

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

**“Diseño de una planta potabilizadora de agua abastecida por
energía solar para la comunidad de pile”**

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Fernando Vicente Amoroso Párraga

Kevin Leopoldo Muñoz Zavala

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

Quiero empezar dedicando este trabajo a Dios, a mis padres por su esfuerzo y sacrificio, por brindarme el amor, cariño y la sabiduría necesaria para enfrentar las dificultades presentes en mi camino y ser los principales formadores de lo que ahora soy como persona.

A mi familia, amigos y profesores, por el apoyo incondicional y las experiencias compartidas que siempre serán recordadas.

Fernando Amoroso Párraga

Quiero dedicar este trabajo a mis padres, quienes a pesar de la distancia me han brindado de sus consejos, apoyo y cariño que me han permitido llegar a ser la persona de hoy en día en todo aspecto de mi vida.

A mi familia, y aquellas personas que han creído en mí de forma incondicional, que sepan que siempre tendrán mi consideración.

Kevin Muñoz Zavala

AGRADECIMIENTO

Queremos empezar agradeciendo a Dios por darnos sabiduría, al PhD. Guillermo Soriano quien, como tutor, planteó las bases de nuestro proyecto y cuya supervisión fue vital para su desarrollo.

Igualmente, agradecemos al MSc. Rubén Hidalgo, cotutor del proyecto, cuya colaboración fue fundamental para elaboración del proyecto desde sus inicios.

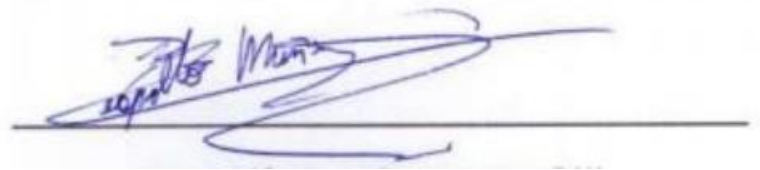
También agradecemos a la MSc. Andrea Boero por la supervisión y asesoramiento en cada una de las etapas de la tesis, al MSc. Gonzalo Zabala, cuyas revisiones fueron de gran importancia para el desarrollo del sistema hidráulico de la planta y al Ing. Gabriel Guevara quien aportó con su experiencia dentro de la industria del tratamiento de agua para diseñar y costear la planta.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Kevin Leopoldo Muñoz Zavala* y *Fernando Vicente Amoroso Párraga* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Fernando Vicente Amoroso Párraga



Kevin Leopoldo Zavala Muñoz

EVALUADORES



Firmado electrónicamente por:

**ANDREA JAEL
BOERO VERA**

MSc. Andrea Boero

PROFESOR DE LA MATERIA



Firmado electrónicamente por:

**GUILLERMO ENRIQUE
SORIANOIDROVO**

PhD. Guillermo Soriano

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La comunidad de Pile, ubicada en la provincia de Manabí, consume agua de baja calidad proveniente de un pozo. Esto afecta el estilo de vida de sus pobladores al producir enfermedades que representan gastos médicos y pérdida laboral. Por ello, se propone diseñar una planta potabilizadora de agua que garantice la distribución de agua de calidad, implementando paneles fotovoltaicos para aprovechar la energía solar presente en el sector y reducir su impacto ambiental. Para esto, el proyecto desarrolló dos plantas con diferentes horarios de operación: 12 y 24 horas al día, dimensionando las etapas y los equipos necesarios considerando la norma ecuatoriana. Luego, se estimó el consumo energético y se obtuvo el perfil de carga para cada caso. Posteriormente, los datos calculados serían ingresados en el software de prefactibilidad Homer PRO para obtener dos configuraciones de sistemas fotovoltaicos: autónomo y conectado a la red. Con ello, se pudo determinar que aplicando un sistema autónomo a una planta que opera 12 h se alcanzaron reducciones del 59% del costo presente neto, 22% del costo de energía y 3.3% de excedentes energéticos respecto a una planta de 24 h. Mientras que, aplicando el sistema conectado a la red, con la planta de 24 h se obtuvo una reducción del 9,7% en el costo presente neto respecto a la de 12 h. Por lo tanto, se demuestra que una planta de 12 h abastecida por un sistema autónomo es la alternativa más rentable para la potabilización de agua en una comunidad rural.

Palabras Clave: Planta de potabilización, agua, autónomo, conectado a red, rural.

ABSTRACT

The community of Pile which is located in the province of Manabí obtains its water from a nearby well, affecting the lifestyle of its inhabitants by causing illnesses that result in medical expenses and loss of work. For this reason, it was proposed to design a water potabilization plant that would guarantee the distribution of quality water, implementing photovoltaic panels to take advantage of the solar available in situ to reduce its environmental impact. To this end, the project developed two plants with different operating schedules: 12 and 24 hours per day, sizing the needed stages and equipment according to Ecuadorian standards. Then, the energy consumption was estimated, and the load profile was obtained for each case. Subsequently, the results would be entered into the Homer PRO pre-feasibility software to obtain two configurations of photovoltaic systems: stand-alone and grid-connected. With this, it was possible to determine that by applying an autonomous system to a plant operating for 12 h, reductions of 59% of the NPC, 22% of the COE, and 3.3% of energy surplus were achieved for a 24 h plant. While analyzing the grid-connected system with the 24 h plant, a 9.7% reduction in NPC was obtained concerning 12 h plant. Therefore, it is shown that a 12 h plant supplied by an autonomous system is the most cost-effective alternative for water potabilization in a rural community.

Keywords: *Potabilization plant, water, stand-alone, grid-connected, rural.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1 Definición del Problema.....	1
1.2 Justificación del proyecto	1
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Marco teórico.....	3
1.4.1 Situación de la región	3
1.4.2 Estado de arte.....	4
1.4.3 Calidad de agua.....	5
1.4.4 Plantas potabilizadoras de agua	5
1.4.5 Sistema solar fotovoltaico	9
CAPÍTULO 2.....	10
2. Metodología	10
2.1 Diseño conceptual.....	10
2.1.1 Requerimientos de diseño	10
2.1.2 Criterios de diseño	11
2.1.3 Alternativas de solución	11

2.1.4	Selección de la solución	12
2.2	Diseño preliminar.....	14
2.2.1	Diseño del sistema de potabilización	14
2.2.2	Diseño del sistema solar fotovoltaico.....	14
2.3	Diseño detallado de la PPA.....	15
2.4	Consumo energético de la PPA	16
2.5	Sistema de suministro energético	18
2.5.1	Condiciones climáticas	18
2.5.2	Perfil de carga.....	19
2.5.3	Modelamiento en Homer Pro	19
2.5.4	Datos de entrada del sistema	22
CAPÍTULO 3.....		24
3.	Resultados y análisis	24
3.1	Demanda de agua de la comunidad.....	24
3.2	Planta potabilizadora de agua	24
3.3	Sistema hidráulico	30
3.4	Demanda energética de la PPA	30
3.5	Sistema solar fotovoltaico autónomo (SPV-OFF).....	33
3.6	Sistema solar fotovoltaico conectado a la red (SPV-ON)	36
3.7	Análisis económico.....	38
CAPÍTULO 4.....		44
4.	Conclusiones y recomendaciones	44
4.1	Conclusiones.....	44
4.2	Recomendaciones.....	46
BIBLIOGRAFÍA		48
APÉNDICES		51

ABREVIATURAS

PPA	Planta potabilizadora de agua
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
SPV-OFF	Sistema solar fotovoltaico autónomo
SPV-ON	Sistema solar fotovoltaico conectado a la red
AHP	Analytic Hierarchy Process
HOMER	Hybrid Optimization of Multiple Electric Renewables
ARCONEL	Agencia de Regulación y Control de Electricidad
NPC	Costo Presente Neto
COE	Costo de energía
COA	Costo energético para producción de agua potable
BC	Bomba centrífuga
BD	Bomba dosificadora
BS	Bomba sumergible

SIMBOLOGÍA

HP	Caballo de fuerza
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio-hora
hab	Habitantes
USD	Dólar americano
CO ₂	Dióxido de Carbono
CED	Cédula
Q	Caudal
V	Volumen
t	Tiempo
P	Potencia
H	Cabezal
G	Gradiente de velocidad

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación geográfica de la comunidad de Pile	3
Figura 1.2 Zonas de un sedimentador	8
Figura 2.1 Esquema del proceso para la PPA.....	14
Figura 2.2 Esquema del sistema fotovoltaico autónomo	15
Figura 2.3 Esquema del sistema fotovoltaico conectado a la red.....	15
Figura 2.4 Tramos del sistema hidráulico de la PPA.....	17
Figura 2.5 Condiciones climáticas en la comunidad de Pile	19
Figura 3.1 Canaleta de Parshall. (Ordinola Saavedra. 2019)	25
Figura 3.2 Vista superior floculadores	26
Figura 3.3 Corte transversal sedimentador de flujo horizontal.....	28
Figura 3.4 Corte transversal de filtro rápido.....	29
Figura 3.5 Escenario 1	32
Figura 3.6 Escenario 2	32
Figura 3.7 Escenario 3	32
Figura 3.8 Escenario 24h.....	33
Figura 3.9 Curva de operación del SPV-OFF 1	34
Figura 3.10 Curva de operación del SPV-OFF 2	34
Figura 3.11 Curva de operación del SPV-OFF 3	35
Figura 3.12 Curva de operación del SPV-ON 4.....	36
Figura 3.13 Curva de operación del SPV-ON 1.....	37
Figura 3.14 Curva de operación de SPV-ON 4.....	38
Figura A.1 Comparación por pares entre objetivos de diseño	52
Figura A.2 Comparación de alternativas considerando costos de operación	53
Figura A.3 Comparación de alternativas considerando emisiones	53
Figura A.4 Comparación de alternativas considerando excesos de energía	53
Figura A.5 Comparación de alternativas considerando inversión inicial	53
Figura A.6 Comparación de alternativas considerando mantenimiento.....	54
Figura A.7 Comparación de alternativas considerando fiabilidad	54
Figura A.8 Ponderaciones de las alternativas	54
Figura A.9 Esquema de la bomba sumergible.....	68
Figura A.10 Curva de operación bomba EBARA CMD 150M. (Ficha Técnica Xarelto. 2021)	69

Figura A.11 Especificaciones PEDROLLO CP750A-N. (Catalogo KIWI Pedrollo. 2020)	70
Figura A.12 Especificaciones PEDROLLO HF20A-N. (Catalogo KIWI Pedrollo. 2020)	70
Figura A.13 Curva de operación bomba DWE-75B. (Ficha Tecnica Picosulfato. 2019)	70
Figura A.14 Velocidad de sedimentación en función de la concentración de sólidos suspendidos y coagulante. (Villacreses et al. 2006)	71
Figura A.15 Selección de tipo de bomba según velocidad específica. (Cimbala & Cengel. 2001)	71
Figura A.16 Longitud equivalente de los accesorios. (Crane. 1979)	72
Figura A.17 Licencia Homer PRO	73
Figura A.18 Diagrama PID.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Procesos de coagulación.....	6
Tabla 1.2 Parámetros de un sedimentador.....	7
Tabla 1.3 Parámetros de un filtro lento.....	8
Tabla 2.1 Criterios de diseño.....	11
Tabla 2.2 Alternativas de solución.....	12
Tabla 2.3 Escala de valor para AHP.....	12
Tabla 2.4 Ponderación de los criterios	13
Tabla 2.5 Matriz de decisión.....	13
Tabla 2.6 Detalle de los tramos del sistema hidráulico.....	17
Tabla 2.7 Costos de precios de energía proveniente de la red	22
Tabla 3.1 Dotación y población estimada.....	24
Tabla 3.2 Dimensiones de canaleta de Parshall.....	25
Tabla 3.3 Resultados de mezcla rápida.	26
Tabla 3.4 Tramos de floculación.....	27
Tabla 3.5 Resultados del sedimentador	27
Tabla 3.6 Lecho de filtro seleccionado (CPE INEN 5. 1992)	28
Tabla 3.7 Lecho de grava seleccionado. (CPE INEN 5. 1992).....	28
Tabla 3.8 Resultados del filtro rápido	29
Tabla 3.9 Resultados de cloración	29
Tabla 3.10 Diámetros de tuberías	30
Tabla 3.11 Potencia requerida por las bombas de la PPA	30
Tabla 3.12 Consumo de la PPA	31
Tabla 3.13 Tiempo de operación de PPA por año.....	31
Tabla 3.14 Sistema energético para SPV-OFF	33
Tabla 3.15 Sistema energético para SPV-ON	36
Tabla 3.16 Inversión inicial de cada PPA	39
Tabla 3.17 Costo de operación de cada PPA.....	40
Tabla 3.18 Inversión inicial para SPV-OFF.....	40
Tabla 3.19 Inversión inicial para SPV-ON	41
Tabla 3.20 Costos de operación y mantenimiento para SPV-ON.....	42
Tabla 3.21 Resumen de COE para cada sistema energético.....	43
Tabla A.1 Parámetros para mezcla rápida	56

Tabla A.2 Parámetros de floculación.....	58
Tabla A.3 Velocidades recomendadas para la planta	64
Tabla A.4 Accesorios de los tramos presentes.....	65
Tabla A.5 Valores de K para accesorios. (Cimbala & Cengel. 2001)	66
Tabla A.6 Nominación de equipos.....	66
Tabla A.7 Condiciones de operación de las bombas.....	67
Tabla A.8 Especificaciones de bombas.....	69

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Definición del Problema

La comunidad rural de Pile, ubicada en la provincia de Manabí, presenta un abastecimiento de agua a través de una red de distribución desde un pozo de 45 metros de profundidad que se encuentra dentro de la comuna. El sistema de captación de agua no presenta una planta de tratamiento previo a su distribución, entregando a los pobladores agua cruda. Considerando la Norma INEN 1108, los índices de calidad del agua medidos en el punto de captación no son recomendables para el consumo humano, debido a su elevada alcalinidad y la presencia de coliformes capaces de ocasionar brotes de enfermedades como diarrea o insuficiencia renal, representando un riesgo potencial para los residentes en la comunidad. Además, el consumo de agua cruda afecta en aspectos económicos en caso de presentarse alguna enfermedad, dado que los residentes no se encuentran en condiciones óptimas para sus actividades (laborales, estudiantiles, etc.) y deben enfrentar gastos medicinales para el tratamiento de las infecciones ocasionadas. Dada la poca inversión hacia aspectos de salud, seguridad y bienestar de la comunidad por parte de los municipios, no se ha encontrado una solución viable para el problema, cuya operación represente un uso eficiente de los recursos energéticos de la zona.

1.2 Justificación del proyecto

Los problemas del agua contaminada tienen dimensiones más allá de la salud. De acuerdo con un estudio referente al impacto económico de la calidad del agua en el brazo del estero salado (Pino et al., 2020), la cantidad anual de gasto del sector público en la salud debido a las enfermedades provocadas por el agua contaminada tales como infecciones intestinales y parasitosis, tiene un costo de \$28 por persona, considerando el costo de tratamiento y pago de médicos honorarios. Asimismo, se le atribuye otro hecho importante: la pérdida de dinero por falta de ingreso de ciertas personas que se ven

forzadas a dejar su trabajo de día a día con el fin de tratar sus enfermedades que, de acuerdo con el mismo estudio, llega a ser de hasta \$30 por persona.

Por lo tanto, existe una necesidad por hacer frente a esta problemática y reducir su impacto económico, social y de salud, para contribuir al desarrollo internacional y dando un paso hacia el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) #6: Agua limpia y saneamiento, #3: Salud y bienestar, y #11: Ciudades y comunidades sostenibles. De acuerdo con el Ministerio del Ambiente del Ecuador, solo en el área rural el 48% cuenta con este servicio (INEC, 2016), demostrando la alta vulnerabilidad de dichos sectores.

No obstante, los servicios de potabilización de agua requieren una cantidad considerable de energía. En locaciones urbanas, esta energía puede provenir de la red, sin embargo, el acceso es más complicado para locaciones rurales alejadas de la red eléctrica nacional. Por ello, los sistemas de energía renovable son una alternativa para proveer electricidad a las comunidades aisladas. Dado el bajo porcentaje del área rural que cuenta con servicios de potabilización, se presenta la necesidad por hacer frente al problema energético de estas locaciones, al considerar las energías renovables como posibles soluciones de abastecimiento energético, permitiendo reducir un impacto ambiental y cumpliendo además con el ODS #7: “Energía asequible y no contaminante”.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar una planta potabilizadora de agua abastecida por un sistema solar fotovoltaico para locaciones rurales.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Diseñar el sistema de captación y potabilización de agua que asegure la cantidad de agua necesaria para abastecer a la comunidad, considerando proyecciones de crecimiento poblacional.

2. Obtener la demanda energética de la planta potabilizadora de agua para cada año de operación.
3. Dimensionar el sistema solar fotovoltaico para la planta mediante el uso de Homer Pro, considerando el menor excedente energético e impacto ambiental.
4. Determinar el coste energético de la planta para la producción de agua potable.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Situación de la región

La comunidad de Pile es un sector situado al sur de la provincia de Manabí, perteneciente a la parroquia Montecristi y localizado al pie de una serie de colinas que dan forma a su límite geográfico, a 65 msnm. Las coordenadas de acuerdo con el sistema de coordenadas UTM es: 31N 4665088975442. (Limberg, 2010)



Figura 1.1 Ubicación geográfica de la comunidad de Pile

En la actualidad, la población de este sitio está adscrita al grupo étnico cholo. Sus principales fuentes de ingresos son la elaboración de sombreros de paja toquilla, agricultura y pesca. La comunidad presenta un bajo grado de asistencia de salud pública, educación y falencias respecto a los servicios básicos, tal como agua potable, alcantarillado, conexión a telefonía fija o celular, dado que se encuentra lejana de la cabecera

cantonal(Definitivo, 1931). El salario básico promedio de los residentes es \$50 al mes debido a que requieren de 3 a 4 meses para fabricar uno de estos sombreros, que en promedio son vendidos a \$200 c/u. (Toro, 2016)

En el año 2010 se realizó un estudio en el sector para el diseño y mejoramiento del sistema de abastecimiento de agua de pozo. Se determinó que la comunidad de Pile obtenía el suministro de agua a través de un pozo ubicado dentro de la comunidad con una profundidad de 45 metros y una columna de agua de 37,5 metros y 30 centímetros de diámetro. Para la respectiva distribución del agua, el pozo contó con una bomba sumergible que entregaba un caudal de 2,36 litros por segundo, llevando el agua hasta 2 tanques de reserva construidos con hormigón armado de 17 metros cúbicos cada uno, ubicados 50 metros por encima del pueblo. Posteriormente, mediante una red de distribución compuesta por tuberías de PVC, transportaban el agua desde el pozo hasta un número específico de viviendas y grifos públicos.

1.4.2 Estado de arte

El uso de la energía solar para abastecer el consumo en plantas potabilizadoras de agua ha sido analizado en la literatura. La problemática ha sido abordada desde un punto de vista académico, así como una necesidad a resolver en comunidades aisladas. En Cuba se hizo uso de la energía solar para la desinfección del agua de escuelas primarias en comunidades con ausencia de red eléctrica, demostrando la viabilidad del sistema al solo requerir 10 Wh/día y aprovechando el sistema de paneles solares existentes, lo cual permitió obtener agua limpia con un sistema de fácil operación y montaje, pudiendo purificar el agua sin necesidad de una etapa de cloración (Sarmiento et al.,2003). Por otro lado, García Garnica et al. (2018) realizó un estudio de viabilidad técnica-económica, donde se determinó que el uso de energía solar para abastecimiento de las luminarias de la planta es técnicamente viable, sin embargo, no lo es económicamente, ya que el sistema tiene un alto costo inicial y un bajo retorno, especialmente si se hace uso durante la noche, ya que se debe

almacenar una gran cantidad de energía, lo que implica gran inversión en baterías y constantes reinversiones para reemplazarlas. Finalmente, Rodríguez dimensionó un sistema de paneles solares para una planta potable de agua con fines académicos, donde concluyó que la planta diseñada tenía una autonomía de hasta 8 horas sin necesidad de una fuente externa, más que la energía almacenada por los paneles en las baterías y un descargue de hasta un 50%. (RODRÍGUEZ, 1995)

Todos los estudios citados demostraron que, el uso de un sistema energético solo se ve justificado para comunidades que no tengan red eléctrica, teniendo así una viabilidad técnica. Sin embargo, desde el punto de vista económico este no resulta viable en sectores urbanos.

1.4.3 Calidad de agua

La calidad del agua es un término utilizado para describir las características químicas, físicas y biológicas presentes en el agua. La norma INEN 1108 (INEN, 2014) especifica diversos parámetros medibles en el agua que permiten conocer el estado actual de su calidad. Así mismo, provee los límites permisibles para cada uno de estos parámetros.

Los parámetros físicos del agua tienen diferentes unidades de medición. La turbidez se mide en NTU, una medida de cantidad de sólidos suspendidos por unidad de volumen de agua; generalmente, 1 mg/L (ppm) equivale a 3 NTU. Por otro lado, el color se mide en unidades de platino-cobalto, el cual representa el resultado de disolver un mg de Pt en un L de agua. Los demás parámetros físicos y químicos se miden en mg/L, mientras que para la medición de coliformes totales y fecales se recomienda el uso del método NMP en 5 tubos de ensayo de 20 cm³ o 10 tubos de 10 cm³. (CPE INEN 5, 1992)

1.4.4 Plantas potabilizadoras de agua

Se denomina planta potabilizadora de agua (PPA) al conjunto de estructuras en las que el agua es tratada con el fin de que esta se vuelva

apta para el consumo humano. Estas estructuras dependerán de la calidad de agua cruda y la fuente de donde proviene. Las etapas más comunes en una PPA son:

Coagulación: La coagulación es el proceso encargado de la remoción de coloidales, las principales partículas responsables de la turbiedad. Para ello, es necesario agregar un producto químico denominado coagulante, que se encargará de neutralizar las fuerzas de separación de las impurezas, agrupándolas y facilitando su sedimentación. (Cabrera et al., 2019)

La coagulación por sales orgánicas se produce principalmente por adsorción y barrido. En coagulación por adsorción la reacción es rápida y la presencia de coloides es alta, requiriendo una dosis baja de coagulante. En barrido, la reacción es lenta, presencia de coloides bajas y requiere una dosis mayor de coagulante. El proceso de coagulación depende del tipo de agua, cuya clasificación se muestra en la Tabla 1.1. (Lidia, 2004)

Tabla 1.1 Procesos de coagulación

Tipo	Concentración	Proceso (Lidia, 2004)
1	Alta turbiedad y alcalinidad	Fácil de coagular, se realiza por medio de absorción. Efectivo con pH de 5 a 7.
2	Alta turbiedad y baja alcalinidad	Requiere adicionar alcalinidad. pH de 5 a 7. Proceso por absorción.
3	Baja turbiedad y alta alcalinidad	Requiere altas dosis de coagulante. Puede necesitar ayudantes de coagulación.
4	Baja turbiedad y alcalinidad	Difícil de coagular. Proceso por barrido. Requiere adicionar alcalinidad.

La etapa encargada de la mezcla entre coagulante y agua se llama mezcla rápida y se da de forma hidráulica o mecánica. Los factores principales son el tiempo de retención del agua y el grado de mezcla. (Romero Rojas, 1999)

Floculación: Se denomina así al proceso de mezclado suave aplicado al agua para aumentar el tamaño de las aglomeraciones de impurezas,

produciendo flóculos y permitiendo una fácil precipitación (CONAGUA, 2009). El mezclado se puede realizar a través de medios hidráulicos o mecánicos. Para mejorar la resistencia en el flóculo se utilizan ayudantes de coagulación y una floculación gradual que reduzca el grado de mezcla progresivamente. (CPE INEN 5, 1992)

Sedimentación: Se conoce por sedimentación al proceso de remoción de partículas presentes por gravedad. El objetivo de esta etapa es clarificar el agua por remoción (clarificación), y disminuir la concentración de suspendidos (espesamiento)(Romero Rojas, 1999). El tipo de sedimentación dependerá de la concentración de sólidos y del tipo de partículas presentes, que pueden ser discretas (mantienen propiedades físicas constantes cuando se sedimentan) o floculantes (modifican sus propiedades físicas al adherirse a otras partículas) (Gómez Chaves et al., 2016). Los sedimentadores más comunes son de forma rectangular y flujo horizontal, cuyos parámetros de diseño se presentan en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Parámetros de un sedimentador

Parámetro	Descripción (Romero Rojas, 1999)
Carga superficial	Cantidad de volumen de agua tratada al día por unidad de metro cuadrado de sedimentador.
Velocidad de sedimentación	Velocidad a la que las partículas descienden.
Tiempo de retención	Tiempo en que el agua cruda se encuentra dentro del sedimentador.

Estos sedimentadores presentan cuatro zonas, apreciadas en la Ilustración 2 y enlistadas a continuación:

- Zona de entrada
- Zona de sedimentación
- Zona de lodos
- Zona de salida

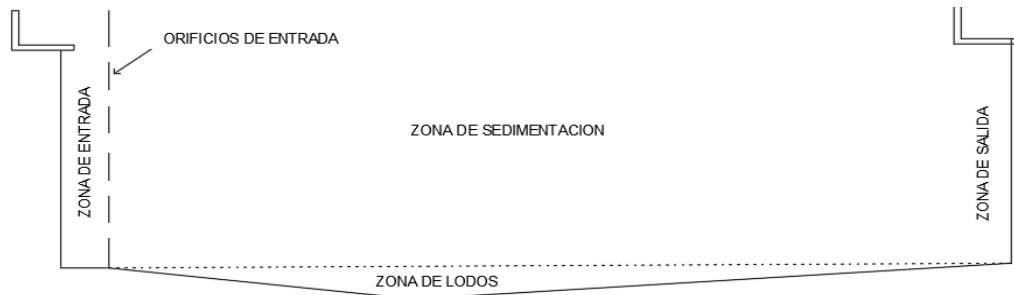


Figura 1.2 Zonas de un sedimentador

Filtración: La filtración es el último proceso de clarificación del agua. Aquí se busca remover sólidos suspendidos que no se hayan removido de los procesos anteriores, así mismo, ayuda a remover sólidos que son resistentes a la desinfección, lo que lo convierte en una etapa crítica de control de calidad de agua (RODRÍGUEZ, 1995). El mecanismo de remoción consiste en hacer pasar el agua través de un lecho poroso, generalmente arena, soportado por piedras debajo del cual hay un sistema de drenaje y de limpieza de filtros. Los filtros pueden ser lentos (4 m³/m²/día) o rápidos (120 m³/m²/día), o bien la filtración se puede dar por presión o caída libre (Lidia, 2004). Los principales parámetros que caracterizan un filtrador se resumen en la tabla 1.3:

Tabla 1.3 Parámetros de un filtro lento

Parámetro	Descripción (Romero Rojas, 1999)
Lecho filtrante	Lecho donde el agua pasa para ser filtrada
Velocidad de filtración	Volumen de agua filtrada por unidad de área de lecho filtrante
Velocidad de arrastre	Velocidad a la que partículas del lecho de arena son arrastradas.
Duración de carrera	Tiempo en que se deben lavar los filtros.

Desinfección: El objetivo de la desinfección es eliminar agentes microbiológicos que pueden producir enfermedades. Dado que los procesos anteriores no garantizan un 100% de remoción, esta es considerada una etapa crítica (RODRÍGUEZ, 1995). El cloro es el principal compuesto empleado, debido a su disponibilidad y bajo costo. Los factores que afectan a la eficiencia de esta etapa son el tiempo de contacto, la

temperatura y el pH (CONAGUA, 2009). Se recomienda que exista un valor de cloro residual en el agua luego de que se cumple el tiempo de contacto entre agua-cloro, esto con el fin de prevenir la aparición de nuevos coliformes mientras esta se mueve por la red de distribución. Los componentes básicos del sistema son báscula, válvulas y tuberías, clorador, inyector y difusor.

1.4.5 Sistema solar fotovoltaico

La energía electromagnética emitida por el sol se denomina radiación o energía solar. Esta radiación puede ser aprovechada como una conversión indirecta por medio del calor producido, o como una conversión directa al transformar la radiación solar en electricidad mediante el uso de celdas fotovoltaicas (Cimbala & Cengel, 2001)

Un sistema fotovoltaico consiste en un arreglo de celdas solares. Estos sistemas se clasifican en sistemas autónomos y conectados a la red. De manera general, una instalación solar fotovoltaica presenta el esquema mostrado en la Figura, el cual consiste en los siguientes equipos:

- Panel solar: Arreglo de celdas fotovoltaicas encargado de la producción de electricidad.
- Regulador de carga: Protege al sistema ante sobrecargas y fija una tensión nominal para el funcionamiento del sistema. Presente en sistemas aislados.
- Baterías: Acumulan la energía excedente del sistema y la proporcionan ante una insuficiente radiación solar. Presentes solo en instalaciones aisladas.
- Inversor: Encargado de convertir la corriente continua del sistema en corriente alterna.
- Carga: Representa el consumo que debe abastecer el sistema. Puede requerir corriente continua o alterna. (Días & Carmona, 2015)

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se expone la estrategia seguida para la selección de la mejor alternativa de solución correspondiente al funcionamiento de la PPA y su sistema de abastecimiento energético. Posteriormente, se explica de manera general el procedimiento para el dimensionamiento de las etapas del proceso de potabilización en base a requerimientos de diseño obtenidos de normas y manuales. Finalmente, se hace énfasis en la metodología utilizada para el cálculo del consumo energético de la planta y el diseño del perfil de carga respecto a cada año de operación, los cuales permitirán dimensionar el sistema energético de la planta mediante simulaciones realizadas en una herramienta computacional de prefactibilidad para determinar el coste energético de la producción de agua potable en la comunidad.

2.1 Diseño conceptual

La metodología que se ha utilizado para la selección de la mejor alternativa fue el Proceso Analítico Jerárquico, definido como metodología AHP, por sus siglas en inglés.

2.1.1 Requerimientos de diseño

La planta potabilizadora consideró las etapas de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y cloración; además de las etapas de captación de agua cruda y distribución de agua potable. El consumo energético requerido por los equipos que componen la planta fue abastecido mediante un sistema de paneles fotovoltaicos para aprovechar el recurso solar presente en el sector. Considerando los objetivos del proyecto y las recomendaciones de la norma ecuatoriana INEN, los principales requisitos de diseño fueron:

1. Proveer agua para consumo humano de acuerdo con los valores establecidos por la norma INEN 1108.
2. Diseñar la planta considerando las planificaciones regionales referente a la expansión urbanística del sector a atender.

3. Aprovechar el recurso solar mediante la aplicación de paneles fotovoltaicos para abastecer el consumo energético de la planta.
4. Dimensionar un sistema solar fotovoltaico considerando el menor excedente energético posible y reduciendo la cantidad de emisiones.

2.1.2 Criterios de diseño

En la siguiente tabla se indican los principales criterios seleccionados para el análisis del proyecto y selección de las alternativas de solución:

Tabla 2.1 Criterios de diseño

Criterio	Descripción
Inversión inicial	Cantidad de dinero necesaria para la construcción del sistema.
Costos de operación	Costos relacionados con abastecimiento energético, reparaciones, sueldos, entre otros.
Mantenimiento	Medición de la facilidad con la que se puede reparar y reemplazar los equipos en la planta.
Emisiones	Producción de los gases de efecto invernadero debido al funcionamiento del sistema.
Exceso de energía	Representa la fracción de energía obtenida del sistema fotovoltaico que no es aprovechada por la planta.
Fiabilidad	Probabilidad de que la planta entregue la cantidad de agua potable requerida por la comunidad en cada año.

2.1.3 Alternativas de solución

Considerando los criterios y requerimientos de diseño establecidos previamente, se determinaron tres alternativas de solución:

Tabla 2.2 Alternativas de solución

Solución A: PPA 24H-ON
Planta potabilizadora de agua con un funcionamiento de 24 horas diarias. El consumo energético es abastecido mediante un sistema de potencia híbrido: paneles solares y conexión a la red.
Solución B: PPA 12H-ON
Planta potabilizadora con un funcionamiento de 12 horas diarias para potabilización. El consumo energético es abastecido mediante un sistema de potencia híbrido: paneles solares y conexión a la red.
Solución C: PPA 12H-OFF
Planta potabilizadora con un funcionamiento de 12 horas diarias para potabilización. El consumo energético es abastecido mediante un sistema de potencia autónomo: paneles solares y baterías.

2.1.4 Selección de la solución

Para la aplicación de la metodología AHP se utilizó el software SUPER DECISIONS, programa gratuito desarrollado por Creative Decisions Foundation (CDF). Las ponderaciones o pesos de los criterios definidos se realizaron mediante comparaciones pareadas entre ellos. Esta comparación se basó en la escala creada por Thomas L. Saaty, cuya descripción se muestra en la Tabla 2.3. En el Anexo Apéndice A se presenta el proceso de la simulación.

Tabla 2.3 Escala de valor para AHP

Escala	Descripción
1	Igual de importante
3	Moderadamente más importante
5	Fuertemente más importante
7	Muy fuertemente más importante
9	Extremadamente más importante

Se realizó las comparaciones pareadas entre los criterios de diseño para obtener sus respectivos pesos, que se presentan en la Tabla 2.4 con sus respectivas interpretaciones.

Tabla 2.4 Ponderación de los criterios

Criterio	Peso	Peso por alternativa
Inversión inicial (C1)	0.08	Mayor escala representa una menor inversión a realizar
Costos de operación (C2)	0.13	Mayor escala representa menores costos de operación de la planta
Mantenimiento (C3)	0.19	Mayor escala representa una mayor facilidad para realizar mantenimiento.
Emisiones (C4)	0.29	Mayor escala representa una menor producción de emisiones.
Exceso de energía (C5)	0.27	Mayor escala representa un menor exceso de energía generado.
Fiabilidad (C6)	0.04	Mayor escala representa mayor probabilidad de un funcionamiento correcto.

Después, se realizó las comparaciones pareadas entre las alternativas considerando cada uno de los criterios de diseño. En la Tabla 2.5 se adjuntaron los pesos obtenidos de cada alternativa y el peso global.

Tabla 2.5 Matriz de decisión

Criterios	Solución A	Solución B	Solución C
C1	0.65	0.27	0.08
C2	0.11	0.19	0.70
C3	0.09	0.27	0.64
C4	0.05	0.15	0.80
C5	0.28	0.66	0.06
C6	0.48	0.48	0.04
Peso Global	19 %	34 %	47 %

De acuerdo con los pesos globales, la mejor alternativa para el sistema fue la Solución C, que consistió en una PPA abastecida por un sistema solar fotovoltaico autónomo, con una operación de 12 horas diarias. Sin embargo, para el proyecto se realizaron los diseños de una PPA para 24 y 12 horas diarias de funcionamiento, dimensionando el sistema fotovoltaico para cada caso. Esto con el fin de asegurar que la Solución C es la adecuada para abastecer a las comunidades rurales.

2.2 Diseño preliminar

2.2.1 Diseño del sistema de potabilización

La Figura 2.1 muestra el esquema en que se basó el diseño de la PPA para ambos casos de planta. Primero se realiza la captación del agua cruda desde el pozo hasta la planta de tratamiento. El proceso de potabilización iniciaría con la etapa de mezcla rápida donde el agua entraría en contacto con el coagulante, luego pasaría a la etapa de floculación que se encargaría de formar los flóculos y estos serían acumulados en la etapa de sedimentación para luego ser retirados en forma de lodos cada cierto tiempo. El agua ya sedimentada pasaría a la etapa de filtración para remover cualquier otro remanente a través de una serie de filtros, los cuales se limpiarían al final del día utilizando parte del agua filtrada que luego sería drenada. Posteriormente, el agua llegaría a la etapa de cloración donde se suministraría un agente de desinfección para eliminar la presencia de coliformes finalizando el proceso de tratamiento, para luego ser transportada hacia los tanques encargados de la distribución.

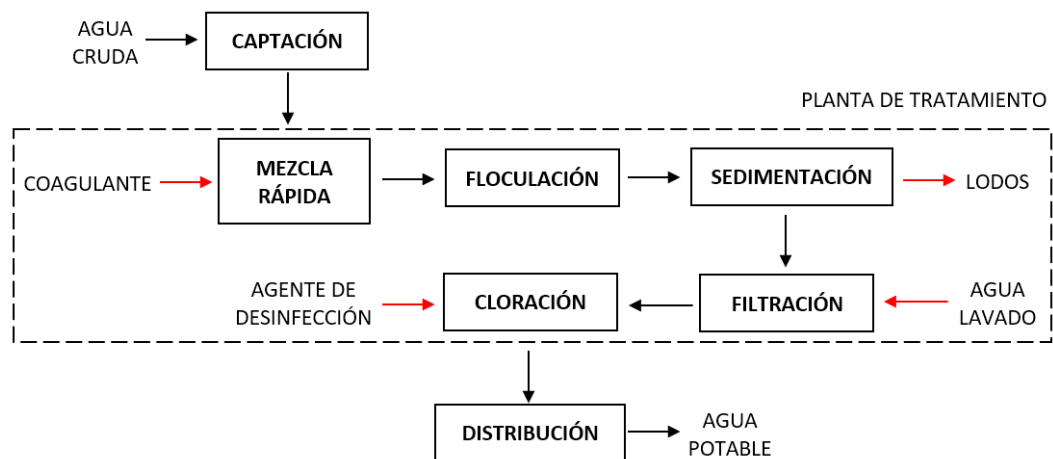


Figura 2.1 Esquema del proceso para la PPA

2.2.2 Diseño del sistema solar fotovoltaico

Se propusieron dos configuraciones encargadas de suministrar electricidad a la planta. La primera configuración, cuyo esquema se visualiza en la Figura 2.2, consistió en un sistema autónomo, el cual presenta un arreglo de paneles con un sistema de baterías, un controlador encargado de

regular el sistema y un inversor para convertir la corriente DC de paneles y baterías en AC. Para la segunda configuración, mostrada en la Figura 2.3, se consideró un sistema fotovoltaico conectado a la red que reemplaza las baterías y un regulador por un suministro energético mediante la red.

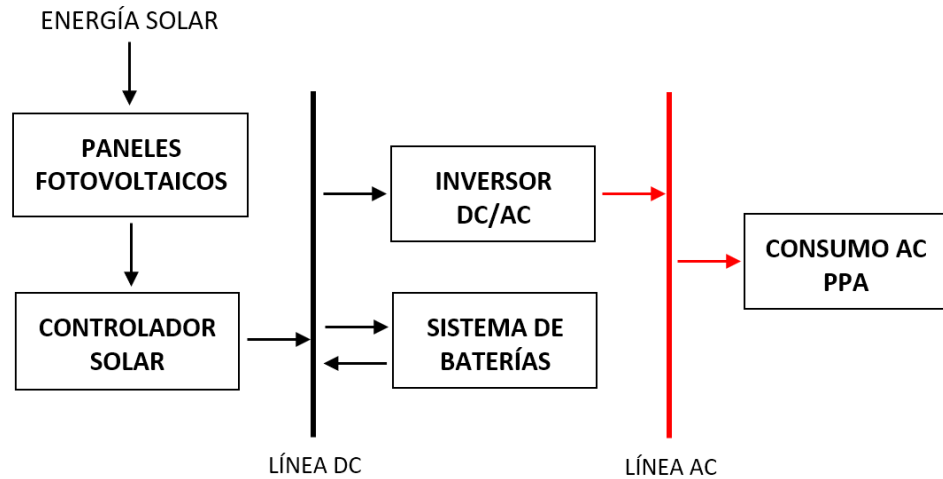


Figura 2.2 Esquema del sistema fotovoltaico autónomo

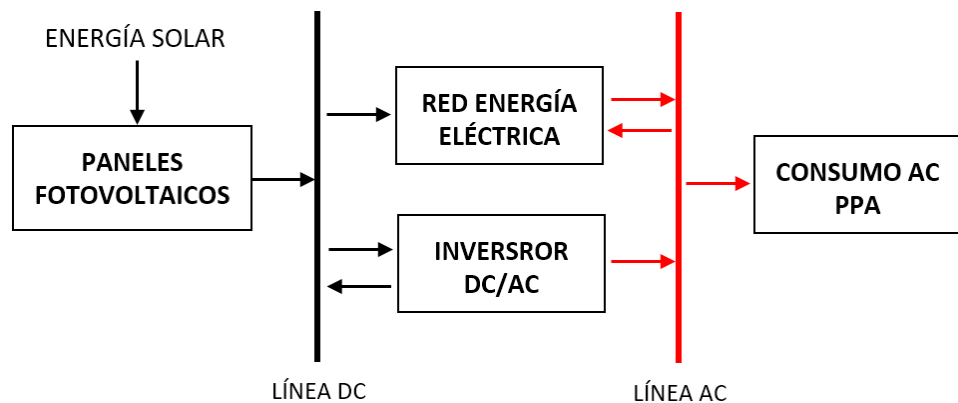


Figura 2.3 Esquema del sistema fotovoltaico conectado a la red

2.3 Diseño detallado de la PPA

El dimensionamiento de la planta para ambos casos partió considerando parámetros iniciales de diseño, haciendo uso del capítulo quinto de la norma INEN CPE-5 parte 1. (CPE INEN 5, 1992). El principal requerimiento para el dimensionamiento de las etapas fue el caudal de diseño, el cual dependía de la dotación, la población a abastecer y el tiempo diario de operación de la

planta (12 y 24 horas). Además, se escogió un periodo de funcionamiento de la planta de 15 años. Cada uno de estos valores fueron obtenidos considerando recomendaciones de la norma.

Para el diseño de las etapas en ambos casos se utilizó el caudal calculado para el último año de operación, con el fin de asegurar el abastecimiento para el año con mayor demanda de agua. No obstante, el caudal obtenido para cada PPA fue utilizado en los otros años de operación, permitiendo un proceso de caudal fijo durante el tiempo de vida útil de cada planta y obteniendo menores horas de funcionamiento para cada año.

Para mezcla rápida se dimensionó un mezclador hidráulico de tipo canaleta Parshall debido al bajo caudal de diseño. El coagulante seleccionado fue sulfato de aluminio y la dosis óptima se determinó considerando la dureza y alcalinidad del agua a tratar. En la etapa de floculación se aplicó un floculador hidráulico horizontal y para la sedimentación se calcularon las dimensiones de un tanque sedimentador de flujo horizontal. Para la siguiente etapa, se consideró un proceso de filtración rápida y una limpieza diaria de los filtros al finalizar el proceso de potabilización, utilizando parte del agua dirigida hacia la etapa de desinfección. En la última etapa se determinaron las dimensiones del tanque de cloración. El agente de desinfección seleccionado fue hipoclorito de calcio y su dosis se obtuvo considerando la cantidad de coliformes en el agua. Por último, se determinaron las dimensiones necesarias para el tanque de acumulación de agua cruda. El proceso de diseño de la PPA se muestra en el Apéndice B.

2.4 Consumo energético de la PPA

La demanda energética diaria para ambos casos de PPA estaba representada por el consumo base, proceso de potabilización y lavado de filtros. El consumo base correspondió al gasto energético de iluminación, controladores, sistemas auxiliares, entre otros; que fue calculado como un porcentaje de la demanda energética total para cada PPA. Este valor fue constante durante el tiempo de vida útil de la planta y se presentaba las 24 horas al día. Para el proceso de

potabilización se consideró el gasto energético del sistema hidráulico presente en la planta, constituido por una serie de tuberías, bombas y accesorios. Las horas de consumo dependían de la demanda anual de agua. Con respecto al lavado de filtros, se consideró la energía necesaria para almacenar agua filtrada (consumo de llenado) y para su posterior transporte hacia los filtros y drenaje (consumo de lavado). El tiempo de llenado dependió del caudal de diseño de la planta, mientras que el tiempo de lavado consideraba el tipo de filtros seleccionado. Para facilidad de identificación de los equipos que componen el sistema hidráulico se detallaron los tramos de la planta como se presenta a continuación.

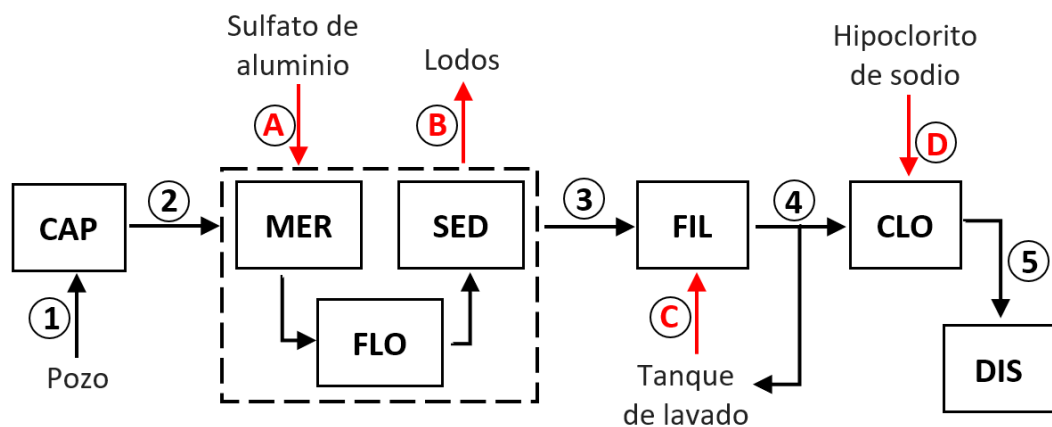


Figura 2.4 Tramos del sistema hidráulico de la PPA

Tabla 2.6 Detalle de los tramos del sistema hidráulico

Tramo	Detalle
1	Bombeo del agua cruda desde el pozo hacia el tanque de almacenamiento (CAP)
2	Transporte del agua cruda por acción de la gravedad desde el tanque de almacenamiento a mezcla rápida (MER), floculación (FLO), sedimentación (SED).
3	Bombeo del agua sedimentada hacia la etapa de filtración (FIL).
4	Bombeo del agua filtrada hacia la etapa de cloración (CLO) y hacia el tanque de almacenamiento para lavado de filtros.
5	Bombeo de agua potable a los tanques de distribución.
A	Dosificación del sulfato de aluminio hacia la canaleta Parshall.
B	Drenaje de los lodos.
C	Bombeo del agua filtrada hacia los filtros para su lavado.
D	Dosificación del hipoclorito de sodio hacia el tanque de cloración.

Para determinar el consumo energético del sistema hidráulico fue necesario calcular el caudal y cabezal teórico de cada bomba utilizada. El caudal dependió del fluido a transportar, mientras que para el cabezal teórico se requirió conocer el tipo de tubería y los accesorios por tramo. Las tuberías utilizadas para todos los tramos fueron de acero comercial API-5L, excepto para el hipoclorito de calcio y sulfato de aluminio donde se utilizó acero inoxidable tipo 304. Los diámetros de las tuberías se calcularon considerando los caudales de diseño y las velocidades recomendadas para cada tramo. (Romero Rojas, 1999). En relación con los accesorios, fue necesario calcular la longitud equivalente de cada uno haciendo uso del método gráfico de Crane (Crane, 1979), véase gráfica en el Apéndice C. Se aplicó el software Engineering Equation Solver (EES) como un facilitador para resolver el sistema de ecuaciones, que permitió determinar los parámetros teóricos de los equipos y su consumo nominal. Además, mediante EES se calcularon las horas de consumo requeridas para el llenado y el proceso de potabilización, este último varió durante cada año de operación. En el Apéndice D se muestra el código que fue desarrollado para el proyecto.

2.5 Sistema de suministro energético

Las configuraciones consideradas para suministrar energía a ambos casos de la PPA fueron un sistema fotovoltaico autónomo (SPV-OFF) y un sistema fotovoltaico conectado a la red (SPV-ON). Ambos se dimensionaron a través de simulaciones realizadas en el software Homer Pro.

2.5.1 Condiciones climáticas

La comunidad de Pile se caracteriza por tener un clima semiárido y cálido, con una temporada lluviosa moderada y precipitaciones intensas pero breves, siendo predominante el clima seco. De acuerdo con la clasificación de Köppen-Geiger, este clima pertenece al grupo BSh. (BHs, 2020). Anualmente, el sector presenta una temperatura promedio de 24.6 °C y una radiación global horizontal de aproximadamente 4.91 kWh/m²/día. En la Figura 2.5 se muestra la radiación solar y temperatura promedio de cada

mes a lo largo de un año, cuyos valores fueron obtenidos a través de Meteororm. (Alfaro et al., 2010)

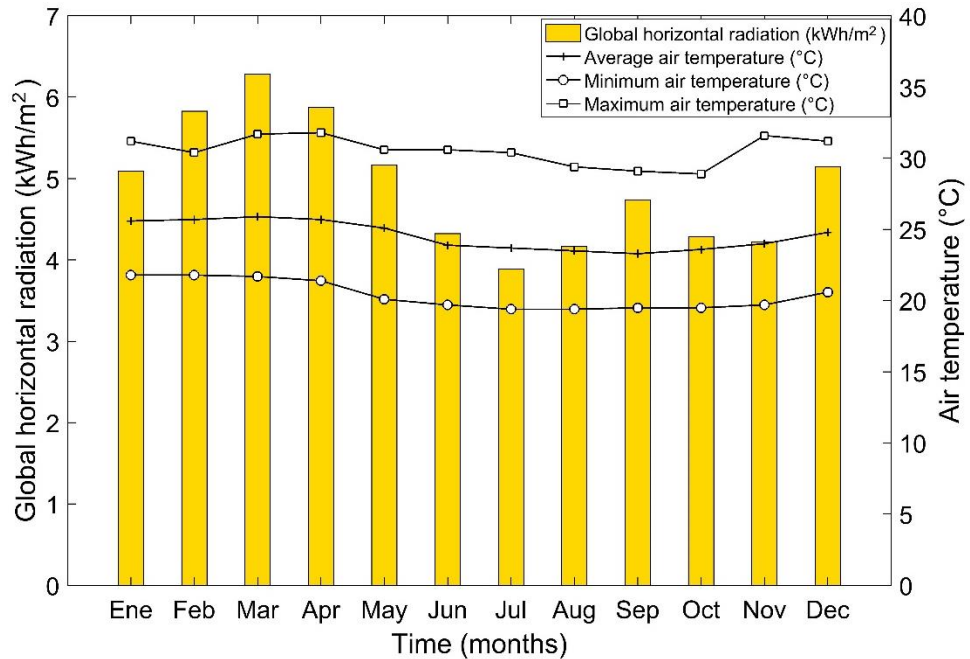


Figura 2.5 Condiciones climáticas en la comunidad de Pile

2.5.2 Perfil de carga

El consumo energético que se requirió abastecer se introdujo en el sistema mediante un perfil de carga que indicaba el kWh diario durante los 365 días del año de operación de la planta. Para cada PPA considerada se ingresó el perfil de carga del último año de operación, dado que el sistema fotovoltaico debió dimensionarse estimando la mayor demanda energética. Este perfil se determinó mediante los cálculos de demanda y horas de consumo realizados en el EES. A cada perfil de carga ingresado se le asignó un aumento de consumo del 5%. Además, para la PPA de 12 h se ingresaron tres diferentes perfiles de carga, con el fin de analizar el comportamiento del sistema fotovoltaico al modificar el horario de operación de la planta. En el primer perfil el proceso de potabilización iniciaba a las 6:00 am hasta las 6:00 pm, en el segundo perfil a las 12:00 pm hasta las 0:00 am y en el tercero a las 6:00 pm hasta las 6:00 am durante el último año de operación, véase los esquemas del perfil de carga en el capítulo 3 figuras 3.5 – 3.7.

2.5.3 Modelamiento en Homer Pro

El sistema fotovoltaico propuesto para abastecer la planta potabilizadora fue dimensionado mediante la aplicación de la herramienta computacional Homer Pro. El software se encargó de dimensionar a través de simulaciones el sistema fotovoltaico aislado para cada uno de los perfiles de carga ingresados al software, con el fin de obtener el sistema más económico en cada escenario planteado. Además, se dimensionó un sistema fotovoltaico conectado a la red para el primer escenario del perfil de carga de 12h y para el perfil de carga de 24h. Esta herramienta simula el funcionamiento del sistema energético propuesto a través de cálculos de balances energéticos, comparando la demanda eléctrica y la energía que el sistema pueda suministrar en cada paso de tiempo. Las principales ecuaciones que el software utiliza se detallan a continuación:

Potencia de salida del arreglo de paneles solares. El cálculo de la potencia de salida (P_{PV}) para diseñar el sistema de paneles se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$P_{PV} = Yf \left(\frac{G_T}{G_{Tsc}} \right) \left(1 + \alpha_p (T_C - T_{C,sc}) \right) \quad (2.1)$$

Donde Y es la capacidad nominal del arreglo de paneles bajo condiciones estándar (kW), f es el factor de reducción acorde con la ubicación, G_T es la radiación solar incidente en el arreglo de paneles (kW/m²), mientras que G_{Tsc} se la considera para condiciones estándar igual a 1, α_p es el coeficiente de temperatura de potencia (%/°C), T_C y $T_{C,sc}$ representan la temperatura de celda del panel para cada tiempo y bajo condiciones estándar (°C).

Sistema de almacenamiento de baterías (BESS). La máxima potencia que puede acumularse (P_{a-BESS}) y descargarse (P_{d-BESS}) en la batería para cada paso de tiempo pueden ser calculadas por las expresiones:

$$P_{a-BESS} = \frac{-kcQ_{max} + kQ_1 e^{-k\Delta t} + Qkc(1 - e^{-k\Delta t})}{1 - e^{-k\Delta t} + c(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})} \quad (2.2)$$

$$P_{a-BESS} = \frac{kQ_1 e^{-k\Delta t} + Qkc(1 - e^{-k\Delta t})}{1 - e^{-k\Delta t} + c(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})} \quad (2.3)$$

Donde k es una tasa constante, c es la tasa de capacidad, Q_{max} es la capacidad máxima teórica de almacenamiento (kWh), Q_1 es la energía disponible (kWh) y Q es la cantidad de energía almacenada para cada paso de tiempo (kWh).

Costo presente neto (NPC). NPC determina el sistema de potencia óptimo, calculado a través de la siguiente ecuación:

$$NPC = \frac{(i(1+i)^N - 1)C_{anu}}{i(1+i)^N} \quad (2.4)$$

Donde i es la tasa de descuento real, N es el número de años de vida del proyecto y C_{anu} es el costo anualizado total del sistema, el cual está dado por la siguiente ecuación:

$$C_{anu} = C_{anu,cap} + C_{anu,rep} + C_{anu,O\&M} - R_{anu,salv} \quad (2.5)$$

Donde $C_{anu,cap}$ es el costo de capital anualizado, $C_{anu,rep}$ es el costo de reemplazo, $C_{anu,O\&M}$ es el costo de operación y mantenimiento y $R_{anu,salv}$ representa el costo anualizado de retorno. Cada término de la ecuación considera los costos totales de forma anualizada.

Costo de energía (COE). Representa el costo promedio de la electricidad por kWh producido en el sistema.

$$COE = \frac{C_{anu}}{E_a} \quad (2.6)$$

Donde E_a es la energía total anualizada que representa la carga (kWh).

Fracción renovable: Representa la fracción de la energía renovable usada para abastecer la carga.

$$FR = 1 - \frac{E_{gen}}{E_a} \quad (2.7)$$

Donde E_{gen} es la energía anual proveniente de recursos no renovables (kWh) aplicada a la carga.

2.5.4 Datos de entrada del sistema

Los datos de entrada de cada uno de los equipos que componen las configuraciones de los sistemas de suministro energético se detallan a continuación. Los costos estimados de los equipos obtenidos del mercado exterior se aumentaron en un 50%, considerando los precios en el mercado de Ecuador.

- **Precios de venta y compra de energía de red.** Los precios de compra y venta de energía tuvieron los mismos valores para este proyecto. Los precios dependían del horario y se obtuvieron del sistema eléctrico ecuatoriano, los cuales se muestran en la Tabla 2.7. Las emisiones generadas por el uso de red fueron 0.351 kgCO₂/kWh. (Ramirez et al., 2020)

Tabla 2.7 Costos de precios de energía proveniente de la red

Días	Hora	Costo (USD\$/kWh)	Demanda (USD\$/kW-mes)
Lunes a domingo	08:00 – 18:00	0.056	2.62
	22:00 – 08:00	0.045	
Lunes a viernes	18:00 – 22:00	0.095	
Sábado y domingo	18:00 – 22:00	0.056	

- **Paneles fotovoltaicos.** El panel utilizado fue tipo monocristalino con una eficiencia de 20.3% en condiciones estándar. El efecto de la temperatura fue considerado igual a -0.35%/°C. Se estimó un factor de reducción de 95% para el primer año que se redujo anualmente 0.55% para considerar la degradación del panel, cuyo tiempo de vida fue de 25 años. Se utilizó un panel de 0.45 kW con un costo de capital de USD 340 y un nulo costo de mantenimiento.
- **BESS.** Se propusieron baterías estacionarias OPzS Solar con una capacidad de 3500 Ah y un voltaje de 2 V. El voltaje de cada sistema dependería del número de baterías utilizadas. Se consideró un estado

de carga mínimo de 20% para el BESS en las simulaciones. No requirió costes de mantenimiento, pero el costo de capital por batería fue USD 2,290; con el mismo valor en caso de reemplazo.

- **Inversor DC/AC.** Se seleccionó un convertor base de 6 kW con una eficiencia de 96%, un costo de capital y reemplazo igual a USD 5,670, libre de mantenimiento. La potencia total del convertor dependió de los requerimientos de cada sistema.
- **Regulador/controlador.** El costo de regulador/controlador fue \$20,000 para el SPV-OFF y de \$10,000 para SPV-ON. La estrategia usada en la simulación de ambas configuraciones fue “Carga Siguiendo” (LF).
- **Costos fijos.** Se estimó un costo de instalación de USD 15,000 para ambos sistemas, con una tasa de descuento del 6%.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentarán los resultados de la demanda de agua en la comunidad. Además, se detallarán las especificaciones de las etapas de la PPA, el consumo energético requerido y, por último, se expondrá el dimensionamiento de los sistemas de suministro energético considerados.

3.1 Demanda de agua de la comunidad

Para estimar la demanda de agua se consideró una dotación de 170 L/hab/día. El crecimiento poblacional fue estimado por el método aritmético. Los resultados obtenidos de demanda anual y diaria se presentan en la tabla 3.1:

Tabla 3.1 Dotación y población estimada.

Año	Población	Caudal diario [m ³ /día]	Caudal Planta 12h [l/s]	Caudal Planta 24h [l/s]
2021	1552	263.84	8.74	4.56
2022	1629	276.93	9.17	4.78
2023	1705	289.85	9.59	5.01
2024	1781	302.77	10.02	5.23
2025	1857	315.69	10.45	5.45
2026	1934	328.78	10.88	5.68
2027	2010	341.70	11.31	5.90
2028	2086	354.62	11.74	6.12
2029	2162	367.54	12.17	6.35
2030	2239	380.63	12.60	6.57
2031	2315	393.55	13.03	6.80
2032	2391	406.47	13.45	7.02
2033	2467	419.39	13.88	7.24
2034	2543	432.31	14.31	7.47
2035	2620	445.40	14.74	7.69

3.2 Planta potabilizadora de agua

Para el dimensionamiento de la PPA de 12 h se obtuvo un caudal de diseño igual a 14.8 l/s, mientras que para la PPA de 24 h el caudal estimado fue 7.7

l/s. Cada etapa detalla los resultados obtenidos considerando ambos horarios de funcionamiento.

Tanque de almacenamiento de agua cruda: Considerando la recomendación de la norma ecuatoriana, el tanque de almacenamiento debió ser igual a un 30% de la demanda por hora, siendo de 16.4 m³ para la planta de 12h y 8.32 para la de 24h.

Mezcla rápida: Se seleccionó como mezclador una canaleta de Parshall, cuyas dimensiones se tabulan y presentan en la siguiente tabla y figura:

Tabla 3.2 Dimensiones de canaleta de Parshall

Ancho W (m)	A (cm)	B (cm)	C (cm)	D (cm)	E (cm)	F (cm)	G (cm)	K (cm)	N (cm)
0.075	46.6	45.7	17.8	25.9	45.7	15.2	30.5	2.5	5.7

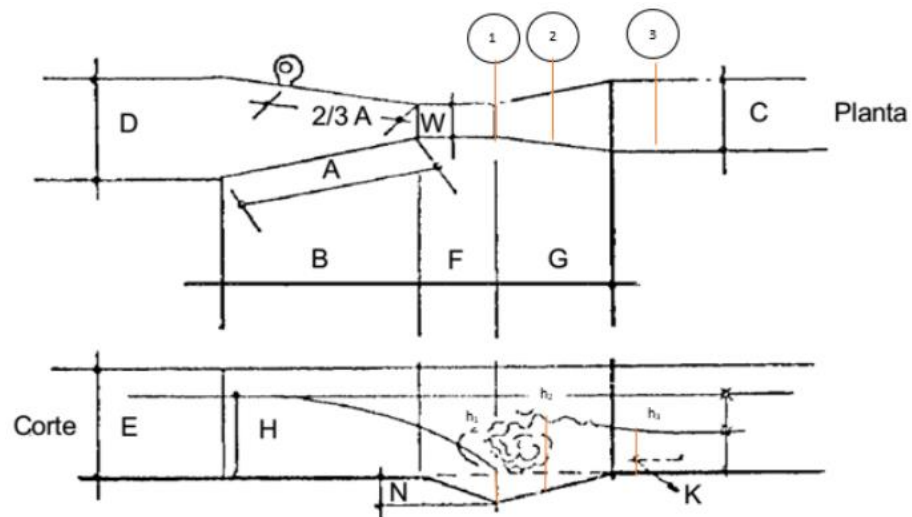


Figura 3.1 Canaleta de Parshall. (Ordinola Saavedra. 2019)

Tabla 3.3 Resultados de mezcla rápida.

Mezcla rápida			
Ecuación	Símbolo [unidades]	Planta 12h	Planta 24h
Dosis de Coagulante	[mg/L]	25	25
Tiempo de mezcla en el resalto	t [s]	0.483	0.532
Gradiente de velocidad	G [1/s]	1,129	1,159

Floculación: Se consideró una mezcla hidráulica mediante un floculador de flujo horizontal. Se diseñaron 3 tramos para el equipo, cuyas características se presentan en la Tabla 3.4. La Figura 3.2 muestra un esquema del equipo diseñado.

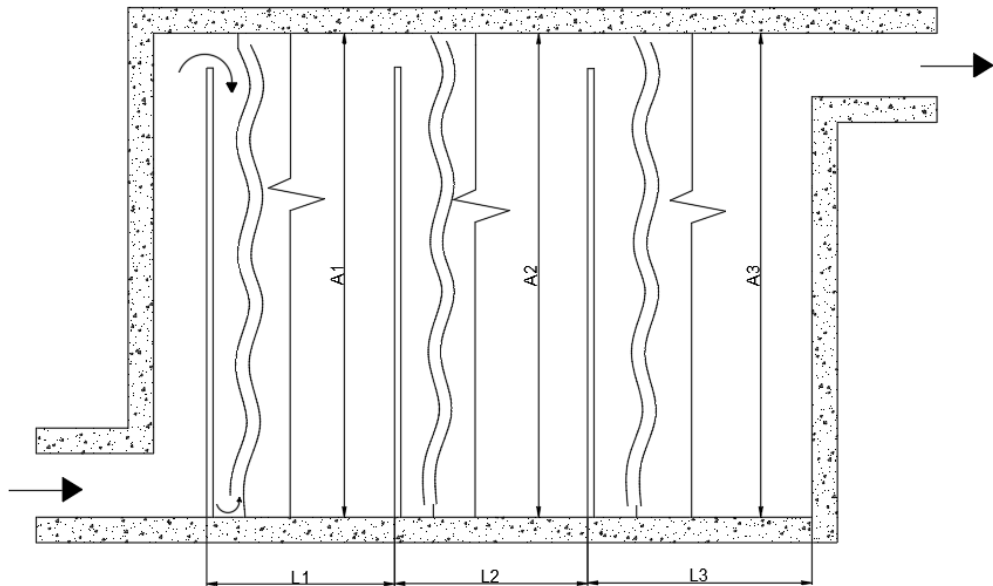


Figura 3.2 Vista superior floculadores

Tabla 3.4 Tramos de floculación.

PPA de 12h				
Ecuación	Símbolo [Unidades]	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3
Tiempo de retención	t [min]	7	7	6
Profundidad total	h [m]	1.3		
Volumen del tanque	Volumen [m ³]	6.30	6.30	5.40
Longitud efectiva del canal	A [m]	4.41	4.39	4.35
Número de canales	N [-]	24	19	11
Longitud total interior	L [m]	2.01	1.70	1.43
Gradiente de velocidad	G [1/s]	82.81	49.49	27.33
PPA de 24h				
Ecuación	Símbolo [Unidades]	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3
Tiempo de retención	t [min]	7	7	6
Profundidad total	h [m]	1.3		
Volumen del tanque	Volumen [m ³]	3.23	3.23	2.77
Longitud efectiva del canal	A [m]	4.41	4.39	4.35
Número de canales	N [-]	14	11	9
Longitud total interior	L [m]	1.1	1.1	1.17
Gradiente de velocidad	G [1/s]	35.9	24.7	20

Sedimentador: Se dimensionó un sedimentador de flujo horizontal. La velocidad de sedimentación igual a 7.155 m/s se obtuvo por extrapolación de la Figura A.14 del Apéndice C, para una concentración de sólidos de 1.678 g/l. Los resultados se muestran en la Tabla 3.5 y el esquema en la Figura 3.3:

Tabla 3.5 Resultados del sedimentador

Sedimentador			
Ecuación	Símbolo [unidades]	Planta 12h	Planta 24h
Carga superficial	U [m/d]	30.00	30.00
Área sedimentador	As [m ²]	20.9	11.1
Largo	L [m]	7.92	5.76
Ancho	B [m]	2.60	1.92
Altura	H [m]	5.01	2.5
Velocidad de sedimentación	Vs [m/s]	0.002	0.002
Altura máxima de la tolva	h [cm]	40	29

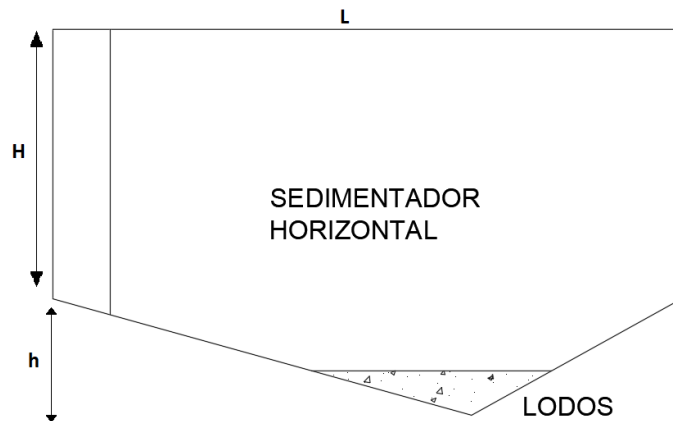


Figura 3.3 Corte transversal sedimentador de flujo horizontal

Filtro rápido: Las especificaciones del filtro se resumen en la siguiente tabla. Los cálculos consideran valores promedio en las propiedades de las capas filtrantes recomendados por la norma.

Tabla 3.6 Lecho de filtro seleccionado (CPE INEN 5. 1992)

Característica	Valor
Tamaño efectivo (TE)	0.2 mm
Coficiente de uniformidad (CU)	1.5
Dureza	7 (Mohr)

El lecho de grava se constituye de 3 capas de las siguientes características:

Tabla 3.7 Lecho de grava seleccionado. (CPE INEN 5. 1992)

Capa #	Diámetro [mm]	Espesor [m]
1	1.2	0.1
2	5	0.1
3	20	0.15

Los resultados se presentan en la Tabla 3.8, y el esquema básico puede visualizarse en la Figura 3.4.

Tabla 3.8 Resultados del filtro rápido

Tabla resumen de filtrador rápido			
Ecuación	Símbolo [Unidades]	Planta 12h	Planta 24h
Tasa de filtración	q [m/d]	120	120
Área de filtración	Af [m ²]	5.22	2.77
Medida de cada lado del área de filtración	A [m]	2.300	1.7
Velocidad de fluidización	v _b [m/s]	0.005	0.005
Caudal de lavado	Q _l [m ³ /s]	0.026	0.014
Alto de la unidad de filtración	H [m]	3	3
Alto de canaleta de lavado	h [m]	0.19	0.15
Tiempo de lavado	t [min]	24	24

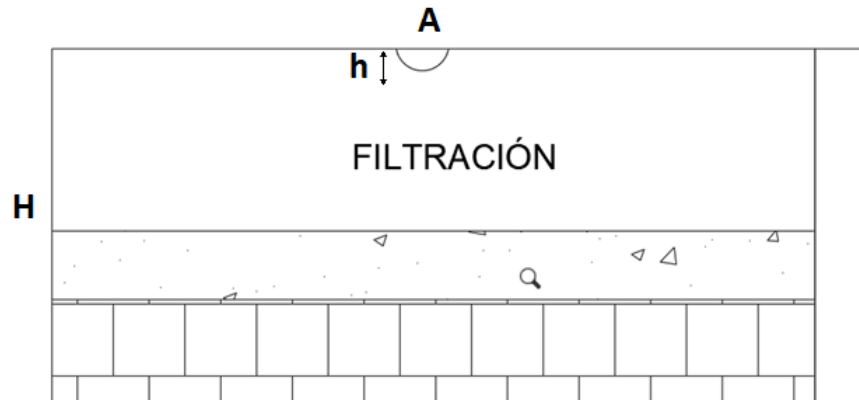


Figura 3.4 Corte transversal de filtro rápido

Desinfección: Aplicando las ecuaciones de dimensionamiento del tanque de cloración, se obtienen los resultados de la tabla 3.9:

Tabla 3.9 Resultados de cloración

Tabla resumen de tanque de contacto			
Ecuación	Símbolo [Unidades]	Planta 12h	Planta 24h
Concentración de cloro requerida	Ct [mg/L]	1.9	1.9
Cantidad de hipoclorito de cloro al día	C [kg/día]	1.7	0.90
Ecuación	Símbolo [Unidades]	Planta 12h	Planta 24h
Tiempo de contacto	t [min]	20	20
Volumen del tanque de contacto	V [m ³]	17.4	9.24
Diámetro del tanque de contacto	D [m]	2.77	2.35

3.3 Sistema hidráulico

Tuberías de los tramos: Considerando el caudal para cada tramo, se determina el diámetro comercial requerido:

Tabla 3.10 Diámetros de tuberías

Tramo	Nominación planta 12h	Nominación planta 24h
1	4" CED 40	3" CED 40
2	3" CED 40	2" CED 40
3	4" CED 40	3" CED 40
4	3" CED 40	2" CED 40
C	4" CED 40	3" CED 40
C'	4" CED 40	3" CED 40
5	3" CED 40	2" CED 40
D	½" CED 40	½" CED 40

Bombas: El sistema de bombeo se compone de una bomba dosificadora, tres bombas centrífugas y una bomba sumergible. Las potencias teóricas obtenidas, a través de EES, para la PPA de 12 h y 24 h se muestran en la Tabla 3.11. Las características de operación se encuentran en Apéndice B para la PPA de 12 h.

Tabla 3.11 Potencia requerida por las bombas de la PPA

Potencia requerida [hp]	BC-1	BC-4	BC-5	BC-C	BD-A
Planta 12h	8	1.5	21	3	0.12
Planta 24h	4	1	12	2	0.12

3.4 Demanda energética de la PPA

La demanda energética se compone de un consumo base, uno para el proceso de potabilización y un consumo para la limpieza de filtros; este último incluye un consumo debido al llenado del tanque de agua de lavado y el lavado de filtros. Los resultados del consumo por hora se presentan en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12 Consumo de la PPA

Tipo de consumo		Planta 12h	Planta 24h
Consumo base (kWh)		1.61	0.98
Consumo de potabilización (kWh)		22.83	12.79
Consumo de limpieza de filtros	Llenado (kWh)	7.17	3.98
	Lavado (kWh)	2.24	1.50

El consumo base está presente en la PPA durante las 24 horas diarias para ambas plantas. El consumo de limpieza con respecto al llenado tiene una duración de 19 y 18 minutos para las plantas de 24 y 12 horas respectivamente, mientras que el lavado tiene una duración de 20.5 minutos para ambos casos. La duración del proceso de potabilización depende de la demanda de agua a entregar, la cual varía durante cada año de operación de la planta, el consumo eléctrico para cada escenario se muestra en la tabla 3.13:

Tabla 3.13 Tiempo de operación de PPA por año

Año	Demanda anual de agua (m ³)	Tiempo para tratamiento (h)		Consumo eléctrico anual (kWh)	
		PPA 12h	PPA 24h	PPA 12h	PPA 24h
1	96,302	7.11	13.62	78,134	75,897
2	101,079	7.46	14.30	81,196	79,279
3	105,795	7.81	14.97	84,259	82,530
4	110,511	8.16	15.62	87,321	85,700
5	115,227	8.51	16.30	90,296	89,033
6	120,005	8.86	16.97	93,446	92,334
7	124,721	9.21	17.62	96,421	95,504
8	129,436	9.56	18.30	99,483	98,837
9	134,152	9.91	18.97	102,589	102,138
10	138,930	10.25	19.62	105,608	105,307
11	143,646	10.60	20.30	108,670	108,641
12	148,362	10.95	20.97	111,750	111,941
13	153,077	11.30	21.62	114,795	115,111
14	157,793	11.65	22.30	117,857	118,444
15	162,571	12.00	23.00	120,919	122,372

Los sistemas de abastecimiento energéticos fueron diseñados considerando el consumo del último año de operación de la PPA, por lo que fue necesario diseñar el perfil de carga para ese año. Para la PPA de 12h, se consideraron tres perfiles de carga con tres diferentes horarios de operación para el tratamiento del agua:

- **Escenario 1:** La carga se distribuye alrededor de las 12 pm.

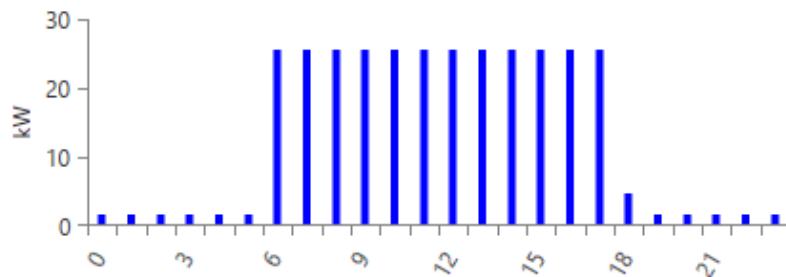


Figura 3.5 Escenario 1

- **Escenario 2:** El proceso de potabilización se realiza a partir de las 12 pm.

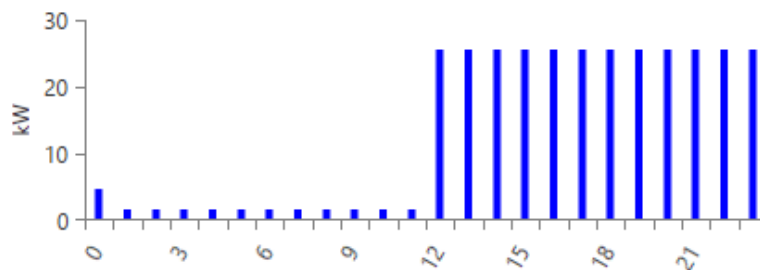


Figura 3.6 Escenario 2

- **Escenario 3:** La carga se distribuye alrededor de las 12 am.

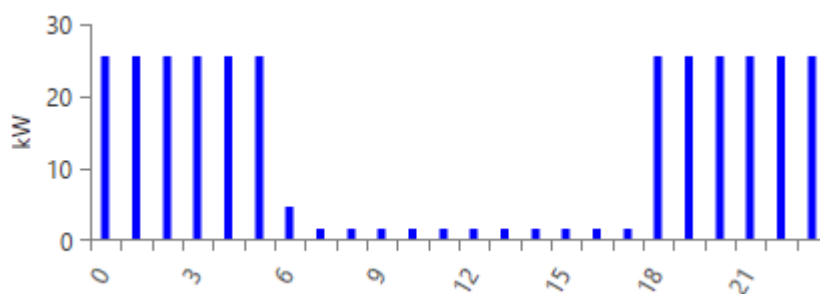


Figura 3.7 Escenario 3

No obstante, para la PPA de 24 H se obtuvo un perfil de consumo continuo que se visualiza en la Figura 3.8.

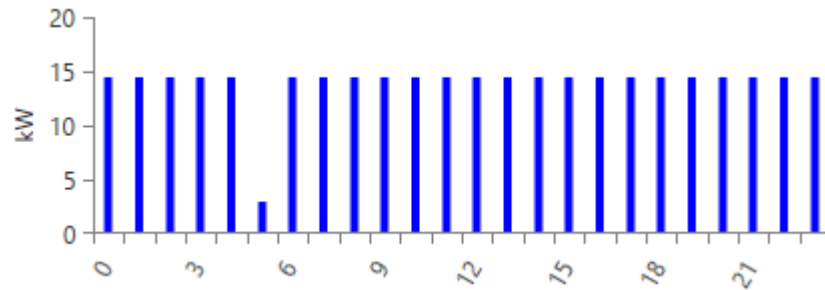


Figura 3.8 Escenario 24h

3.5 Sistema solar fotovoltaico autónomo (SPV-OFF)

Se simularon los sistemas fotovoltaicos considerando los escenarios detallados anteriormente en Homer Pro. La Tabla 3.14 muestra los resultados:

Tabla 3.14 Sistema energético para SPV-OFF

Parámetro	PPA 12h			PPA 24h
	SPV-OFF 1 ¹	SPV-OFF 2 ²	SPV-OFF 3 ³	SPV-OFF 4 ⁴
Sistema de paneles (kW)	138	150	136	155
Número de baterías	80	96	140	96
Autonomía (horas)	37.2	44.7	65.2	44.1
Vida de baterías (años)	30.8	16.2	14.0	16.5
Potencia del inversor (kW)	30	30	30	20
Fracción renovable (%)	100	100	100	100
Exceso de energía (%)	35.6	37.4	26.8	38.9
Energía no abastecida (%)	0.037	0.096	0.092	0.075
Emisiones anuales (kg CO ₂)	0.0	0.0	0.0	0.0

¹ SPV-OFF 1: Escenario de carga 1. ² SPV-OFF 2: Escenario de carga 2. ³ SPV-OFF 3: Escenario de carga 3. ⁴ SPV-OFF 4: Escenario de carga 24h.

En la Figura 3.9 se observa que el sistema del escenario 1 alcanzan un valor máximo diario de 39.4 kW. 75.6 % de la carga se abastece directamente de los paneles solares, mientras que 24.4 % requiere del uso de baterías.

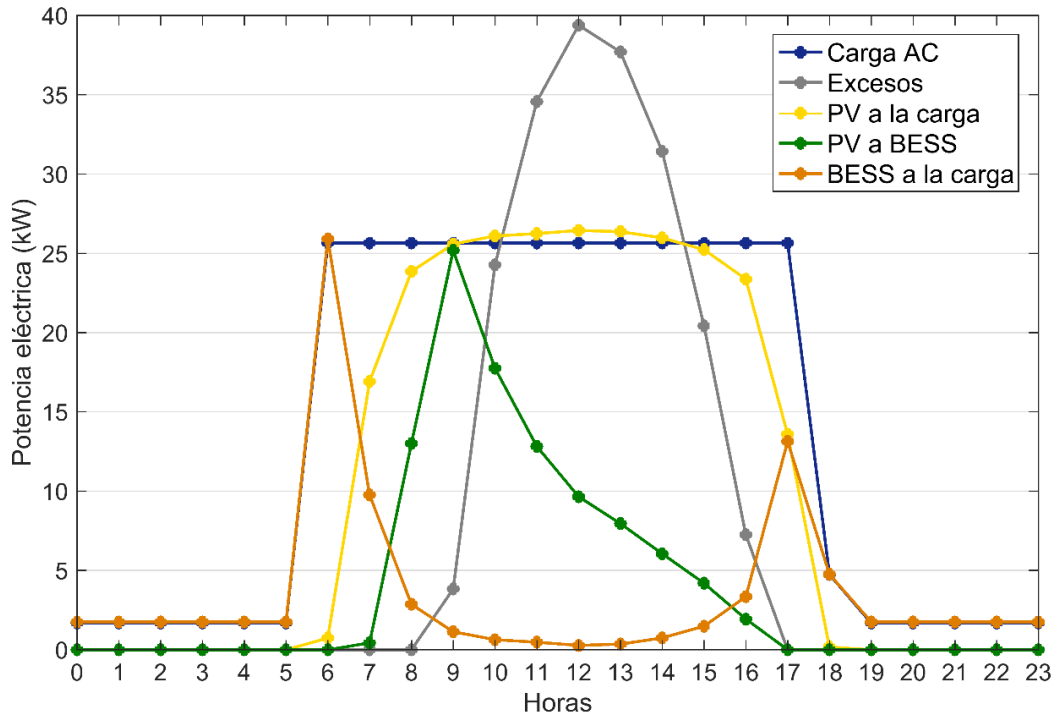


Figura 3.9 Curva de operación del SPV-OFF 1

El sistema del escenario 2, mostrado en la Figura 3.10, alcanza un exceso diario máximo de 51.6 kW. Para este caso, 44.2 % de la carga se abastece por paneles. De la energía total obtenida, 25.2 % se utiliza para suministrar la planta mediante los paneles y 37.33 % para recargar las baterías.

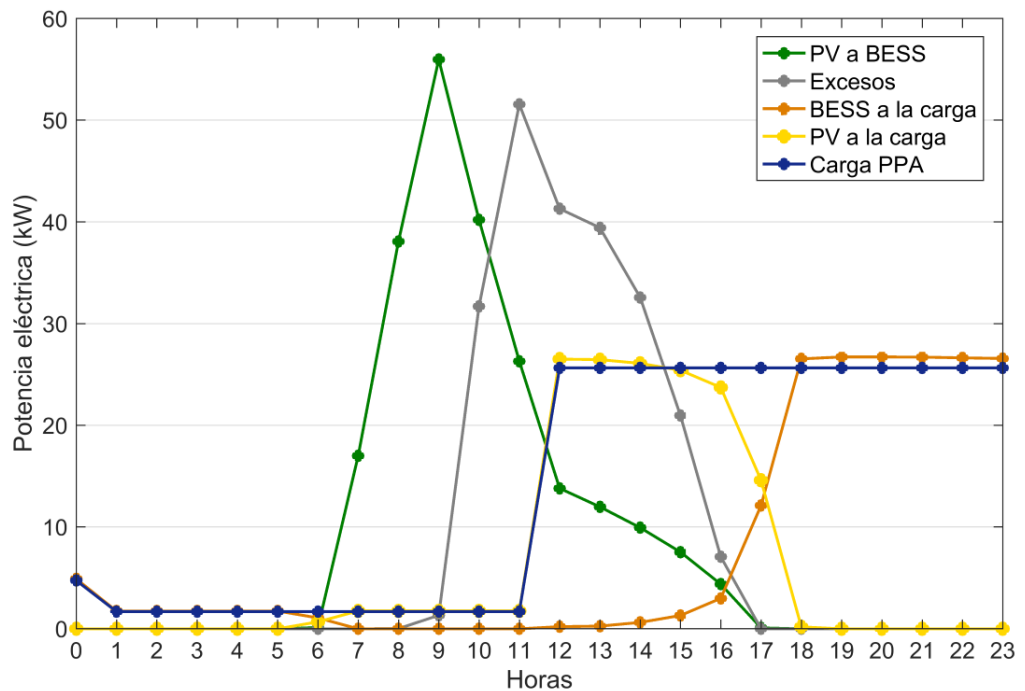


Figura 3.10 Curva de operación del SPV-OFF 2

La Figura 3.11 indica la operación del sistema del escenario 3, obteniendo un exceso diario máximo de 35.4 kW. La carga se abastece principalmente por baterías, representando 94.1% del suministro total. Considerando la producción energética total, 69.5 % se utiliza para cargar las baterías y 3.7 % va directamente de los paneles a la carga. Por otro lado, el funcionamiento del sistema para la carga de 24 horas, mostrado e, la Figura 3.12, alcanza un exceso máximo diario de 49.5 kW. 54.1 % de la demanda es suministrada mediante baterías, mientras que 45.9 % proviene directamente de los paneles. De la energía total obtenida, 35.5% se utiliza para cargar las baterías y 25.6 % representa la energía suministrada a la carga por paneles.

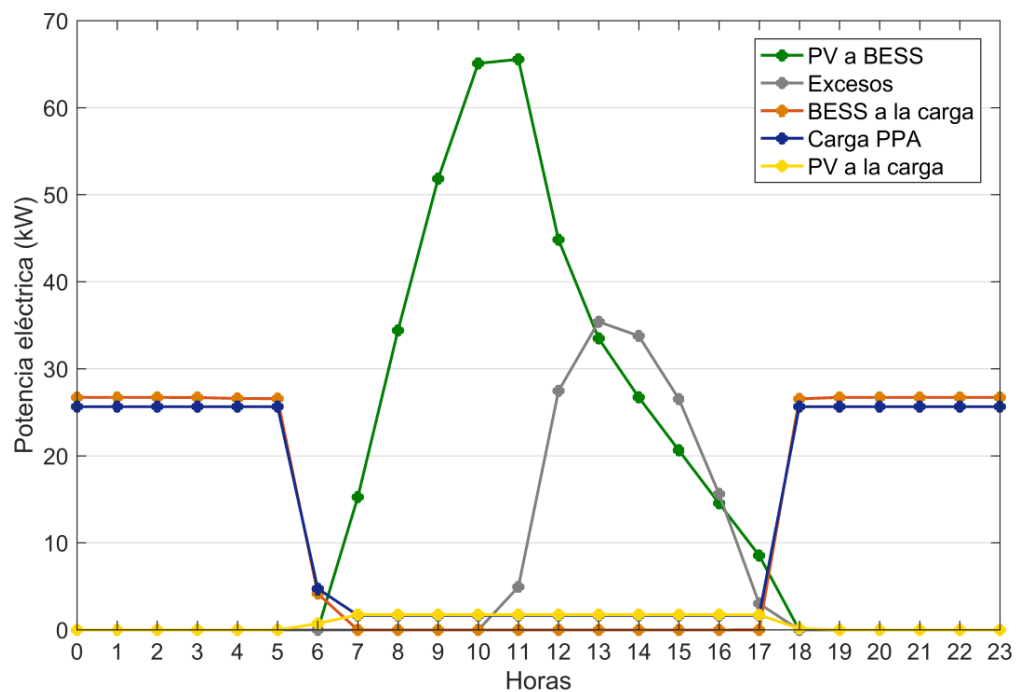


Figura 3.11 Curva de operación del SPV-OFF 3

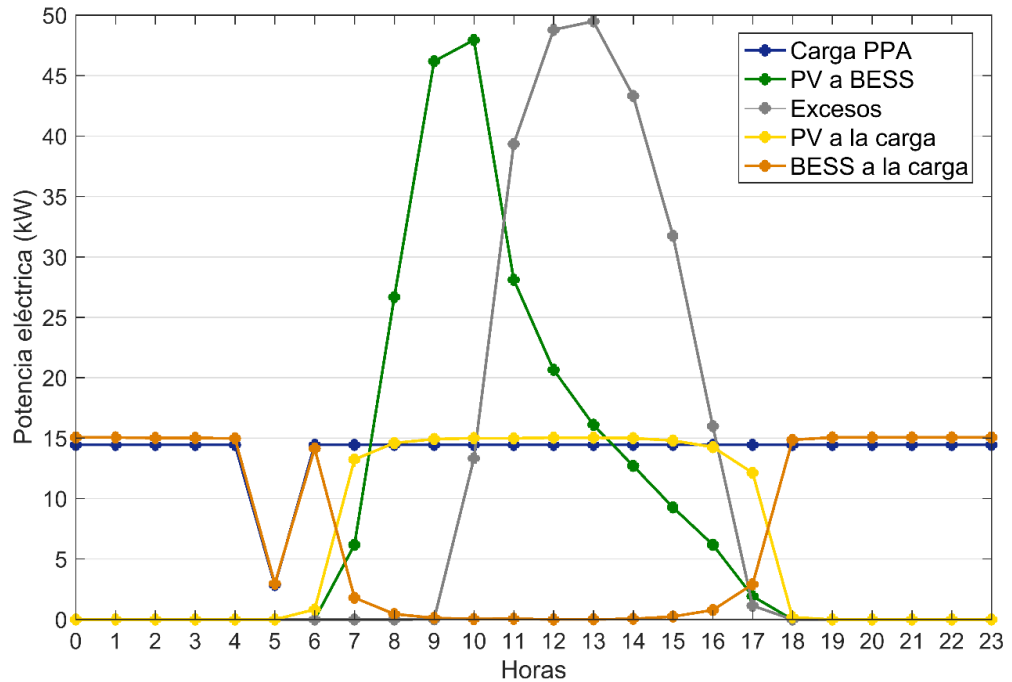


Figura 3.12 Curva de operación del SPV-ON 4

3.6 Sistema solar fotovoltaico conectado a la red (SPV-ON)

Este sistema fue simulado considerando el primer escenario de operación de la PPA de 12 h y el escenario de la PPA de 24 h. Los resultados son:

Tabla 3.15 Sistema energético para SPV-ON

Parámetro	PPA 12h	PPA 24h
	SPV-ON 1 ¹	SPV-ON 4 ²
Arreglo de paneles (kW)	55	40
Potencia del inversor (kW)	40	30
Energía anual obtenida de la red (kWh)	52,784	79,342
Energía anual vendida a la red (kWh)	9,406	13,369
Fracción renovable (%)	59.5	41.6
Exceso de energía (%)	0.18	0.05
Energía no abastecida (%)	0	0.0
Emissiones anuales (kg CO ₂)	18.5	27.8

¹ SPV-ON 1: Escenario de carga 1. ² SPV-ON 4: Escenario de carga para 24 h

En la Figura 3.13 se puede observar el funcionamiento del sistema para el escenario 1. 43.7 % de la carga se abastece mediante energía proveniente de

la red. De la energía total obtenida por el sistema fotovoltaico, tan solo 12.1 % se entrega a la red, mientras que 87.9% suministra energía a la carga a través de los paneles. Por otro lado, el sistema dimensionado para una configuración de 24 horas abastece 64.7 % de la carga utilizando energía procedente de la red. 23.7 % de la energía total obtenida del sistema se entrega a la red, en tanto 76.3 % alimenta la carga mediante los paneles. Los excesos de energía son lo suficientemente bajos (menor al 1%) para no ser mostrados en ambas figuras.

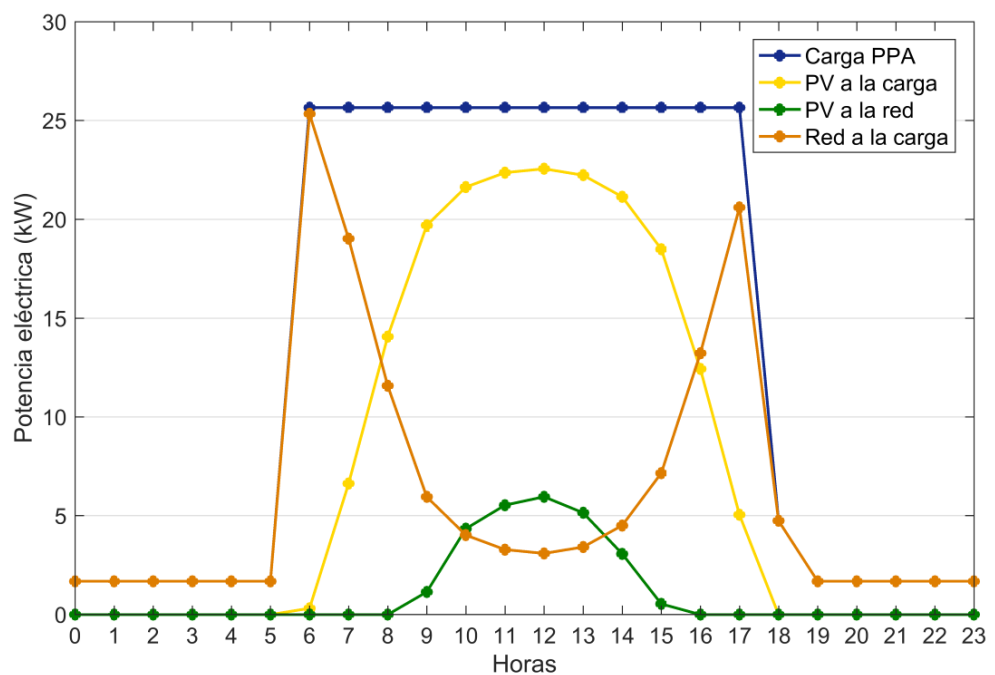


Figura 3.13 Curva de operación del SPV-ON 1

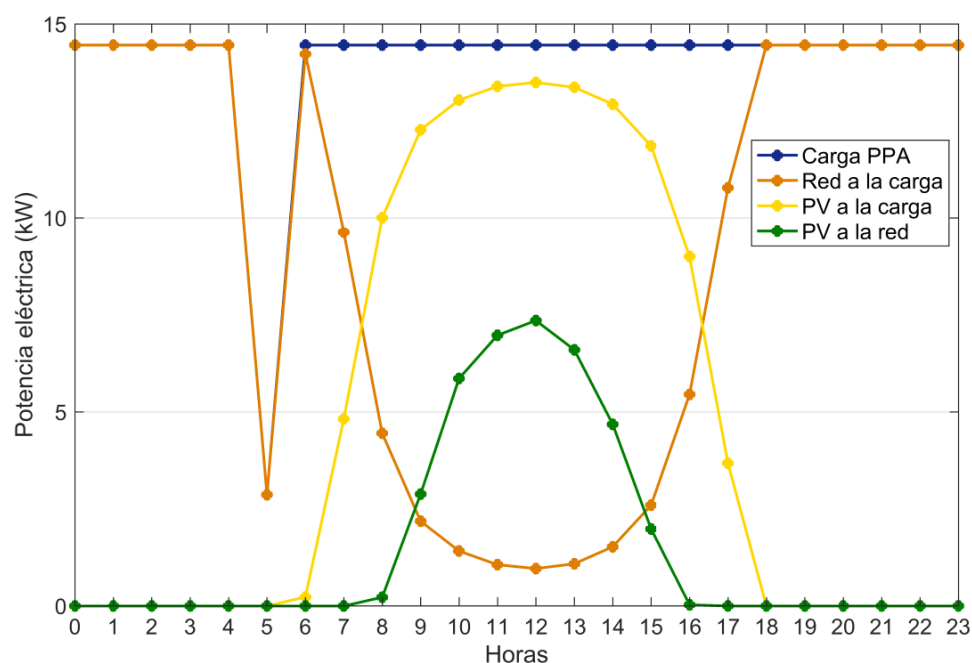


Figura 3.14 Curva de operación de SPV-ON 4

3.7 Análisis económico

Planta: Para el análisis económico de ambos casos de PPA se calcularon los costos de inversión inicial para todo el sistema y los costos anuales referentes al mantenimiento y operación de cada planta.

Los costos de inversión inicial consideraron los costos del sistema hidráulico, la obra civil y la estructura de las etapas dimensionadas. Respecto al sistema hidráulico, los precios de los accesorios y tuberías fueron estimados de acuerdo con los precios del mercado ecuatoriano. Por otro lado, los equipos de bombeo fueron costeados a través del catálogo USABlueBook, considerando un valor de arancel del 12.5% (I.V.A y Fodinfra). Los costos de las estructuras del proceso de potabilización y accesorios de la planta fueron compartidos por una empresa encargada del diseño de plantas potabilizadoras con parámetros similares a este proyecto, cuyo nombre se prefiere mantener reservado. Además, se consideraron costos de los materiales consumibles, la mano de obra y el transporte de los equipos. El costo de la obra civil se calculó como el 65% del costo total de la planta. Los resultados se presentan en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16 Inversión inicial de cada PPA

Detalle	Precio (USD)	
	Planta 12h	Planta 24h
Accesorios y equipos		
Válvula antirretorno (3)	504	651
Válvula de compuerta (6)	1,140	258
Codos 90 (10)	25.20	18.90
Tubería acero comercial (108 m)	7,812	4,687
Tanque de captación	8,500	5,000
Bomba sumergible tramo A	6,524.87	3,857.62
Bomba centrífuga tramo 4	658.00	492.00
Bomba centrífuga tramo 5	5,532.00	3,215.00
Bomba centrífuga tramo C	1,218.25	920.00
Mano de obra		
Materiales consumibles	650	650
Mano de obra	8,200	8,200
Transporte	600	600
Etapas de la planta		
PPA	67,127	67,127
Obra civil	70,657.19	62,320.39
Total	179,361	158,198

Con respecto a los costos de operación, se consideraron costos de salarios para los encargados de la planta y los materiales requeridos para su funcionamiento (sulfato de aluminio e hipoclorito de calcio). El costo de mantenimiento se obtuvo de proyectos similares y consideró actividades realizadas en las bombas, reemplazos preventivos de sensores y válvulas, limpieza de tuberías e inspecciones. En la Tabla 3.17 se presentan los valores anuales promedios.

Tabla 3.17 Costo de operación de cada PPA

Detalle	Precio (USD)	
	Planta 12h	Planta 24h
Operación de la planta		
Supervisor de planta	7,200	7,200
Auxiliar de operación	4,800	4,800
Sulfato de aluminio	1,032	1,032
Hipoclorito de calcio	540	540
Mantenimiento de la planta		
Mantenimiento	4,600	4,600
Servicio de inspección	400	400
Total	18,572	18,572

La inversión inicial para la PPA de 12 h fue \$179,361, mientras que la PPA de 24 h requirió una inversión menor de \$158,198. Ambas plantas presentaron el mismo costo de operación y mantenimiento anual igual a \$18,572.

Sistema energético: Homer Pro simuló los sistemas hasta obtener el menor costo presente neto (NPC) para cada caso. Además, el software obtuvo el costo de energía de cada sistema, permitiendo calcular el costo energético para la producción de agua potable (COA). Para obtener el NPC, se requirieron los costos de inversión inicial de cada uno de los sistemas energéticos dimensionados. Las Tablas 3.18 y 3.19 presentan el detalle de inversión inicial de los sistemas autónomos y conectados a la red para cada PPA.

Tabla 3.18 Inversión inicial para SPV-OFF

Detalle	PPA de 12 h			PPA de 24 h
	SPV-OFF 1	SPV-OFF 2	SPV-OFF 3	SPV-OFF 4
Panel solar	104,518.52	113,010.65	102,558.80	117,016.67
BESS	183,200.00	219,840.00	320,600.00	219,840.00
Inversor	28,350.00	28,350.00	28,350.00	18,900.00
Regulador	20,000.00	20,000.00	20,000.00	20,000.00
Costos fijos	15,000.00	15,000.00	15,000.00	15,000.00
Total	351,068.52	396,200.65	486,508.80	390,756.67

Tabla 3.19 Inversión inicial para SPV-ON

Detalle	PPA de 12 h	PPA de 24 h
	SPV-ON 1	SPV-ON 4
Panel solar	104,518.52	117,016.67
Inversor	28,350.00	18,900.00
Controlador	10,000.00	10,000.00
Costos fijos	15,000.00	15,000.00
Total	104,355.56	83,572.22

Homer también analizó los costos de operación y mantenimiento. Para los sistemas autónomos no se consideraron gastos relevantes en mantenimiento. No obstante, Homer estimó costos de reemplazo de equipos para el inversor y el BESS, cuyo coste es igual a la inversión inicial. El inversor realiza un reemplazo en los sistemas autónomos y conectados a la red en el décimo año, mientras que el reemplazo de BESS depende del sistema dimensionado. Para los sistemas conectados a la red, los costos de operación y mantenimiento representan la suma del cargo de la demanda anual de la red y del valor neto entre compra y venta de energía a la red. En la Tabla 3.20 se presenta el detalle de los costos para cada año de operación:

Tabla 3.20 Costos de operación y mantenimiento para SPV-ON

Año	SPV-ON 1 (PPA 12 h)		SPV-ON 4 (PPA 24 h)	
	Demanda (\$)	Compra y venta (\$)	Demanda (\$)	Compra y venta (\$)
1	738.57	-274.78	454.71	969.34
2	744.10	233.49	454.71	1,507.58
3	739.36	113.84	454.71	1,560.57
4	739.75	308.53	454.71	1,812.30
5	740.15	498.52	454.71	2,080.50
6	740.54	698.49	454.71	2,247.35
7	753.84	888.82	454.71	2,408.02
8	766.75	988.02	454.71	2,576.19
9	766.99	1,186.12	454.71	2,743.00
10	769.88	1,379.49	454.71	2,904.07
11	770.11	1,606.65	454.71	3,072.54
12	770.34	1,803.90	454.71	3,239.66
13	781.85	2,072.58	454.71	3,401.05
14	804.02	2,125.12	454.71	3,588.89
15	804.02	2,296.61	454.71	3,769.54

La vigente resolución de ARCONEL 057/18 explica que, para sistemas de generación de energía fotovoltaica con una potencia nominal menor a 100kW con conexión a la red, los excedentes energéticos serán entregados a la red de la empresa de distribución. Cada mes se realizará un balance entre la energía consumida y entregada por el consumidor y en caso de que este balance presente un remanente positivo de energía entregada a favor de la red, esta energía se considerará como crédito que el consumidor podrá usar el siguiente mes y así sucesivamente hasta un periodo de 2 años previo reinicio. (ARCONEL. 2018)

Bajo este caso actual, no sería posible tener una venta a la red mayor que el valor de compra, y el exceso energético deberá ser compensando en los siguientes meses. Siendo así, la tabla 3.20 no debería mostrar un valor negativo para el año 1 en la compraventa, si no, un valor de 0. Considerando que estas resoluciones cambian en el tiempo, el escenario presentado en la

tabla 3.19 es posible y se hace uso para el desarrollo del análisis económico del presente proyecto.

Para el cálculo del NPC, se consideró una tasa de descuento anual del 6. El COE representa el valor promedio de la vida operativa del sistema. Con respecto al COA, el valor se calculó promediando los resultados de la división entre el costo anualizado y la cantidad de agua potable a producir durante cada año de operación. Los resultados se presentan en la Tabla 3.20.

Tabla 3.21 Resumen de COE para cada sistema energético

Sistema	Escenario	NPC (USD)	COE (USD/kWh)	COA (USD/m ³)
Autónomo (aislado de la red)	SPV-OFF 1	321,789.38	0.339	0.263
	SPV-OFF 2	399,321.48	0.421	0.326
	SPV-OFF 3	514,006.44	0.541	0.420
	SPV-OFF 4	389,174.77	0.414	0.318
Conectado a la red	SPV-ON 1	133,379.57	0.141	0.109
	SPV-ON 4	120,491.62	0.128	0.098

El sistema autónomo más rentable para la PPA de 12 h correspondió al escenario 1 con NPC y COA iguales a \$321,789.38 y \$0.263 respectivamente, mientras que para la PPA de 24 h se obtuvieron valores mayores de \$389,174.77 y \$0.318. Para el sistema conectado a la red. la PPA de 12 h requirió un NPC de \$133,379.57 con un COA de \$0.109 y, por otro lado, la PPA de 24 h alcanzó un costo menor para el NPC de \$120,491.62 y para el COA de \$0.098.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se dimensionaron las etapas de captación y potabilización de acuerdo con el caudal de diseño, el cual fue calculado estimando la demanda de agua de la comunidad en el último año de operación de la planta. Con ello se asegura un abastecimiento del recurso que considere un crecimiento poblacional del sector. La PPA de 24 h requirió un caudal de diseño de 7.7 l/s, mientras que para la PPA de 12 h el caudal necesario fue 15 l/s.
- Al calcular el costo total de la inversión inicial para cada planta, se encontró que con la implementación de una PPA de 12 se requirió aumentar la inversión en un 13.4%, igual a \$21,163. Este incremento se debe a que el caudal de diseño necesario para una PPA de 12 h fue casi el doble del valor respecto a la PPA de 24 h, requiriendo un mayor tamaño en el sistema hidráulico y en las dimensiones de las etapas de potabilización. Esto ocasionó un aumento en el gasto de los equipos y la construcción de la planta.
- Se obtuvo el consumo energético de la planta para cada año de operación, considerando las potencias nominales de los equipos presentes en el proceso. En el último año de operación la PPA de 24 h alcanzó una demanda anual de 122,372 kWh con un consumo máximo por hora de 12.8 kW, mientras que la PPA de 12 h requirió 120,919 kWh, alcanzando un consumo pico de 22.83 kW.
- Al dimensionar un sistema fotovoltaico autónomo para cada escenario de carga de la PPA de 12 h, se determinó que para el escenario 1 se abasteció el 75.5% de la carga con la energía proveniente directamente de los paneles, requiriendo el menor número de baterías. Además, dado el bajo porcentaje de descarga de estas, el sistema alcanzó una mayor autonomía obteniendo el menor porcentaje de la carga no abastecida.

- Por otra parte, en el escenario 3 se obtuvo el menor excedente energético igual a 26.8%. En este caso, el 95% de su carga fue abastecida por el sistema de almacenamiento dado que la demanda era en la noche. Por lo tanto, se aumentó el número de baterías y se obtuvo un menor número de paneles. Para reducir el exceso de energía en los otros sistemas era necesario sobredimensionar las baterías. No obstante, esto aumentaba el NPC y reducía su rentabilidad.
- Considerando los tres escenarios planteados para la PPA de 12 h, se demostró que se obtiene un menor NPC del sistema autónomo cuando la operación de la planta se realiza principalmente en horas de radiación solar. Al comparar este escenario con el sistema dimensionado para la PPA de 24 h, se evidenció que para una PPA de 12 h la carga abastecida por paneles aumentó en un 29.7%, el exceso de energía se redujo en un 3.3% evitando el desperdicio de 16,178 kWh y se obtuvo una reducción en el NPC de 17.4%, ahorrando \$67,390.
- En caso de considerar la inversión inicial de cada PPA con el NPC de su respectivo sistema autónomo, se alcanza una reducción del 9.2% en el costo para la PPA de 12h, equivalente a \$46,227. Por lo tanto, se concluye que una PPA de 12 h abastecida por un sistema autónomo presenta una mayor rentabilidad para aplicarse en zonas rurales aisladas en comparación con una PPA de 24 h.
- Al dimensionar un sistema fotovoltaico conectado a la red para cada planta, se determinó que la PPA de 24 h requirió un menor número de paneles y potencia del inversor. Por otra parte, la PPA de 12 h aprovechó en un 21.1% la energía proveniente directamente de los paneles solares, obteniendo una mayor fracción renovable y menor cantidad de emisiones anuales. En términos económicos, el sistema de la PPA de 24 consigue una reducción del NPC en un 9.7% dado que el 64.8% de su carga se abastece por energía de la red, cuyos precios en Ecuador se encuentran subsidiados. Esto permitió aumentar la rentabilidad de dicho sistema. Por

lo tanto, se concluye que una PPA de 24 h abastecida por un sistema conectado a red presenta mayor viabilidad para aplicarse en zonas rurales con conexión a la red eléctrica del Ecuador.

- Con respecto a la PPA de 12 se determinó un COA para el sistema autónomo y el conectado a la red de \$0.263 y \$0.109 respectivamente, mientras que para la PPA de 24 h el COA obtenido fue \$0.318 y \$0.098 para cada caso. Aunque se presente un ahorro entre las configuraciones de cada PPA con un sistema específico, su coste energético sigue siendo superior a una planta que sea abastecida únicamente por la red. Esto se debe a los elevados gastos de inversión de los equipos del sistema fotovoltaico y el alto subsidio del costo de energía proveniente de la red. Por lo tanto, se concluye que, aunque estos sistemas reducen el impacto ambiental, pueden ser aplicados únicamente en zonas rurales.

4.2 Recomendaciones

- Las etapas de la PPA fueron diseñadas de forma teórica, esto, debido a que no fue posible realizar un estudio de Jarras para el agua de pozo en la comunidad de Pile, por ende, algunas decisiones acerca de la cantidad de coagulante, cantidad de cloro e incluso las etapas a utilizar pueden variar. Se recomienda poder realizar un ensayo de jarras para el agua del pozo con el fin de mejorar el diseño de la PPA más cercano a la realidad para la comunidad.
- Por otra parte, el análisis de calidad de agua fue tomado de un informe técnico del año 2010. Siendo que, las propiedades del agua presente en la zona pueden ser diferentes en el presente, lo que implica nuevamente un rediseño de las etapas de la PPA. Se recomienda para un estudio futuro, tener el análisis fisicoquímico del agua más reciente.
- El consumo energético de la PPA dependió, en gran medida, del caudal de diseño. Este se estimó de acuerdo con la norma INEN-CPE 5. Sin embargo, un estudio del consumo real de agua en la comunidad es

recomendado ya que proveería una información más real de la demanda a abastecer, lo cual cambiaría levemente el caudal de diseño y el perfil de carga de la PPA.

- En este caso particular, la comunidad de Pile cuenta con conexión a la red eléctrica. Sin embargo, muchas comunidades rurales cuentan con abastecimiento energético por medio de generadores Diesel. Por ello, se recomienda para estas comunidades simular sistemas fotovoltaicos autónomos en conjunto con los generadores, con el fin de poder determinar el sistema más conveniente en cuanto a precio y energía.
- Se recomienda tener en cuenta la normativa vigente para la venta a la red de los sistemas de micro generación fotovoltaicos ya que esto cambia el análisis económico para las PPA con conexión a la red y por ende es determinante para la mejor selección.
- Se recomienda hacer uso de la metodología planteada en el presente proyecto para obtener el perfil de consumo de una PPA, considerar que el proceso de diseño para la PPA solo es válido para poblaciones menores a 5000 habitantes, por lo cual, se debe rediseñar las etapas considerando la norma INEN CPE-5 para casos fuera de dicho rango, además, se plantea extrapolar el proceso de diseño de la solución para comunidades rurales cuyo índice de radiación este en promedio anual de 5 kW/m^2 .

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía en norma APA:

- Alfaro, E., Aer, G., Canga, P., & Ta, M. (2010). *Pile Monthly Radiation*. 1–4.
- ARCONEL. (2018). Resolución No. ARCONEL -042/18 Regulacion No. ARCONEL-003/18 Codificación. In *Arconel* (p. 41). <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/03/042-18.pdf%0Awww.regulacionelectrica.gob.ec>
- BHs. (2020). *Montecristi climate: Average Temperature, weather by month, Montecristi weather averages - Climate-Data.org*. <https://en.climate-data.org/south-america/ecuador/provincia-de-manabi/montecristi-25447/>
- Cabrera, X., Fleites, M., & Contreras, A. (2019). FLOCULACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE LA EMPRESA TEXTIL " DESEMBARCO DEL GRANMA " A ESCALA DE Introducción. *Tecnología Química, XXIX, núm*, 64–73.
- Cimbala, J. M., & Cengel, Y. a. (2001). *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*. McGrawHill, *Primera Ed*, 10–11.
- CONAGUA. (2009). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Plantas Potabilizadoras de Tecnología Simplificada. In *Comisión Nacional del Agua México*. CONAGUA.
- CPE INEN 5, N. T. E. (1992). *Normas Para Estudio Y Diseño De Sistemas De Agua Potable Y Disposición De Aguas Residuales Para* (p. 291). INEN.
- Crane. (1979). *Flow of fluids through valves, fittings and pipe*. CRANE C.O.
- Definitivo, D. (1931). *INFORME FINAL Ingeniero Civil Limberg Macias Mendoza* (Issue 052).
- Días, T., & Carmona, G. (2015). Componentes de una instalación solar fotovoltaica 1. In *Instalaciones solares fotovoltaicas* (Mc Graw Hi, p. 30).
- DWE. (2020). *Ficha Técnica DWE-WQK* (p. 3). https://cima.aemps.es/cima/dohtml/ft/49903/FT_49903.html
- Ebara. (2021). *Ficha Técnica CMA* (pp. 39–44).
- Elshamy, M. (1992). Teoría y práctica de la purificación del agua. In *Transportation*. Mc Graw Hill.
- García Garnica, J. E., Sepúlveda Mora, S. B., & Ferreira Jaimes, J. (2018). Viabilidad

- técnico-económica de un sistema fotovoltaico en una planta de tratamiento de agua. *Inge Cuc*, 14(1), 41–51. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.14.1.2018.04>
- Gómez Chaves, J. M., & Manrique Prieto, I. A. (2016). *Diseño y construcción de una torre de sedimentación para la evaluación de los procesos de remoción y eficiencia en el tratamiento de agua potable* [Universidad Católica de Colombia]. [https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/13900/4/DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TORRE DE SEDIMENTACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS DE REMOCIÓ.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/13900/4/DISEÑO_Y_CONSTRUCCIÓN_DE_UNA_TORRE_DE_SEDIMENTACIÓN_PARA_LA_EVALUACIÓN_DE_LOS_PROCESOS_DE_REMOCIÓ.pdf)
- INEN. (2014). Agua Potable. Requisitos. Nte Inen 1108. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*, 5, 1–10. <http://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte/1108-5.pdf>
- Kawamura, S. (1999). Design and operation of high-rate filters. *Journal / American Water Works Association*, 91(12), 77–90. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1999.tb08752.x>
- KIWI. (2020). Catalogo Pedrollo. *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents*, 35.
- Miduvi, E. B. E. V., & República, L. A. (2015). *Proyecto de agua potable para alte*. 2555758.
- Ordinola Saavedra, E. (2019). Diseño de la Planta de Tratamiento de Agua Potable para tres centros poblados del distrito de Ignacio Escudero. *Universidad de Piura*. <https://hdl.handle.net/11042/4337>
- Pile cuenta con 247 tejedores que están calificados | Intercultural | Noticias | El Universo*. (n.d.). Retrieved September 2, 2021, from <https://www.eluniverso.com/noticias/2019/12/31/nota/7671687/pile-cuenta-247-tejedores-que-estan-calificados/>
- Ramirez, A. D., Boero, A., Rivela, B., Melendres, A. M., Espinoza, S., & Salas, D. A. (2020). Life cycle methods to analyze the environmental sustainability of electricity generation in Ecuador: Is decarbonization the right path? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134(August), 110373. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110373>
- RODRÍGUEZ, C. (1995). Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. In *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Romero Rojas, J. A. (1999). *Potabilizacion Del Agua.pdf*. Escuela Colombiana de Ingenieria. file:///C:/Users/Andres Ramirez/Downloads/314629477-Romero-Rojas-

Jairo-Alberto-Potabilizacion-Del-Agua.pdf

Sarmiento, D. A. (2003). *Aplicación de la energía solar y luz ultravioleta en la potabilización de agua en escuelas primarias*. La Habana.

Toro, A. (2016). *Incidencia de la producción de sombreros de paja toquilla, como expresión cultural, en el desarrollo económico de la provincia de Manabí*. 4. <http://hdl.handle.net/10644/4988>

Urbana, A., Municipio, D. E. L., Amir, D. E. A. L. T., & As, T. A. (2000). *DISEÑO DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA EL AREA URBANA DEL MUNICIPIO DE AL T AMIR*.A. Tecnólogo de Monterey.

Vargas, L. de. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

APÉNDICES

APÉNDICE A – SIMULACIÓN EN SUPER DECISIONS

En el capítulo 2 se aplicó la metodología AHP para seleccionar la mejor alternativa de solución a través de un simulador denominado SUPER DECISIONS, el cual. desde ya se advierte que es un software libre. A continuación, se muestran las capturas de las comparaciones pareadas entre criterios y alternativas, que permitieron determinar los pesos de cada uno de los criterios y el peso relacionado con su alternativa. Además. se verifica que para cada análisis realizado se mantuvo una tasa de inconsistencia menor al límite propuesto igual a 0.05.

Para determinar los pesos de importancia de cada uno de los criterios se realizaron comparaciones pareadas entre ellos mediante la escala de importancia descrita en el capítulo 2. En la Figura A.1 se presenta las escalas seleccionadas y los pesos finales obtenidos para cada criterio.

Emisiones is moderately more important than Costos de operación																					
1.	Costos de op~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.
2.	Costos de op~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.
3.	Costos de op~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.
4.	Costos de op~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.
5.	Costos de op~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.
6.	Emisiones	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.
7.	Emisiones	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.
8.	Emisiones	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.
9.	Emisiones	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.
10.	Exceso de en~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.
11.	Exceso de en~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.
12.	Exceso de en~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.
13.	Fiabilidad	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.
14.	Fiabilidad	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.
15.	Invresión in~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.

Inconsistency: 0.05828		
Costos de~		0.12778
Emisiones		0.29046
Exceso de~		0.27154
Fiabilidad		0.04194
Invresión~		0.07847
Mantenimi~		0.18981

Figura A.1 Comparación por pares entre objetivos de diseño

Después, se procede a realizar comparaciones pareadas de las alternativas de solución con cada uno de los criterios seleccionados, trabajando con la misma escala de importancia. Los pesos obtenidos considerando cada criterio se presentan a continuación:

- Costos de operación

Comparisons wrt "Costos de operación" node in "Alternatives" cluster											Inconsistency: 0.00885												
12h on grid is equally to moderately more important than 24h on grid											12h off g~	0.70097											
1.	12h off grid	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	12h or	12h on gr~	0.19288
2.	12h off grid	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	24h or	24h on gr~	0.10615
3.	12h on grid	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	24h or		

Figura A.2 Comparación de alternativas considerando costos de operación

- Emisiones

Comparisons wrt "Emisiones" node in "Alternatives" cluster											Inconsistency: 0.28344												
12h off grid is extremely more important than 12h on grid											12h off g~	0.79683											
1.	12h off grid	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	12h or	12h on gr~	0.15140
2.	12h off grid	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	24h or	24h on gr~	0.05178
3.	12h on grid	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	24h or		

Figura A.3 Comparación de alternativas considerando emisiones

- Excesos de energía

Comparisons wrt "Exceso de energía" node in "Alternatives" cluster											Inconsistency: 0.09040												
12h on grid is moderately to strongly more important than 24h on grid											12h off g~	0.06434											
1.	12h off grid	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	12h or	12h on gr~	0.69862
2.	12h off grid	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	24h or	24h on gr~	0.23704
3.	12h on grid	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	24h or		

Figura A.4 Comparación de alternativas considerando excesos de energía

- Inversión inicial

Comparisons wrt "Inversión inicial" node in "Alternatives" cluster											Inconsistency: 0.05156												
24h on grid is moderately more important than 12h on grid											12h off g~	0.08522											
1.	12h off grid	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	12h or	12h on gr~	0.27056
2.	12h off grid	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	24h or	24h on gr~	0.64422
3.	12h on grid	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	24h or		

Figura A.5 Comparación de alternativas considerando inversión inicial

- **Mantenimiento**

Comparisons wrt "Mantenimiento" node in "Alternatives" cluster										Inconsistency: -0.00000												
12h on grid is equally to moderately more important than 24h on grid										12h off g~	0.66667											
1. 12h off grid	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	12h on gr~	0.22222
2. 12h off grid	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	24h on gr~	0.11111
3. 12h on grid	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.		

Figura A.6 Comparación de alternativas considerando mantenimiento

- **Fiabilidad**

Comparisons wrt "Fiabilidad" node in "Alternatives" cluster										Inconsistency: 0.00000												
12h on grid is equally as important as 24h on grid										12h off g~	0.05882											
1. 12h off grid	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	12h on gr~	0.47059
2. 12h off grid	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	24h on gr~	0.47059
3. 12h on grid	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.		

Figura A.7 Comparación de alternativas considerando fiabilidad

Finalmente, el programa determina el porcentaje de conveniencia de cada solución respecto a los criterios de diseño, cuyos valores se presentan en la Figura A.8.

Name	Graphic	Ideals	Normals
12h off grid		1.000000	0.468068
12h on grid		0.728780	0.341119
24h on grid		0.407661	0.190813

Figura A.8 Ponderaciones de las alternativas

APÉNDICE B – DISEÑO DE PPA Y SISTEMA HIDRÁULICO

Parámetros de diseño

Tiempo de operación: Acorde con la norma, el tiempo de operación de una planta puede ser mínimo hasta 15 años, cuyo valor fue seleccionado para el desarrollo del proyecto.

Población futura: Los datos de población obtenidos en el Censo realizado en 2001 indicaron que Pile tenía 707 habitantes. Para el 2019, mediante un estudio económico, se determinó que la población había alcanzado los 1400 habitantes (El Universo. 2019). Esto permitió obtener la tasa de crecimiento mediante la forma aritmética:

$$r = \left(\frac{P_f}{P_o} - 1 \right) * \frac{1}{t} \quad (\text{A.1})$$

Luego, se procedió a determinar la población futura por el método aritmético para el año actual (2021) y los 14 años siguientes considerando un crecimiento lineal.

$$P_f = P_o(1 + rt) \quad (\text{A.2})$$

Dotación de agua: La dotación per cápita se obtuvo de la tabla de dotaciones recomendadas en la norma INEN 5. De acuerdo con la población futura a abastecer y el clima presente en el sector, la norma recomienda una dotación entre 170 a 200 l/hab/día. Para el proyecto se consideró la dotación mínima.

Caudal de diseño: Para obtener el caudal de diseño primero se requiere calcular el caudal medio. La norma recomienda una ecuación directamente proporcional a la dotación y población a abastecer, e inversamente proporcional a las horas de funcionamiento al día. De acuerdo con el proyecto, las etapas se diseñaron considerando el último año de operación. Por ello, el caudal medio se calculó tomando en cuenta la población para el quinceavo año y un tiempo máximo de 12 horas, acorde con la solución seleccionada.

$$Q_{med} = \frac{Q * N}{t * 3600} \quad (\text{A.3})$$

Para obtener el caudal de diseño, el valor de caudal medio se multiplicó por 1.3 para considerar el caudal máximo diario y por 1.1 para obtener el caudal de diseño de la PPA. Estos valores son recomendados por la norma .

Etapa de mezcla rápida

Para esta etapa se realizó la mezcla aprovechando la turbulencia generada en un mezclador hidráulico: canaleta Parshall. El gradiente de velocidad y tiempo de retención dependieron de las dimensiones de la canaleta Parshall, cuyos valores fueron seleccionados acorde con el ancho nominal que dependía del caudal de diseño como se muestra en la Tabla A.1. (Ordinola Saavedra. 2019)

Tabla A.1 Parámetros para mezcla rápida

Ancho nominal (cm)	N	K	Capacidad (l/s)
7.6	1.547	0.176	0.85 – 53.8
15.2	1.580	0.381	1.52 – 110.4
22.9	1.530	0.535	2.55 – 251.9
30.5	1.522	0.690	3.11 - 455.6

El primer paso en el proceso de cálculo para el gradiente de velocidad y tiempo de retención fue obtener la altura inicial del agua en la sección del ancho de la canaleta. Los valores de N y K se obtuvieron de la Tabla A.1, donde Q es el caudal de diseño de la PPA.

$$Q = K * H^N \quad (A.4)$$

El proceso de cálculo requirió de una serie de ecuaciones que se detallan a continuación, las cuales dependen de las dimensiones de la canaleta, el caudal de diseño y la altura inicial en la sección del ancho de la canaleta.

- Ancho de la sección de medición (D'):

$$D' = \frac{2}{3}(D - W) + W \quad (A.5)$$

- Velocidad en la sección de medición (V_o):

$$V_o = \frac{Q}{H_o * D'} \quad (A.6)$$

- Caudal específico en la garganta de la canaleta (q):

$$q = \frac{Q}{W} \quad (A.7)$$

- Carga hidráulica disponible (E_o):

$$E_o = \frac{V_o^2}{2g} + H_o + N \quad (A.8)$$

- Ángulo de inclinación (ϕ):

$$\phi = \arccos\left(-\frac{q * g}{\left(\frac{2}{3} * g * E_o\right)^{1.5}}\right) \quad (\text{A.9})$$

- Velocidad antes del resalto (V_1):

$$V_1 = 2 * \sqrt{2 * g * \frac{E_o}{3} * \cos(180^\circ - \phi)} \quad (\text{A.10})$$

Donde g es la aceleración de la gravedad.

- Altura de agua antes del resalto (h_1):

$$h_1 = \frac{q}{V_1} \quad (\text{A.11})$$

- Número de Froude (F_1):

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g * h_1}} \quad (\text{A.12})$$

El valor recomendado para la PPA debe estar entre 2 y 3.

- Altura de resalto (h_2):

$$h_2 = \frac{h_1}{2} * \sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \quad (\text{A.13})$$

- Velocidad en el resalto (V_2):

$$V_2 = \frac{Q}{W * h_2} \quad (\text{A.14})$$

- Altura en la sección de salida de la canaleta (h_3):

$$h_3 = h_2 - (N - K) \quad (\text{A.15})$$

- Velocidad en la sección de salida (V_3):

$$V_3 = \frac{Q}{C * h_3} \quad (\text{A.16})$$

- Pérdida de carga en el resalto (h_p):

$$h_p = H_o + K - h_3 \quad (\text{A.17})$$

- Tiempo de mezcla en el resalto (t):

$$t = \frac{2 * G}{V_2 + V_3} \quad (\text{A.18})$$

- Gradiente de velocidad (G):

$$G = \sqrt{\frac{\gamma}{\mu} * \frac{h_p}{T}} \quad (\text{A.19})$$

Donde: γ es el peso específico (kg/m^3) y μ es la viscosidad dinámica ($N s/m^2$), ambos para el agua. Para los valores se consideró una temperatura de 20 °C.

Etapa de floculación

Se seleccionó una unidad de floculación hidráulica en sentido horizontal que trabajaría con tres tramos. La etapa fue diseñada para obtener tres gradientes de velocidad dentro de los valores recomendados por la norma (entre 20 y 90 s^{-1}) y que presenten una disminución gradual entre cada uno. Además, se requirió un tiempo de retención total en la etapa mínimo de 20 min (CPE INEN 5. 1992). Ordinola realizó un proceso de diseño en su tesis, la cual fue aplicada y se detalla en esta sección. (Ordinola Saavedra. 2019) El proceso de diseño se repite para cada tramo y se modifican ciertos parámetros para variar los gradientes de velocidad. Estos valores se muestran en la Tabla A.2.

Tabla A.2 Parámetros de floculación

Parámetro	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3
Separación entre pantallas (m)	0.054	0.070	0.126
Tiempo de retención (min)	7	7	6

Para obtener los gradientes de velocidad se requirió calcular:

- Volumen (V):

$$V = t * Q \quad (\text{A.20})$$

Donde: t es el tiempo de retención (min), cuyo valor dependió del tramo del floculador diseñado, y Q es el caudal de diseño (m^3/s)

- Área transversal del canal (S_t):

$$S_t = e * h \quad (\text{A.21})$$

Donde: e es la separación entre pantallas (m). la cual dependió del tramo del floculador diseñado, h es la profundidad del agua en la cámara (m) igual a 1.1 m.

- Velocidad (V_1):

$$v = \frac{Q}{S_t} \quad (\text{A.22})$$

- Longitud total recorrida por el agua (L):

$$L = v_1 * t \quad (\text{A.23})$$

Donde t es el tiempo de retención (s) y depende de cada tramo.

- Profundidad total (h_t):

$$h_t = h + b_{libre} \quad (\text{A.24})$$

Donde: b_{libre} es la altura con respecto al borde libre, igual a 0.20 m.

- Longitud efectiva del canal (A):

$$A = A_{canal} - E * e_1 \quad (\text{A.25})$$

Donde: A_{canal} es el ancho de canal (m), cuyo valor se consideró de 4.50 m. E representa el espaciamiento entre tabiques y pared igual a 1.5. (Romero Rojas. 1999)

- Número de canales (N):

$$N = \frac{L}{A} \quad (\text{A.26})$$

Este número debe ser redondeado al entero mayor.

- Longitud total interior de la cámara de floculación (L_T):

$$L_T = N * (e_1 + e') \quad (\text{A.27})$$

Donde: e' es el espesor de las paredes de concreto (m), cuyo valor fue 0.03 m.

- Pérdida de carga por fricción (h_f):

$$h_f = \frac{(n * V_1)^2 * (A * N)}{\left(\frac{S_t}{2 * h + e_1}\right)^{4/3}} \quad (\text{A.28})$$

Donde: n es el coeficiente de fricción. igual a 0.013 para superficies de cemento. (Romero Rojas. 1999)

- Pérdida de carga por vuelta (h_v):

$$h_v = \frac{2 * (N - 1) * V_1^2}{2 * g} \quad (\text{A.29})$$

- Pérdida de carga total (H):

$$H = h_f + h_v \quad (\text{A.30})$$

- Gradiente de velocidad (G):

$$G = \sqrt{\frac{\gamma}{\mu} * \frac{H}{t}} \quad (\text{A.31})$$

Para los valores de γ/μ se consideró una temperatura del agua de 20 °C.

Etapa de sedimentación

De acuerdo con la norma CPE INEN 5. los sedimentadores convencionales de flujo horizontal son los más adecuados cuando se prevé un postratamiento de filtración. Se recomienda una forma rectangular por mayor eficiencia de remoción. (CPE INEN 5. 1992). Para el sedimentador se diseñaron las siguientes zonas:

- **Zona de entrada:** La entrada de agua al sedimentador se da por un tabique con perforaciones circulares (orificios) que permiten el flujo. El diámetro de los orificios recomendado, de acuerdo con la norma, es de 0.1m, y la velocidad del flujo en los orificios es tal que garantice mantener el gradiente de velocidad de salida del agua en la etapa de floculación, es decir: (Ordinola Saavedra. 2019)

$$G = \sqrt{\frac{\frac{4f}{\gamma} (V^3)}{D}} \quad (\text{A.32})$$

Donde f es el coeficiente de Darcy – Weisbach adoptado como 0.03 (Ordinola Saavedra. 2019), γ viscosidad cinemática del agua, V la velocidad del agua y D el diámetro del orificio. El caudal en los orificios es:

$$Q = \frac{\pi V D^2}{4} \quad (\text{A.33})$$

El número de orificios requerido:

$$N = \frac{Q_{desing}}{Q} \quad (\text{A..34})$$

- **Zona de sedimentación:** La norma CPE INEN 5 recomienda que la carga superficial del sedimentador para una planta pequeña sea el 50% del usado en plantas grandes. Se adopta el valor de 60 m/d. la carga superficial U :

$$U = \frac{Q_{desing}}{A_s} \quad (\text{A.35})$$

Donde: A_s es el área de sedimentación. La norma recomienda una relación largo/ancho entre 3 a 5, donde se consideró un valor de 3. El tiempo de retención del agua en el sedimentador es de 2 h de acuerdo con la norma, de esta forma se puede hallar la altura del sedimentador H como:

$$H = \frac{Qt}{A_s} \quad (\text{A.36})$$

- **Zona de lodos:** La norma recomienda que la pendiente longitudinal mínima de en la zona de acumulación de lodos sea del 5% con forma de V. Por lo tanto, la profundidad máxima de la tolva (h) es:

$$h = 5\% * L \quad (\text{A.37})$$

La extracción de lodos se recomienda de forma discontinua.

- **Zona de salida:** Se recomienda el uso de un vertedero por rebose en la zona de salida, con el fin de minimizar efectos no deseados como corrientes de densidades.

Etapa de filtración

Para los niveles de turbiedad y solidos suspendidos presentes en el agua cruda, la norma recomienda el uso de filtros rápidos de alta tasa de filtración. La tasa de filtración (q) recomendada es de 120 m/h. De esta forma, el área de filtración (A_f) requerida es:

$$q = \frac{Q_{desing}}{A_f} \quad (\text{A.38})$$

Se elije un sedimentador de área cuadrada. cuyo lado A se calcula por:

$$A = \sqrt{A_f} \quad (\text{A.39})$$

La norma recomienda que el lecho filtrante sea una capa de arena con un espesor de 1.2 m. La altura de agua sobrenadante tendrá 1.2m de altura y el borde libre será de 0.25m. El número de unidades filtradores es:

$$N = 0.044 \sqrt{Q \left[\frac{m^3}{dia} \right]} \quad (\text{A.40})$$

Para el proceso de lavado de filtros fue requerido calcular los puntos mencionados a continuación:

- **Lavado de filtros:** La velocidad de lavado v_b para un lecho de arena típico es el 10% de su correspondiente velocidad de arrastre v_t . (Kawamura. 1999). El valor de la velocidad de arrastre es:

$$v_t = 10 (TE)(CU) \quad (\text{A.41})$$

$$v_b = 0.1 v_t \quad (\text{A.42})$$

Por lo tanto. el caudal requerido para el lavado Q_l es:

$$Q_l = A_f v_b \quad (\text{A.43})$$

La duración de carrera de un filtro rápido es de 16 horas. (Romero Rojas. 1999)

- **Drenaje para filtros:** Se elijen tubos perforados para el drenaje de agua de filtros. La velocidad de filtrado v_f es:

$$v_f = \frac{Q_{desing}}{A_f} \quad (\text{A.44})$$

El diámetro de los orificios se adopta como 10 mm. Por lo tanto, el área A_o de cada orificio es:

$$A_o = \frac{\pi D^2}{4} \quad (\text{A.45})$$

El caudal por cada orificio Q_o se calcula adoptando una velocidad en los orificios de 0.2 m/s.

$$Q_o = v_f A_o \quad (\text{A.46})$$

El número de orificios se calcula mediante:

$$N_o = \frac{Q_{desing}}{Q_o} \quad (\text{A.47})$$

Los cuales se encuentran espaciados a 0.2 m cada uno. (CPE INEN 5. 1992)

- **Tanque de agua de lavado:** El tanque de agua de lavado tendrá un volumen igual al volumen del filtrador.
- **Perdidas de carga en el lavado:** Las pérdidas de carga durante el lavado se debe a 4 causas, donde la pérdida total es la suma de estas. El lecho expandido produce una pérdida de carga (h_1):

$$h_1 = L(1 - e)(S - 1) \quad (\text{A.48})$$

Donde L es la altura del lecho de arena, e la porosidad (0.48 para arena), S la densidad relativa de arena (2.65) (Romero Rojas. 1999). La pérdida debido al lecho de grava (h_2) es:

$$h_2 = \frac{v_b L}{3} \quad (\text{A.49})$$

Donde L es el espesor de las capas de grava. La pérdida debido al sistema de drenaje (h_3) se calcula por:

$$h_3 = \frac{1}{2g} \left(\frac{v_b}{0.0036} \right)^2 \quad (\text{A.50})$$

- **Canaleta de lavado:** La estructura donde sale el agua de lavado del filtro tendrá forma de U, con ancho $b=0.4\text{m}$ (Ordinola Saavedra. 2019) y alto h , cuyo valor se obtuvo de la ecuación siguiente: (Romero Rojas. 1999):

$$Q_l = 1.38 bh^{1.5} \quad (\text{A.51})$$

Al h se le adiciona un borde libre para evitar ahogamiento, adoptado como 7.5 cm (entre 5 a 10 cm).

Etapa de desinfección

Para la etapa de desinfección, se hace uso de hipoclorito de sodio con concentración de 70% de cloro, recomendado por la norma para plantas pequeñas. El cloro residual recomendado es de 0.5 mg/l. Para conseguir esto se requiere una concentración de cloro de: (Arboleda. 1992)

$$\frac{N_t}{N_o} = \frac{1}{(1 + 0.23C_t t)^3} \quad (\text{A.52})$$

Donde. N_t es el número de coliformes totales de salida que, de acuerdo con la norma, se toma un valor de 1.8 mg/l; N_o es la concentración del agua cruda (Limberg. 2010), t es el tiempo de contacto, el cual se recomienda de 20min.

La cantidad de hipoclorito de cloro (C) al día es de:

$$C = \frac{C_t(Q_{desing})}{0.7} \quad (\text{A.53})$$

Considerando un tanque comercial de 50kg, el tiempo de duración (t_t) del tanque es:

$$t_t = \frac{50}{C} [\text{dias}] \quad (\text{A.54})$$

El volumen del tanque de contacto es tal que permita que el tiempo de contacto sea de 20min:

$$V = Q_{desing} t \quad (\text{A.55})$$

El método de dosificación recomendada por la norma es IEOS. La velocidad del hipoclorito de sodio para una tubería se adopta de $v= 0.3 \text{ m/s}$. (Miduvi & República. 2018)

Diseño de sistema de bombeo

Las velocidades recomendadas de los tramos presentes en la planta se presentan en la Tabla A-3. de acuerdo con las recomendaciones del libro de diseño de rojas:

Tabla A.3 Velocidades recomendadas para la planta

Tubería	Valor [m/s]
1	1.8
2	3
3	1.8
4	3
5	3
C	3
C'	3
A	-
D	3

En cada tramo de la planta existen diferentes accesorios cuyas funciones sirven para transporte, control de flujo, entre otros. La tabla A.4 incida los accesorios presentes en cada tramo, así como otras especificaciones:

Tabla A.4 Accesorios de los tramos presentes

Tramo	Accesorio	Función	Características
1	Válvula antirretorno	Evitar caída de columna de agua	Tipo de unión bridada
	Codo 90	Transporte hacia proceso de planta	2 de unión roscada
2	Codo 90	Transporte hacia proceso de planta	2 de unión roscada
	Válvula de compuerta	Permitir el paso de agua cruda al proceso	Tipo de unión bridada
A	Válvula de compuerta	Permitir paso de coagulante según sea el caso	Tipo de unión roscada
	Codo 90	Transporte hacia canaleta Parshall	Tipo de unión roscada
3	Válvula de compuerta	Permitir el paso de agua cruda al proceso	Unión de tipo roscada
4	Válvula antirretorno	Evitar caída de columna de agua	Tipo de unión bridada
	Codos 90	Transporte hacia cloración	2 codos de unión tipo roscada
	Válvula de compuerta	Permitir el paso de agua filtrada a cloración	Tipo de unión bridada
	Tee	Bypass para agua de lavado	Unión de tipo roscada
C'	Válvula de compuerta	Permitir el paso de agua de lavado al tanque.	Tipo de unión bridada
	Tee	Transporte hacia el tanque	Unión de tipo roscada
C	Válvula antirretorno	Evitar caída de columna de agua	Tipo de unión bridada
	Codos 90	Transporte hacia filtración	2 codos de unión de tipo roscada
	Válvula de compuerta	Permitir el paso de agua de lavado	Tipo de unión bridada
5	Válvula antirretorno	Evitar caída de columna de agua	Tipo de unión bridada
	Codos 90	Transporte hacia distribución	2 codos de unión de tipo roscada
	Válvula de compuerta	Permitir el paso de agua de agua potable	Tipo de unión bridada

El valor de K para diferentes accesorios para su respectivo tipo de unión se muestra en la tabla A.5:

Tabla A.5 Valores de K para accesorios. (Cimbala & Cengel. 2001)

Accesorio	Valor de K
Codo roscado	0.9
Tee roscada	1
Tee hacia bifurcación	2
Válvula de compuerta abierta	0.2
Entrada con expansión	0.5
Salida con reducción	1
Válvula antirretorno	2.5

Para seleccionar e identificar mejor los equipos de bombeo. se identifican con un código presente en el diagrama PID de apéndice E. se identifican a los equipos con las siguientes nominaciones:

XX-A

Donde XX represente el equipo conforme a la siguiente tabla:

Tabla A.6 Nominación de equipos

Nominación de equipos	
BC	Bomba centrífuga
BS	Bomba sumergible
BD	Bomba dosificadora
MF	Grupo motorreductor

A represente el nombre del tramo donde opera la bomba. El tipo de bombas se seleccionan de acuerdo con la velocidad específica de la bomba y con la gráfica #2 del Apéndice D: (Cimbala & Cengel. 2001)

$$N_{sp.US} = \frac{RPM(Q)^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}} \quad (A.56)$$

Donde H es el cabezal total de la bomba, Q es el caudal en GPM. Los resultados muestran bomba de tipo centrífuga para toda la planta, excepto para la bomba dosificadora de sulfato de aluminio.

Condiciones de operación: La bomba para extracción del pozo es sumergible. las condiciones de operación de cada bomba se detallan en la Tabla A.7:

Tabla A.7 Condiciones de operación de las bombas

Equipo	Condiciones de operación
BS-1	Fluido: Agua Caudal: 237 GPM Temperatura: Ambiente [25C] Densidad: 1000 kg/m ³ Material cuerpo: Conexiones: Bridas
BS-4	Fluido: Agua Caudal: 237 GPM Temperatura: Ambiente [25C] Densidad: 1000 kg/m ³ Material cuerpo: Conexiones: Bridas
BC-5	Fluido: Agua Caudal: 237 GPM Temperatura: Ambiente [25C] Densidad: 1000 kg/m ³ Material cuerpo: Conexiones: Bridas
BC-C	Fluido: Agua Caudal: 412 GPM Temperatura: Ambiente [25C] Densidad: 1000 kg/m ³ Material cuerpo: Conexiones: Bridas
BD-A	-

Cabezal requerido: El cabezal requerido se obtiene de la siguiente formula: (Cimbala & Cengel. 2001)

$$H = (V_2^2 - V_1^2)/2g + \Delta Z + h_{menores} \quad (A.57)$$

Donde V es la velocidad en los puntos de análisis, ΔZ es la altura geométrica de operación de la bomba, y las perdidas menores se pueden calcular como (Urbana et al.. 2000):

$$\frac{\Delta P}{100 \text{ ft}} = 0.1294 f \rho V^2/D \quad (A.58)$$

La ecuación A-55 nos calcula la caída de presión por cada 100ft de longitud equivalente. se debe de evitar que este valor sea mayor a 0.1 psi. El factor f se determina con el diagrama de Moody, la rugosidad de la tubería adoptado como 0.05 para acero comercial y con el valor de Reynolds.

Potencia requerida: La potencia de la bomba es:

$$P = \frac{g\rho QH}{n} \quad (\text{A.59})$$

Donde n es la eficiencia del grupo motor-bomba que se adopta como 70% (Urbana et al.. 2000)

Longitud de tuberías: La longitud de la tubería de la bomba de distribución se toma considerando la distancia existente desde la superficie del pozo de agua cruda hasta los tanques de almacenamiento existentes en la zona (50m). (Limberg. 2010) Para la bomba sumergible se considera una longitud de tubería que conecte el tramo desde el pozo de agua cruda hasta el tanque elevado. Para esto, se considera el estudio sobre la capacidad del pozo realizado en la comunidad de pile (Limberg. 2010), que indica el mínimo nivel de agua cuando se extrae con una bomba sumergible, mostrando la ubicación a la que se debe ubicar la bomba por debajo del nivel de agua. denominado abatimiento, tal como se ve en la figura A.3. La rugosidad de la tubería fue de 0.05mm para acero comercial:

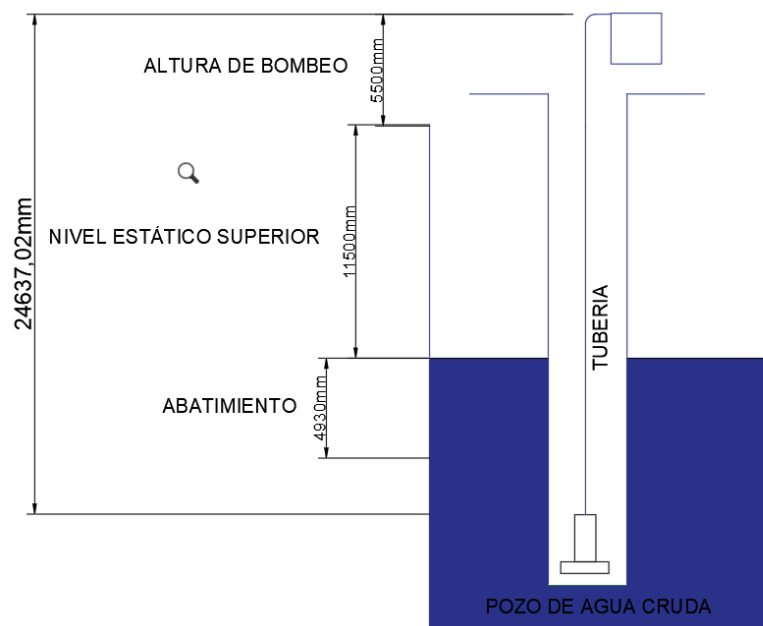


Figura A.9 Esquema de la bomba sumergible

La longitud del tramo 3 entre sedimentador y filtrador debe ser corta y se estima de 1m. Por otro lado, la longitud del tramo 4 debe ser tal que se permita que el agua suba hasta la parte superior del tanque de cloración. Por lo tanto, se adopta un largo total de 2.5m.

en el tramo C y C' que van desde el agua filtrada al tanque de lavado y del tanque de lavado al filtro respectivamente, también se adopta 2.5 m.

Especificaciones de bombas seleccionadas: Habiendo elegido la mejor solución como la planta de 12h, se especifican las bombas seleccionadas para dicha planta:

Tabla A.8 Especificaciones de bombas

Ecuación [Unidades] / Valor	BS-A	BC-4	BC-5	BC-C
Caudal de agua [l/min]	900			1600
Perdidas menores [m]	1.78	3.76	10.81	1.8
Cabezal geométrico [m]	26	1.46	65.46	1.16
Cabezal total de la bomba [m]	27.78	5.22	76.27	6.42
Potencia (W)	4,017	742.02	11,223.11	1,643
Eficiencia	0.7	0.7	0.7	0.7
Potencia requerida [hp]	7.7	1.43	22	3
Tipo de bomba	Sumergible	Centrifuga	Centrifuga	Centrifuga
Modelo elegido	DWE 75B	EBARA CMD 150M	PEDROLLO CP750A-N	PEDROLLO HF20A-N

Las curvas de operación de la bomba son:

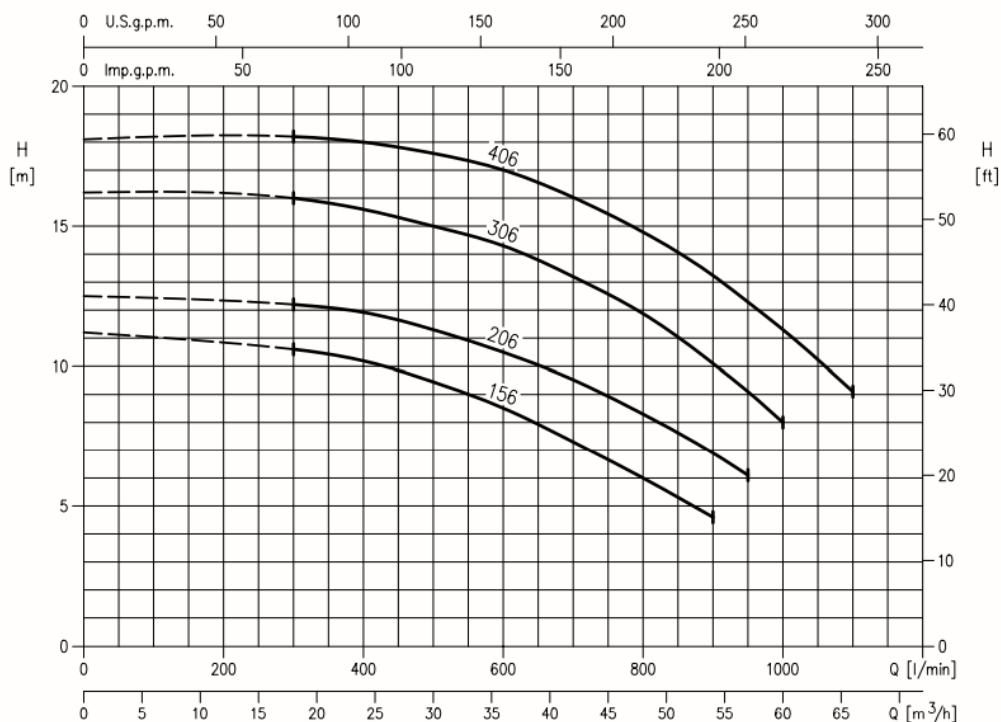


Figura A.10 Curva de operación bomba EBARA CMD 150M. (Ficha Técnica Xarelto. 2021)

CODIGO KYWI	CODIGO SAP	MODELO	POTENCIA (HP)	VOLTAJE	SUCC/DESC (PULG)	Q==>	m3/H						STATUS		
							0	18.0	30.0	48.0	51.0	54.0			
							Lpm	0	300	500	800	850	900		
	04167	CP750C-N	15	3F-220/440V	2 x 2	H==>	m	77.3	75.5	69.3	55.1			AGR	
	04166	CP750B-N	20	3F-220/440V	2 x 2			92	90.8	85.2	72.3	69.5			AGR
	04165	CP750A-N	25	3F-220/440V	2 x 2			106.6	105	99.5	85.5	83	79.6		AGR

Figura A.11 Especificaciones PEDROLLO CP750A-N. (Catalogo KIWI Pedrollo. 2020)

CODIGO KYWI	CODIGO SAP	MODELO	POTENCIA (HP)	VOLTAJE	SUCC/DESC (PULG)	Q==>	m3/H						STATUS		
							0	18.0	36.0	66.0	96.0	132.0			
							Lpm	0	300	600	1100	1600	2200		
	03828	HFm6B	2	1F-110V	3 x 3	H==>	m	14.7	14	12	5			AGR	
	03829			1F-220V											
	08091	HF20A-N	5.5	3F-220/440V	4 x 4										21.5
	08010	HF30A	10	3F-220/440V	4 x 4	23		23	22.5	22	18		AGR		

Figura A.12 Especificaciones PEDROLLO HF20A-N. (Catalogo KIWI Pedrollo. 2020)

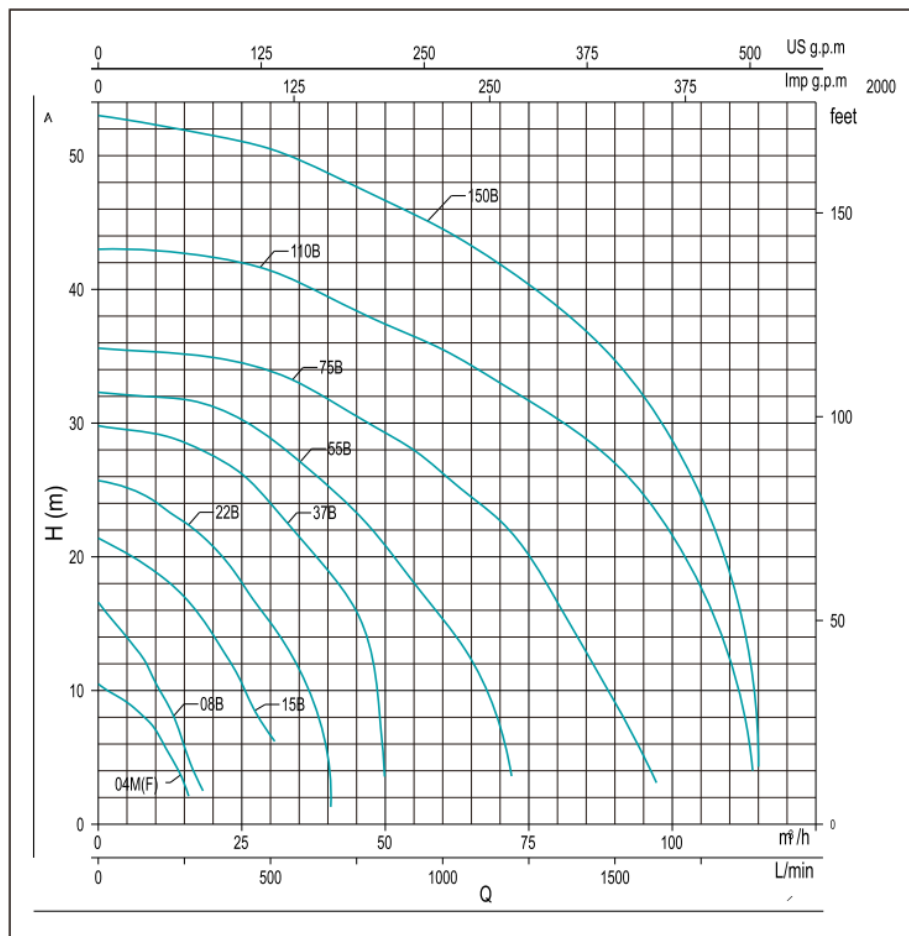


Figura A.13 Curva de operación bomba DWE-75B. (Ficha Tecnica Picosulfato. 2019)

APÉNDICE C – GRAFICAS Y CAPTURAS

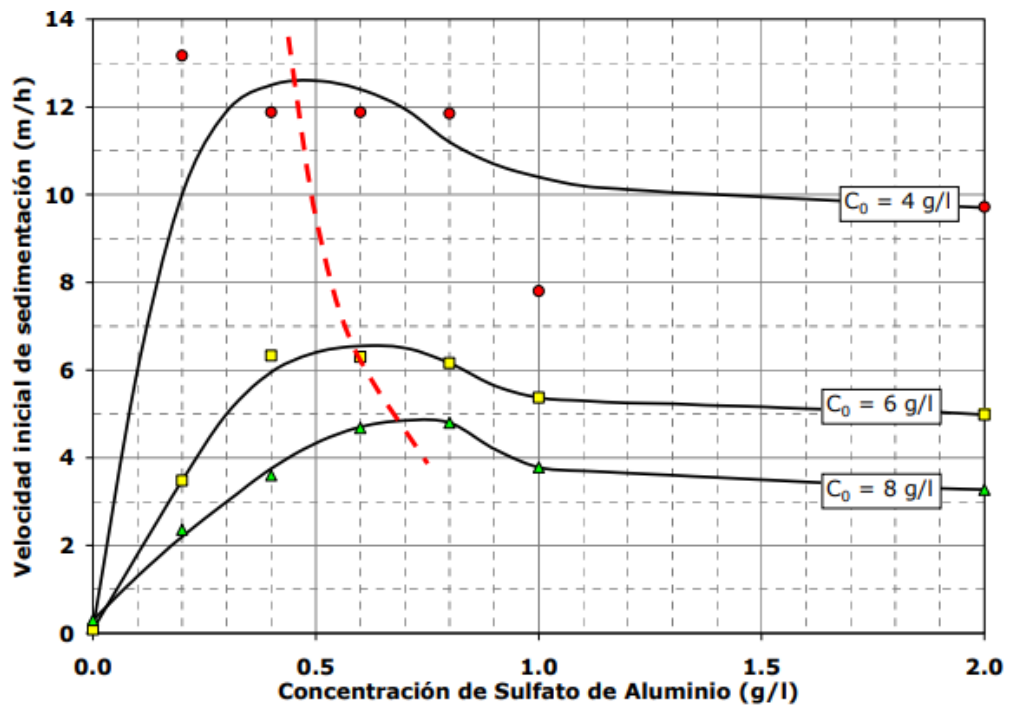


Figura A.14 Velocidad de sedimentación en función de la concentración de sólidos suspendidos y coagulante. (Villacreses et al. 2006)

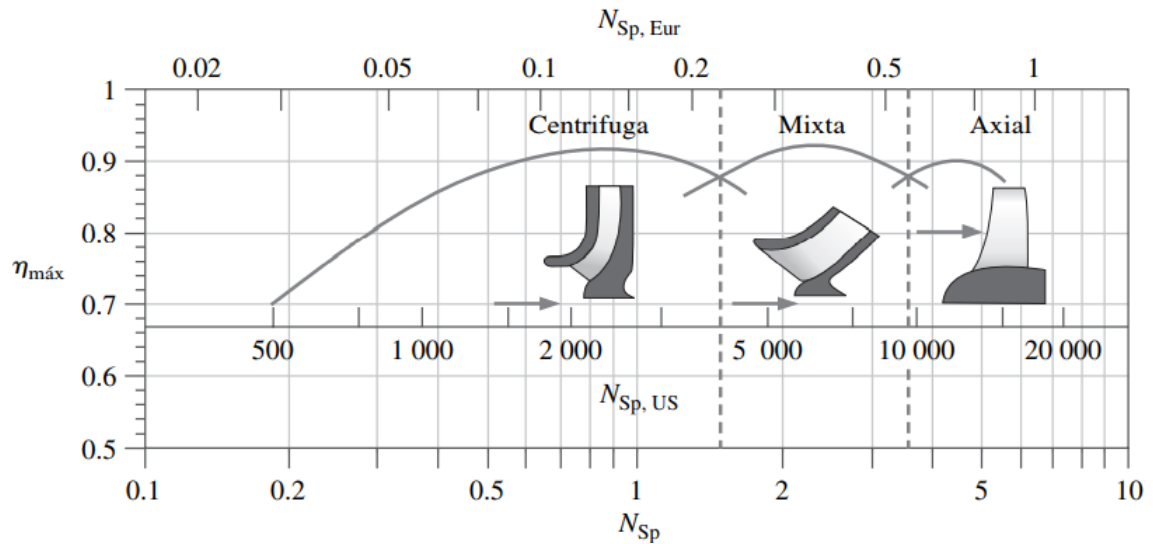


Figura A.15 Selección de tipo de bomba según velocidad específica. (Cimbala & Cengel. 2001)

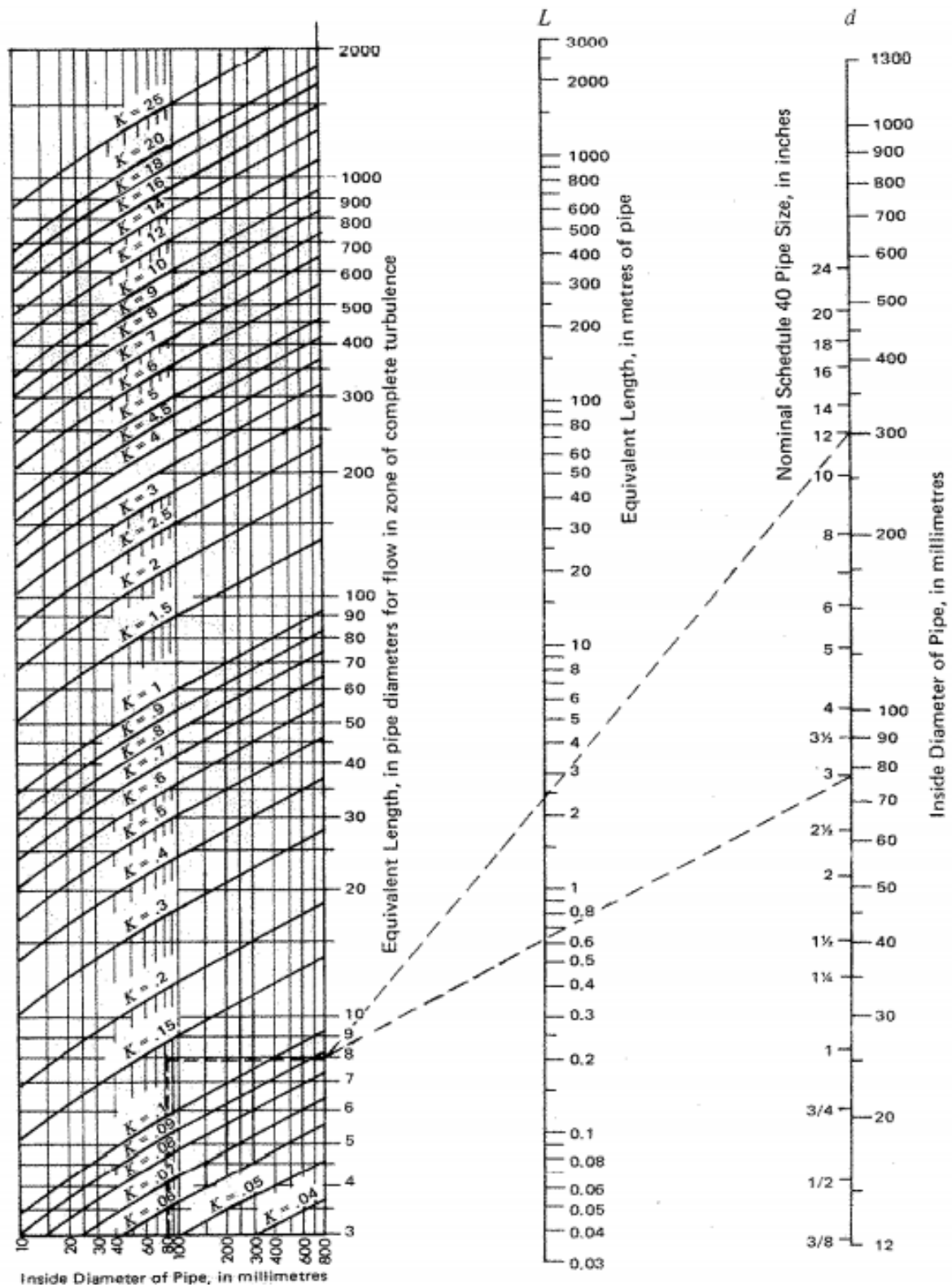


Figura A.16 Longitud equivalente de los accesorios. (Crane. 1979)

Current License Information (Hostid: 7294ca76)

Node Locked License

pro: version 3.14 expires 11-may-2022

biomass: version 3.14 expires 11-may-2022

hydro: version 3.14 expires 11-may-2022

combinedheatpower: version 3.14 expires 11-may-2022

advancedload: version 3.14 expires 11-may-2022

hydrogen: version 3.14 expires 11-may-2022

advancedgrid: version 3.14 expires 11-may-2022

advancedstorage: version 3.14 expires 11-may-2022

multiyear: version 3.14 expires 11-may-2022

matlablink: version 3.14 expires 11-may-2022

Figura A.17 Licencia Homer PRO

APÉNDICE D – CÓDIGO DE EES

Consumo:

$$V_3= 1.8 \text{ [m/s]}$$

$$V_4= 3 \text{ [m/s]}$$

$$V_5= 3 \text{ [m/s]}$$

$$V_C= 3 \text{ [m/s]}$$

"DIAMETROS"

$$D_1= (((4*Q_{\text{diseno}})/(\pi*V_1))^{1/2})^39[\text{in}]$$

$$D_2= (((4*Q_{\text{diseno}})/(\pi*V_2))^{1/2})^39[\text{in}]$$

$$D_3= (((4*Q_{\text{diseno}})/(\pi*V_3))^{1/2})^39[\text{in}]$$

$$D_4= (((4*Q_{\text{diseno}})/(\pi*V_4))^{1/2})^39[\text{in}]$$

$$D_5= (((4*Q_{\text{diseno}})/(\pi*V_5))^{1/2})^39[\text{in}]$$

$$D_C= (((4*Q_{\text{lavado}})/(\pi*V_C))^{1/2})^39[\text{in}]$$

"FACTOR DE FRICCIÓN ACERO COMERCIAL"

$$v = 0.000001 \text{ [m}^2\text{/s]} \text{ "Viscosidad del agua a temp ambiente"}$$

$$Re_1=(V_1*D_1/39)/v$$

$$f_1=0.25/\text{Log}_{10}(1/(3.7*(D_1*25.4/e))+5.74/Re_1^{0.9})^2$$

$$Re_4=(V_4*D_4/39)/v$$

$$f_4=0.25/\text{Log}_{10}(1/(3.7*(D_4*25.4/e))+5.74/Re_4^{0.9})^2$$

$$f_5 = f_4$$

$$Re_C=(V_C*D_C/39)/v$$

$$f_C=0.25/\text{Log}_{10}(1/(3.7*(D_C*25.4/e))+5.74/Re_C^{0.9})^2$$

"PERDIDAS MENORES"

$$H_{\text{menores1}}=0.1294*(f_1)*(62.3)*(V_1*3.28)^2*(L_{\text{equitramo}\#1}/100)*0.7031/D_1$$

$$H_{\text{menores4}}=0.1294*(f_4)*(62.3)*(V_4*3.28)^2*(L_{\text{equitramo}\#4}/100)*0.7031/D_4$$

$$H_{\text{menores5}}=0.1294*(f_5)*(62.3)*(V_5*3.28)^2*(L_{\text{equitramo}\#5}/100)*0.7031/D_5$$

$$H_{\text{menoresC}}=0.1294*(f_C)*(62.3)*(V_C*3.28)^2*(L_{\text{equitramo}\#C}/100)*0.7031/D_C$$

"PERDIDAS TOTALES"

$$H_{\text{vel1}}= V_1^2/19.6$$

$$H_{\text{geo1}}= 26 \text{ [m]}$$

$$H_{\text{total1}}=H_{\text{vel1}}+H_{\text{geo1}}+H_{\text{menores1}}$$

$$H_{\text{vel4}}=V_4^2/19.6$$

$$H_{\text{geo4}}= 1 \text{ [m]}$$

$$H_{\text{total4}}=H_{\text{vel4}}+H_{\text{geo4}}+H_{\text{menores4}}$$

$$H_{\text{vel5}}=V_5^2/19.6$$

$$H_{\text{geo5}}= 65 \text{ [m]}$$

$$H_{\text{total5}}=H_{\text{vel5}}+H_{\text{geo5}}+H_{\text{menores5}}$$

$$H_{\text{velC}}=V_C^2/19.6$$

$$H_{\text{lavado}}= 1.16 \text{ [m]}$$

$H_{geoC} = 3 \text{ [m]}$

$H_{totalC} = H_{velC} + H_{geoC} + H_{menoresC} + H_{lavado}$

"POTENCIA TEORICA DE LA BOMBA (70% EFICIENCIA)"

$P_{sumergible1} = (9.810 * Q_{diseno} * H_{total1}) / 0.7$

$P_{clor4} = (9.810 * Q_{diseno} * H_{total4}) / 0.7$

$P_{dist5} = (9.810 * Q_{diseno} * H_{total5}) / 0.7$

$P_{lavadoC} = (9.810 * Q_{lavado} * H_{totalC}) / 0.7$

Código de perfil de carga:

"DATOS DE ENTRADA"

$Pob_{actual} = 2000$

$Pob_{final} = 2640$

$Horas = 12$

$Horas_{funcionamiento} = Pob_{actual} * Horas / Pob_{final}$

"CONSUMO DURANTE LAS HORAS DE FUNCIONAMIENTO" "C=consumo"

$C_{base} = 2 \text{ [kWh]}$

$C_{motorfloculador} = 1.534 \text{ [kWh]}$

$C_{bombasumer1} = 7.5 \text{ [kWh]}$

$C_{bomba4} = 1.19 \text{ [kWh]}$

$C_{bomba5} = 18.6 \text{ [kWh]}$

$C_{bombaC} = 4.1 \text{ [kWh]}$

$C_{bombaA} = 0.04 \text{ [kWh]}$

$t_{llenado_tanque_lavado} = 16 / (1.1 * (1.3 * Pob_{final} * 0.17 * 60) / (Horas * 3600))$

$C_{horas_de_funcionamiento} = C_{base} + C_{motorfloculador} + C_{bombasumer1} + C_{bomba4} + C_{bomba5} + C_{bombaC} + C_{bombaA}$

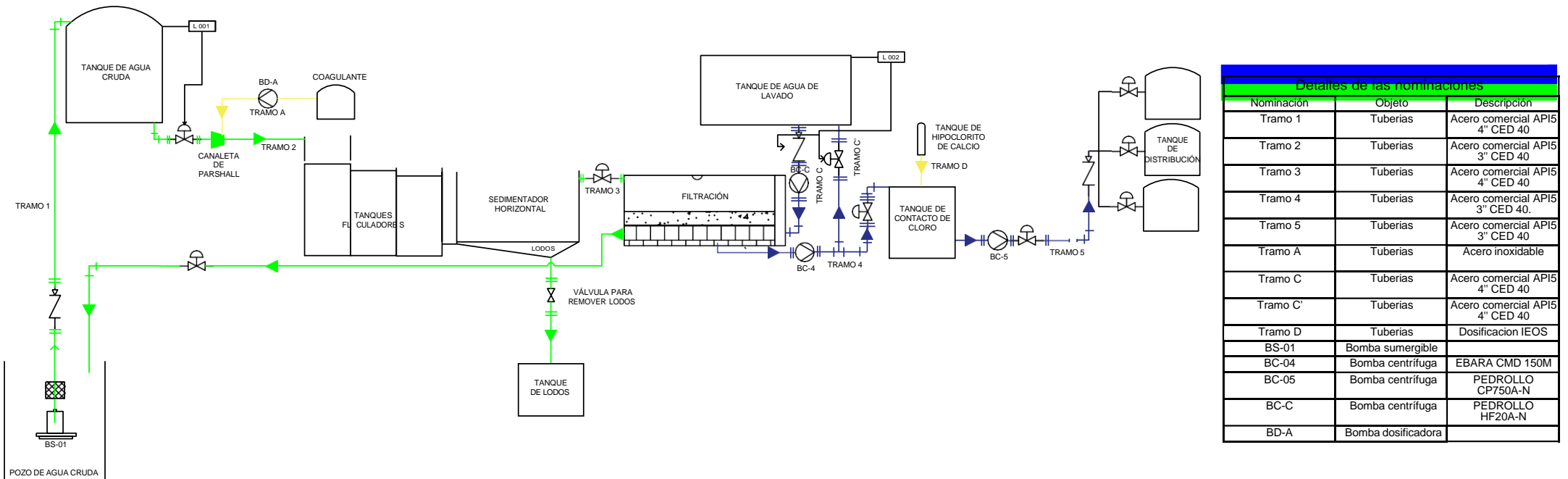
$C_{horas_sin_funcionamiento} = C_{base}$

$t_{lavado} = 20.5$

$C_{llenado} = C_{bomba4} + C_{base} + C_{motorfloculador} + C_{bombasumer1} + C_{bombaA}$

$C_{lavado} = C_{bombaC} + C_{base}$

APÉNDICE E – DIAGRAMA PID



Detalles de las nominaciones		
Nominación	Objeto	Descripción
Tramo 1	Tuberías	Acero comercial API5 4" CED 40
Tramo 2	Tuberías	Acero comercial API5 3" CED 40
Tramo 3	Tuberías	Acero comercial API5 4" CED 40
Tramo 4	Tuberías	Acero comercial API5 3" CED 40.
Tramo 5	Tuberías	Acero comercial API5 3" CED 40
Tramo A	Tuberías	Acero inoxidable
Tramo C	Tuberías	Acero comercial API5 4" CED 40
Tramo C'	Tuberías	Acero comercial API5 4" CED 40
Tramo D	Tuberías	Dosificación IEOS
BS-01	Bomba sumergible	
BC-04	Bomba centrífuga	EBARA CMD 150M
BC-05	Bomba centrífuga	PEDROLLO CP750A-N
BC-C	Bomba centrífuga	PEDROLLO HF20A-N
BD-A	Bomba dosificadora	

Figura A.18 Diagrama PID