla 28 podremos observar el análisis de Valor Presente Neto (VPN) para el sistema de alimentación sin almacenamiento energético, teniendo en cuenta que el costo energético en el Condominio Campestre la primavera actualmente es de 336,28  $\frac{COP}{kwh}$  y un costo de mantenimiento por 6.240.000 COP para los paneles.

Tabla 28. Flujo de caja acumulado en VPN instalación solar Híbrida.

Año	Gasto energético red H. (COP)	Red Híbrida (COP)	Red pública (COP)	Reducción de costo (COP)
0		40.610.960	0	0
1	291.368.930	338.219.890	369.079.707	30.859.817
5	1.165.475.720	1.528.655.610	1.845.398.537	316.742.927
10	1.456.844.650	3.016.700.261	3.690.797.074	674.096.813
15	1.456.844.650	4.504.744.911	5.536.195.611	1.031.450.700
20	1.456.844.650	5.992.789.561	7.381.594.148	1.388.804.587

Fuente: Elaboración propia

El ítem de “Gasto energético red H.”, describe el consumo monetario acumulado por parte de la energía que gasta la PTAR en horas donde no hay producción energética solar, esos consumos son equivalentes a 349,5 kW.

La siguiente columna nombrada “Red Híbrida” comprende los gastos de inversión inicial para la compra e instalación de los equipos necesarios para la red. También incluye los costos acumulados de la columna “Gasto energético red H” más los costos de mantenimiento anuales (descritos en la Tabla 25).

La columna denominada “Red pública” hace referencia a los gastos acumulados generados por la red pública en el escenario de que no se tenga ninguna instalación fotovoltaica.

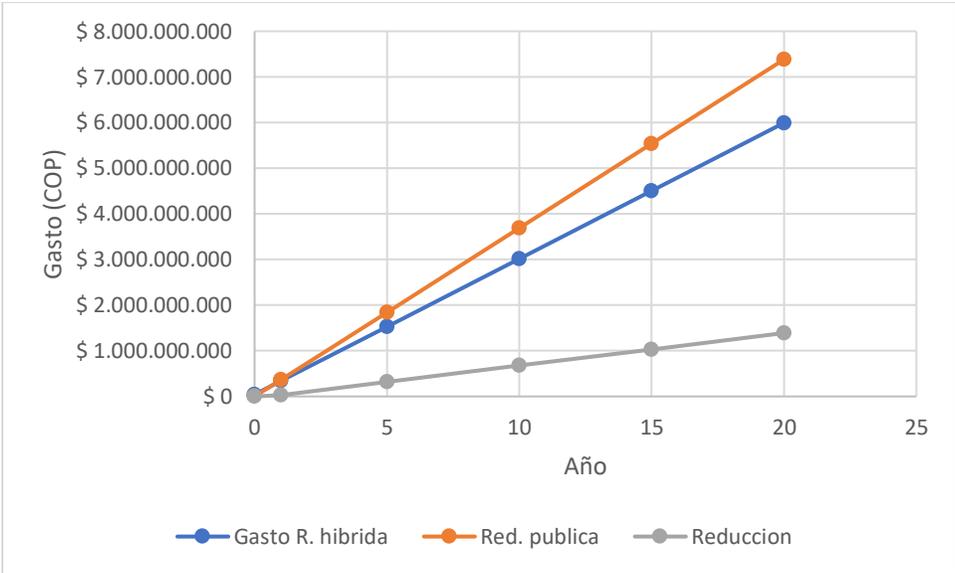
Cada una de las columnas anteriormente descritas se encuentran en valor acumulado. La última columna describe la reducción de gastos o ahorro que se puede obtener con la instalación del sistema FV frente al escenario de no tenerla.

La Tabla 28 describe el comportamiento de la inversión de los paneles solares que funcionan 4,6 horas al día, se encuentra que el periodo de retorno es menor al tiempo de vida útil, con lo cual una instalación de este tipo es viable.

El condominio podría reducir un costo al término de la vida útil de los elementos de 1.388.804.587 COP, además se puede encontrar que el periodo de retorno de la inversión inicial se encontraría desde el primer año ya que la ganancia para este año supera los costos de inversión inicial.

La tendencia de la Tabla 28, se expresa gráficamente en la Figura 22, la cual confronta el tiempo contra el gasto económico a causa de los gastos energéticos.

Figura 22. VPN instalación solar híbrida



Fuente: Elaboración propia

La Figura 22 describe la intersección de dos rectas, la recta llamada Gasto R. Híbrida, hace referencia a los gastos energéticos por parte del conjunto teniendo en cuenta la disminución de 26,38 kWh, que serán cubiertos por los paneles solares, mientras la otra representa el consumo total de la PTAR si únicamente se abasteciera de la energía de la red pública, la cual finalmente termina rebasando a los gastos con la red fotovoltaica sin almacenamiento.

Para tener otra vista del periodo de retorno de la inversión inicial, se realiza una proyección del incremento en costos de la energía, la Tabla 29 muestra la tendencia de costos por kWh vendido.

Tabla 29. Tarifas EBSA de 2018 al 2020

mes	Tarifas EBSA					
	2018 (COP)	Tasa de crecimiento	2019 (COP)	Tasa de crecimiento	2020 (COP)	Tasa de crecimiento
ENERO	451,60		487,88	-2,856%	498,73	-2,15%
FEBRERO	468,96	3,846%	510,85	4,710%	510,40	2,34%
MARZO	472,46	0,745%	497,03	-2,706%	518,75	1,64%
ABRIL	468,14	-0,914%	500,15	0,628%		
MAYO	472,44	0,920%	505,09	0,987%		
JUNIO	491,99	4,138%	502,44	-0,524%		
JULIO	489,56	-0,494%	503,19	0,149%		
AGOSTO	492,64	0,629%	521,18	3,576%		
SEPTIEMBRE	429,51	-12,815%	532,22	2,118%		
OCTUBRE	494,64	15,164%	506,27	-4,874%		
NOVIEMBRE	502,99	1,688%	507,77	0,295%		
DICIEMBRE	501,81	-0,235%	509,47	0,335%		
P		1,152%	P <sup>11</sup>	0,427%	P	0,61%

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 29 la tasa de crecimiento fue calculada con la formula

$$\frac{C_{n+1} - C_n}{C_n} * 100\%$$

Donde,

$C_n$ : Valor del kWh en el mes n,

$C_{n+1}$ : Valor del kWh en el mes siguiente a n,

Tomando los promedios en la Tabla 29, se encuentra:

<sup>11</sup> P, Hace referencia a la palabra promedio

$$t_p = \frac{p1 + p2 + p3}{3}$$

Donde,

$t_p$ : tasa promedio de incremento mensual

$t_{pa}$ : tasa promedio de incremento anual

P1: Promedio tarifario de energía del año 2018

P2: Promedio tarifario de energía del año 2019

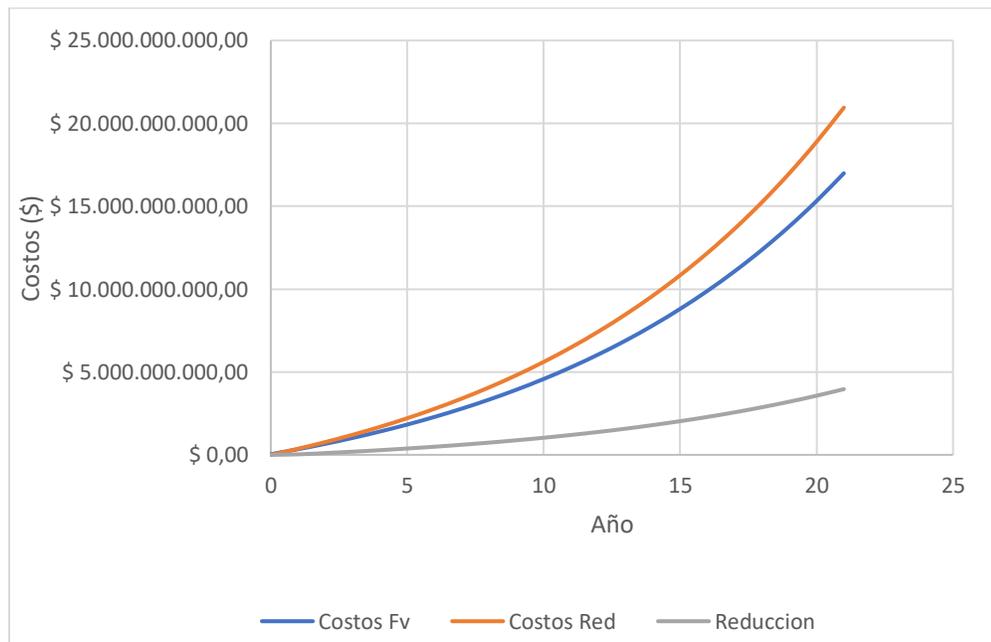
P3: Promedio tarifario de energía del año 2020

$$t_p = \frac{1,152\% + 0,427\% + 0,61\%}{3} = 0,7288\% \text{ en un mes}$$

$$t_{pa} = 0,7288\% * 12 = 9\%$$

Con esta tasa de 9% anual de incremento en la tarifa al año, se realiza la Figura 23, la cual contiene una proyección de los costos teniendo en cuenta el incremento del precio por kWh, además de esto según (Banco de la republica, 2020) la inflación será de 4,47%, la cual será aportada en los costos del mantenimiento anual.

Figura 23. Proyección de gasto realizado por el Sistema Híbrido.



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en esta curva la ganancia para este sistema sin almacenamiento se encuentra desde el año 1 donde los gastos de la red pública son de 369.079.707 COP, se cruza con la curva de costos por la red híbrida que para el año 1 tiene gastos por 338.219.890, indicando que los costos incluyendo la inversión inicial son menores a los del suministro completo de la red.

## Ganancias red con autónoma

La instalación con almacenamiento energético tendrá 215 paneles solares, equivalentes a un área de 430 m<sup>2</sup>, se le instalarán 137 baterías las cuales acumularán la carga necesaria para 72 horas de autonomía, suponiendo que no tenga aportes de energía ni de los paneles ni de ninguna otra fuente, ya que es un sistema de mayor complejidad se provee que tenga un mantenimiento anual por un valor de 18.240.000 COP para los paneles. En la Tabla 30 se muestra el valor presente neto, en el escenario que se realice una instalación con almacenamiento.

Tabla 30. VPN instalación híbrida

Año	Costos de mantenimiento(COP)	Red Autónoma (COP)	Red pública (COP)	Reducción de costo (COP)
0		449.709.395	0	
1	18.240.000	467.949.395	369.079.707	- 98.869.688
5	72.960.000	540.909.395	1.845.398.537	1.304.489.142
10	91.200.000	632.109.395	3.690.797.074	3.058.687.679
15	91.200.000	723.309.395	5.536.195.611	4.812.886.216
20	91.200.000	814.509.395	7.381.594.148	6.567.084.753

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior la columna gastos de mantenimiento describe los costos anuales que genera los mantenimientos de la red autónoma para estar en óptimas condiciones, estos costos son extractados de la tabla 25.

La siguiente columna nombrada “Red autónoma” comprende los costos de inversión inicial, y los costos de mantenimiento anuales.

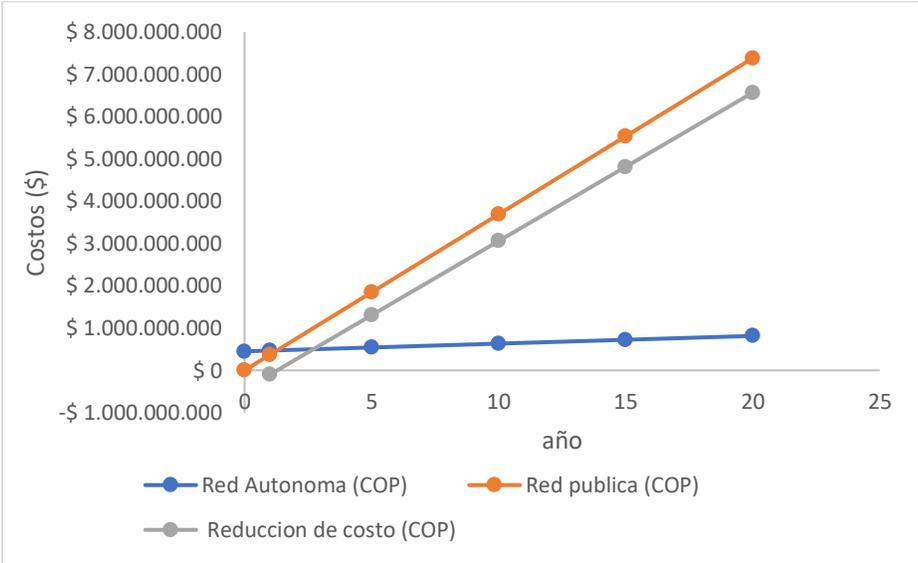
La columna denominada red pública hace referencia a los gastos generados por la red pública en el escenario de que no se tenga ninguna instalación fotovoltaica.

Cada una de las columnas anteriormente descritas se encuentran en valor acumulado. La última columna describe la reducción de gastos que se puede obtener con la instalación de una red fotovoltaica totalmente autónoma, esta columna es el resultado de una sustracción de los gastos de la red pública menos los gastos de la red autónoma.

La Tabla 30 muestra que los gastos por parte de la red son mucho mayores a los gastos a causa del sistema de producción energética solar con almacenamiento, por una diferencia de \$ 6.567.084.753 COP al final de la vida útil del sistema.

Adicionalmente, se puede encontrar que la inversión inicial se recupera en el segundo año, cuando los gastos en la red pública superan los gastos en inversión inicial. En la Figura 24, se puede observar la tendencia de costos generados por la instalación con almacenamiento.

Figura 24. VPN instalación con almacenamiento

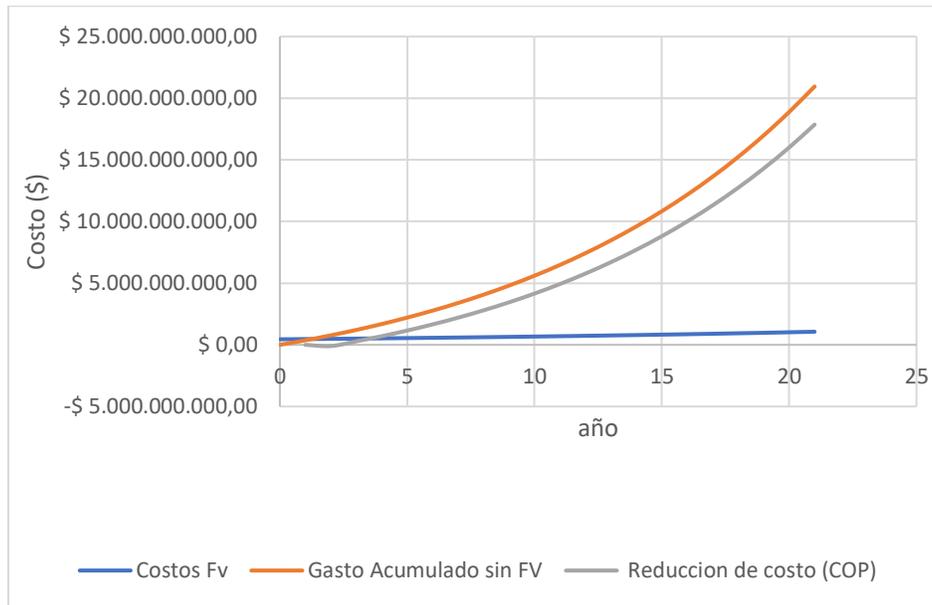


Fuente: Elaboración propia

La línea de gasto energético red representa los consumos económicos por parte de la red fotovoltaica con almacenamiento, tiene una pendiente mucho menor a la línea representativa de consumos sin instalación de alguna fuente alterna de energía, por ello, su intersección, ocurre en un tiempo medio de la vida útil de los elementos del sistema fotovoltaico.

El comportamiento de la inversión inicial puede observarse de mejor manera en la Figura 25, en la cual se tiene en cuenta la inflación y el incremento del costo para el servicio de luz, previamente nombrados en el capítulo 4.1.

Figura 25. Proyección de gasto realizado por el Sistema con almacenamiento.



Fuente: Elaboración propia

El periodo de retorno de la inversión inicial para este sistema con almacenamiento esta entre los primeros 5 años, donde la cantidad de gasto invertido en los equipos es recuperada por la producción energética que alimenta a la planta de manera autónoma, como se puede encontrar en la Figura 25.

## Conclusiones

- El Condominio Campestre La Primavera presenta las condiciones climáticas con nubosidades en promedio de 5 octas y un promedio de 4.6 horas de sol al día, estas características hacen que el condominio tenga unas condiciones climáticas que repercutirán positivamente en las eficiencias de los paneles fotovoltaicos dándole un mayor porcentaje de captación energética.
- El sistema de tratamiento tendrá remociones esperadas del 89% en DBO y 81% en SST, por tanto el efluente tendrá concentraciones de 30 mgDBO/L y 30 mgSST/L.
- El diseño de la PTAR constará con un canal de cribado el cual retendrá materiales superiores a 0,5 cm, también incluirá un desarenador con dos módulos encargados de la remoción de partículas discretas, así como una trampa de grasas y aceites. Además de esto incluirá un reactor biológico de lodos activados con dos sedimentadores secundarios instalados en paralelo. El reactor y los clarificadores serán interconectados con una línea de lodos con bombeo para realizar la recirculación, finalmente se debe tramitar con las autoridades ambientales un vertimiento en la quebrada Las fuentecitas o en el Río Monquirá en el cual se puedan depositar el agua tratada de manera segura
- La planta de tratamiento de agua residual tendrá consumos totales de 125,28 kWh que podrán ser solventados parcialmente por la instalación de paneles 25 solares de 400 V para un escenario donde se tenga un suministro híbrido entre energía solar y energía de la red pública. Por otra parte, con el montaje de 215 celdas fotovoltaicas alimentando 137 baterías de 287,5 A se puede alimentar la PTAR de forma autónoma sin necesidad de tomar energía de otra fuente.
- La planta de tratamiento alimentada con energía de la red pública puede generar gastos por 7.381.594.148 COP, si se realiza la instalación de paneles fotovoltaicos los cuales solventen total o parcialmente la energía necesaria para el funcionamiento de la planta de tratamiento de agua residual del Condominio Campestre La Primavera, se prevé que se tengan reducciones de costos operativos entre 1.407.045.355 COP y \$ 6.564.976.356 COP los cuales darán un retorno de la inversión en un plazo máximo de 3 años.
- La instalación solar autónoma para la PTAR del condominio campestre la primavera es la opción con mayor viabilidad, puesto que ofrece una reducción de costos operativos de \$ 6.564.976.356 COP más que la instalación híbrida, además de esto, es posible recuperar la inversión inicial en un lapso de 1 a 3 años. Por lo cual la inversión de capital y área provee un mayor margen de reducción de costos que la que se puede llegar a ofrecer con instalaciones

de alimentación mixta o tomando la energía de la red pública, esto hace viable la alimentación con energía solar a la PTAR

## Referencias

Bes Monge, S., M.T. Silva, A., & Bengoa, C. (s.f.). *Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales*. Obtenido de <http://www.cyted.org>: [http://www.cyted.org/sites/default/files/manual\\_sobre\\_oxidaciones\\_avanzadas\\_0.pdf](http://www.cyted.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidaciones_avanzadas_0.pdf)

Alfredo García-García, V. M.-M.-C.-S.-J.-H. (2015). Industrial wastewater treatment by electrocoagulation–electrooxidation processes powered by solar cells. *fuel*, 46-54.

Arango Ruiz, Á. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 49-56.

Aspercol. (1 de 12 de 2020). *Aspercol*. Obtenido de <https://www.aspercol.com/aspersores.php>

Autosolar. (s.f.). *Inversor solar 3Play serie TL*. Obtenido de <https://autosolar.es/pdf/Ingeteam-Ingecon-3Play.pdf>

Banco de la republica. (10 de 10 de 2020). *Banco de la republica* . Obtenido de <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/indice-precios-consumidor-ipc>

Bottecchia, O. L. (2009). A fórmula barométrica como instrumento de ensino em Química. *SciELO*, Vol-32 no.7.

C.J. Nawarkar, V. S. (2019). Solar powered Electrocoagulation system for municipal wastewater treatment. *FUEL*, 222-226.

Chan, F., Torres, E., Sánchez, V., Toral, H., & Acosta, R. (2014). Determinación de la vida útil de un Inversor para. *REVISTA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN*, vol 12 No 1.

Changfu Han, J. L. (2013). An innovative integrated system utilizing solar energy as power for the treatment of decentralized wastewater. *Journal of Environmental Sciences*, 274-279.

Chavez, M. A. (8 de Julio de 2013). *Proyecto de Factibilidad para uso de Paneles Solares en Generación Fotovoltaica de Electricidad en el Complejo Habitacional "San Antonio" de Riobamba*. Escuela superior politecnica de Chimborazo. Obtenido de Proyecto de Factibilidad para uso de Paneles Solares en Generación Fotovoltaica de Electricidad en el Complejo

Habitacional “San Antonio” de Riobamba.:  
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/2478>

CIMBALA, J. M., & ÇENGEL, Y. A. (2006). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y*. Mexico: McGraw-Hill.

Condominio campestre La Primavera. (2020). *Memoria técnica del sistema de captación y control*. Monquirá: Corpoboyacá.

D. Marmanisa, K. D. (2019). Electrochemical Treatment of Olive Mill Waste powered by Photovoltaic Solar Energy. *Journal of Power Technologies* 98 , 377-381.

Edison GilPavas, I. D.-G.-G. (2018). Optimization of solar-driven photo-electro-Fenton process for the treatment of textile industrial wastewater,. *Journal of Water Process Engineering*, 49-55.

Grupo EPM. (2019). *sostenibilidadgrupoepm*. Obtenido de <https://2018.sostenibilidadgrupoepm.com.co/pdf/22.pdf>

IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Bogotá: IDEAM.

IDEAM. (12 de Junio de 2020). *Solicitud de información metereologica estacion BERHTA*. Tunja: IDEAM.

Ivan Muñoz, F. P.-D.-R. (2019). Prospective environmental and economic assessment of solar-assisted thermal energy recovery from wastewater through a sequencing batch biofilter granular reactor. *Journal of Cleaner Production*, 1300-1309.

Jinko. (2020). *aldo.com*. Obtenido de <https://www.aldo.com.br/produto/79475-8/painel-solar-fotovoltaico-jinko-jkm440m-6tl4-v-440w-tiger-pro-mono-perc-half-cel-2077-efic-120-celul>

Jinko. (2020). *suncolombia*. Obtenido de <https://www.suncolombia.com/pdf/94.CheetahPerc%20JKM380-400M-72H-V-A1-SP.pdf>

LEOCH. (7 de 10 de 2020). *SunColombia*. Obtenido de [suncolombia: https://www.suncolombia.com/pdf/39.LPS12-230.pdf](https://www.suncolombia.com/pdf/39.LPS12-230.pdf)

Lopez Cualla, R. A. (2004). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería.

Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater engineering : treatment and resource recovery*. New York: McGraw Hill.

- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Resolución 0330 de 2017*. Bogotá: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
- Monsolar. (6 de 12 de 2020). *Monsolar*. Obtenido de <https://www.monsolar.com/inversor-solar-huawei-sun2000-2kw.html>
- MultiPlus. (5 de 12 de 2020). *suncolombia*. Obtenido de suncolombia.: <https://www.suncolombia.com/pdf/91.DatasheetMultiPlus242000.pdf>
- NOPOL. (2002). *MANUAL DE AIREACIÓN ABS-NOPOL*. NOPOL.
- NOPOL. (9 de 11 de 2020). *Difusores para la aplicación en plantas de tratamiento de aguas municipales e industriales*. Obtenido de <https://www.aguamarket.com/sql/productos/catalogos/NOPON%20sistema%20de%20aireaci%C3%B3n%20de%20burbuja%20fina.pdf>
- Pérez, R. (2019). *Instalaciones hidrosanitarias, de gas y de aprovechamiento de aguas lluvia en edificaciones*. Bogota: ECOE Ediciones.
- Podder, A., Ahmed, K., Roy, N., & Biswas, P. (2017). a Internacional de 2017 sobre Avances en Ingeniería Eléctrica (ICAEE). *Design and Simulation of an Independent Solar Home System with Battery Backup*. Dhaka, Bangladesh: ICAEE.
- Qasim, S. (1999). *Wastewater treatment plants. Planning, desing and operation*. Technomic Publication.
- Qasim, S. R. (1999). *Wasterwater treatment plants planning, desing and operation*. United States of Ameriza: CRC PRESS LLC.
- Rodriguez, A. (2012). *Fundamentos de la climatología*. Universidad de la Rioja.
- Roll. (2020). *Suncolombia*. Obtenido de <https://www.suncolombia.com/pdf/41.S12-160AGM.pdf>
- Romero, J. A. (2016). *Tratamiento de aguas residuales teoria y principios*. Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería.
- Saldarriaga, J. (1998). *Hidraulica de tuberías*. Bogotá: Mc Graw Hill.
- Sandra Figueroa, L. V.-G. (2009). Decolorizing textile wastewater with Fenton's reagent electrogenerated with a solar photovoltaic cel. *Water Research*, 283-294.
- Secretaria de Energia (SENER). (2015). *olade*. Obtenido de [http://www.olade.org/realc/docs/doc\\_88002\\_20161031082948.pdf](http://www.olade.org/realc/docs/doc_88002_20161031082948.pdf)

- Supeservicios. (2018). *Estudio Sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado 2014 - 2017*. Bogotá: REPUBLICA DE COLOMBIA.
- Tejada, A. (2018). *La humedad en la atmósfera Bases físicas, instrumentos y aplicaciones*. Colima: Universidad de Colima.
- Torres, L. J. (2019). *Diseño Conceptual de una Planta Potabilizadora para Condominios Campestres con Alturas entre 1000 y 2000 m.s.n.m. en Boyacá*. Tunja: Universidad de Boyacá.
- Unión Europea. (15 de Octubre de 2019). *ec.europa*. Obtenido de [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/es/#MR](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/#MR)
- vyrsa. (30 de 01 de 2021). *vyrsa*. Obtenido de <https://www.vyrsa.com/es/catalogo/productos/vyr-157-l/>
- Wuang, H. (2018). *Dialnet*. Obtenido de Unirioja: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=184994>
- Zagaceta, L. H. (2018). *Determinacion de la huella hidrica para la produccion de pastos en la microcuenca ganadera de la laguna de pomacochas*. Chachapoyas: Universidad nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas.